

Technische Universität München  
Fakultät für Architektur  
Institut für Entwerfen und Baukonstruktion  
Lehrstuhl für Tragwerksplanung  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rainer Barthel

## **ETFE-Folie als Tragelement**

Karsten Moritz

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Architektur der  
Technischen Universität München zur Erlangung des  
akademischen Grades eines

**Doktors der Ingenieurwissenschaften**

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerhard Hausladen

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rainer Barthel  
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai-Uwe Bletzinger

Die Dissertation wurde am 02. Oktober 2007 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Architektur am 26. November 2007 angenommen.



Der Fortschritt lebt vom Austausch des Wissens  
*The progress lives from the exchange of knowledge*

Albert Einstein (1879 - 1955)



## **Zusammenfassung**

ETFE-Folien werden seit etwa 25 Jahren als architektonisches Element und tragendes Bauteil im Hochbau eingesetzt. Bereits einige hundert Projekte wurden unter Verwendung dieses Werkstoffes gebaut, ohne dass seine Tragfähigkeit in dem Maße bekannt und dokumentiert ist, wie für andere Werkstoffe des Bauwesens.

Die vorliegende Arbeit beinhaltet eine Datenauswertung von mehr als zweihundert ETFE-Projekten im Hinblick auf die bislang realisierten Formen, Bauarten, Nutzungen und Standorte. Bestehende Bemessungskonzepte sowie die in der Praxis angewendeten Prüfmethoden zur Erfassung des mechanischen Verhaltens der ETFE-Folie werden vorgestellt und diskutiert.

Neben der Aufarbeitung und Dokumentation des derzeitigen Wissensstandes sind die Auswertungen mechanischer Versuche an ETFE-Probekörpern Schwerpunkt der Arbeit. Grundlage bilden Messdaten aus Versuchen, die von einem Folienhersteller und einem Granulathersteller durchgeführt wurden, sowie aus Versuchen, die von einem Konfektionär aus Anlaß eines konkreten größeren Projektes bei einer Universität in Auftrag gegeben worden waren.

Die Auswertung monoaxialer und biaxialer Kurzeittests sowie Dynamisch-Thermisch-Mechanischer Analysen (DMA) bei unterschiedlichen Temperaturen und Dehngeschwindigkeiten zeigen ein nichtlineares viskoelastisches Werkstoffverhalten. Die für die Praxis wichtigen Kenngrößen E-Modul, Schubmodul und Querkontraktionszahl, sowie die für eine Bemessung erforderlichen Grenzwerte der Spannungen und Dehnungen (Kriechgrenze, Fließgrenze und Bruchgrenze) sind von der Temperatur, der Zeit und der Belastung abhängig. Die Auswertungen zeigen, dass sich eine Erhöhung der von der Zeit abhängigen Dehngeschwindigkeit auf die Spannungs-Dehnungs-Beziehung auswirkt, wie eine Absenkung der Temperatur.

Diese Eigenschaft von Polymeren ist als Zeit-Temperatur-Verschiebung (ZTV) bekannt. Mit Hilfe der Kurzzeitzugversuche und der DMA wurde die Größenordnung der ZTV erstmals für ETFE-Folien im baupraktischen Temperatur- und Dehngeschwindigkeitsbereich gezeigt.

Damit liefert die Arbeit wichtige Erkenntnisse für die Bemessung und den Nachweis von Tragelementen aus ETFE-Folie. Darüber hinaus beinhaltet sie Ansatzpunkte für weitere Werkstoffuntersuchungen zur Herleitung eines allgemeinen Werkstoffgesetzes und zur Aufstellung eines probabilistischen Bemessungskonzeptes für ETFE-Folien.

## **Abstract**

ETFE-foils have been used as an architectural element and load-bearing component in structural engineering for about 25 years. Since then, some hundred projects were built using this material, even though its load-carrying capacity has never been assessed and documented in its entirety.

The data evaluation of more than 200 ETFE projects shows the up to now realised forms, designs, uses and locations. Existing safety concepts as well as test methods applied in practice to ascertain the mechanical properties of ETFE-foils are introduced and discussed.

Besides processing and documenting the current level of knowledge, the present work contains own evaluation of ETFE foil material tests. The evaluation was based on tests that were carried out in the labs of foil and pellet manufacturers, as well as on tests that a membrane construction manufacturer commissioned to a university lab on the occasion of a project.

The presented results of mono-axial and bi-axial short-term tension tests as well as dynamic thermal mechanical analyses (DMA) executed at different temperatures and elongation rates show a non-linear viscoelastic behaviour of the investigated ETFE-specimen.

The characteristic parameters with most relevance for practice, like YOUNG's modulus, shear-modulus and POISSON's ratio, as well as the limit values of stresses and strains (creep limit, yield point and breaking point) are dependent on temperature, time and loading. There is evidence that an increasing strain-rate (as a time-dependent parameter) has the same effect on the material behaviour as a decrease of temperature. This phenomenon of polymers is known as time-temperature shift principle (tts). In present work, the time-temperature shift was shown by the short-term tension tests as well as the dynamic thermal mechanical analyses (DMA). It was applied to ETFE-foils for the first time.

With these findings, the work offers valuable clues to the mechanical behaviour of ETFE-foils and to its design as a structural element in practice. Further more, it yields starting points for other material investigations. This could ultimately lead to the development of a general material law and to the introduction of a probabilistic safety concept for ETFE foils.

## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Tragwerksplanung der Fakultät Architektur der TU München. Sie verknüpft meine praktischen Erfahrungen bei der Ausführung, Planung und Bemessung von Membrankonstruktionen mit den im Rahmen des Forschungsschwerpunktes *Form und Konstruktion von Tragwerken* am Lehrstuhl durchgeführten Untersuchungen und theoretischen Überlegungen.

In diesem Zusammenhang gilt mein ganz besonderer Dank meinem Doktorvater, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rainer Barthel, Ordinarius des Lehrstuhls für Tragwerksplanung. Er ermöglichte und unterstützte die Entstehung der Arbeit in jeder Hinsicht.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai Uwe Bletzinger, Ordinarius des Lehrstuhls für Statik der TU München, möchte ich für die Übernahme des Co-Referates sowie für die wertvollen Hinweise und Diskussionen herzlich danken.

Herrn Dr.-Ing. Matthias Jagfeld, Dr.-Ing. Kamran Saberi, Dipl.-Ing. Lars Schiemann und Dipl.-Ing. Johannes Linhard möchte ich herzlich für ihre Unterstützung bei Simulationen mit den FE-Programmen CARAT und ANSYS danken. Die Ergebnisse haben die vorliegende Arbeit enorm bereichert.

Dem Unternehmen COVERTEX möchte ich für seine umfassende Unterstützung meiner Arbeit, insbesondere für hilfreiche Werkstoffdaten und für die Anfertigung von Schweißnahtproben, danken.

Herrn Robert Hodann und Frau Helga Steurer möchte ich für die Bereitstellung von ETFE-Folien sowie für viele hilfreiche Daten, Diagramme und Informationen danken, die in diese Arbeit eingeflossen sind. Zudem ermöglichten sie mir die eigenhändige Durchführung von Versuchen im Prüflabor des Unternehmens NOWOFOL in Siegsdorf.

Herrn Stefan Friedrich danke ich für Informationen zur Granulatherstellung sowie für die Bereitstellung von Daten aus DMA-Versuchen im Labor des Unternehmens DYNEON zur Bestätigung der Zeit-Temperatur-Verschiebung des Werkstoffes ETFE.

Meinen Freunden und Fachkollegen Matthias Beckh, Maximilian Bauer, Rainer Büchel, Werner Fröhlich, Markus Hönnecke, Marc Jilge, Claudia Kraus, Dieter Linke, Christian Steigenberger und Walter Zettlitzer danke ich ebenfalls für hilfreiche Daten, die an verschiedenen Stellen in die Arbeit eingeflossen sind.

Mein besonderer Dank gilt jedoch meiner lieben Familie. Ohne Ihre Geduld und ihr großes Verständnis über einen langen Zeitraum wäre die vorliegende Arbeit nie entstanden.

Karsten Moritz

München, im Dezember 2007





---

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung und Zielsetzung</b> .....	<b>1-1</b>
1.1	Überblick .....	1-1
1.2	ETFE-Folien im Hochbau .....	1-2
1.3	Bauarten .....	1-3
1.3.1	Pneumatisch vorgespannte Systeme .....	1-3
1.3.2	Mechanisch vorgespannte Systeme .....	1-6
1.3.3	Sonderfälle .....	1-7
1.4	Formen .....	1-8
1.5	Auswertung von Daten gebauter Beispiele .....	1-10
1.6	Geschichtliche Entwicklung .....	1-13
1.6.1	Meilensteine pneumatisch vorgespannter Systeme .....	1-13
1.6.2	Meilensteine mechanisch vorgespannter Systeme .....	1-19
1.6.3	Stand der Technologie .....	1-21
1.7	Zielsetzung .....	1-23
<b>2</b>	<b>Stand des Wissens</b> .....	<b>2-1</b>
2.1	Mechanisches Verhalten .....	2-1
2.2	Mechanische Werkstoffprüfung .....	2-4
2.2.1	Herstellerangaben .....	2-5
2.2.1.1	TEFZEL <sup>®</sup> Fluorpolymer Resin – Properties Handbook, DuPONT <sup>®</sup> 2003 .....	2-5
2.2.1.2	HOECHST HIGH CHEM <sup>®</sup> - HOSTAFLON <sup>®</sup> ET 6235 Informationsblätter und Broschüren, HOECHST <sup>®</sup> , z.B. 1983, 1991 etc. ....	2-6
2.2.2	Weitere Prüfungen .....	2-7
2.2.2.1	Versuchsprogramm bei 23°C der Universität Duisburg-Essen (SAXE) 2002 .....	2-8
2.2.2.2	Versuchsprogramm der University of Bath (ANSELL) 1985 .....	2-11
2.2.2.3	Versuchsprogramm der TU Delft (DE VRIES) 2003 .....	2-20
2.2.2.4	Versuchsprogramm der D-SET Laboratories ("Arizona-Test") 1979 - 1989 .....	2-23
2.2.3	Versuchsergebnisse aus der Fachliteratur .....	2-26
2.3	Chemischer und struktureller Aufbau .....	2-29

<b>2.4</b>	<b>Einflüsse der Konfektion, der Konstruktion und der Umgebungsbedingungen</b> .....	<b>2-30</b>
2.4.1	Eigenschaftsveränderungen und Schädigungsprozesse .....	2-30
2.4.2	Irreversible Werkstoffveränderungen und Schädigungen .....	2-30
2.4.2.1	Mechanische Verstreckung .....	2-30
2.4.2.2	Versprödung .....	2-31
2.4.2.3	Pigmentierungen .....	2-32
2.4.2.4	Beschichtungen .....	2-32
2.4.2.5	Innere mechanische Beschädigungen .....	2-34
2.4.2.6	Äußere mechanische Beschädigungen .....	2-34
2.4.2.7	Lokale Dimensionsänderungen (Schweißnähte).....	2-34
2.4.2.8	Randverbindungen .....	2-37
2.4.2.9	Seil(netz)stützungen und seilnetzverstärkte Folien .....	2-39
<b>2.5</b>	<b>Bemessung</b> .....	<b>2-42</b>
2.5.1	Allgemeines .....	2-42
2.5.2	Bemessungskonzept der zulässigen Spannungen .....	2-43
2.5.3	Bemessungskonzept für Tragluftbauten (DIN 4134) .....	2-47
2.5.4	Bemessungskonzept auf der Basis von Abminderungsfaktoren (MINTE).....	2-49
2.5.5	Bemessungskonzepte für Bauteile aus Kunststoff (BÜV) .....	2-53
2.5.5.1	Regelverfahren .....	2-53
2.5.5.2	Anwendung des Regelverfahrens auf ETFE-Folien .....	2-55
2.5.5.3	Definitionen der Grenzzustände .....	2-58
2.5.5.4	Grenzen des Regelverfahrens .....	2-62
2.5.5.5	Bemessungsverfahren mit Ersatzbeanspruchung.....	2-63
2.5.6	Bemessungskonzept mit Temperaturstufen .....	2-67
2.5.7	Bemessungskonzept über Grenzdehnungen .....	2-69
<b>2.6</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>2-69</b>
<b>3</b>	<b>Chemischer und struktureller Aufbau, Herstellung, Verarbeitung</b> .....	<b>3-1</b>
<b>3.1</b>	<b>Fluorpolymerwerkstoffe</b> .....	<b>3-1</b>
3.1.1	Entwicklung .....	3-1
3.1.2	Anwendung .....	3-2
<b>3.2</b>	<b>Chemischer Aufbau</b> .....	<b>3-2</b>
3.2.1	Überblick und Begriffsdefinitionen .....	3-2
3.2.2	Monomereinheiten (Ethylen, Tetrafluorethylen) .....	3-5
3.2.3	Elemente (Fluor, Kohlenstoff, Wasserstoff).....	3-6

---

---

<b>3.3</b>	<b>Struktureller Aufbau</b> .....	<b>3-7</b>
3.3.1	Polymerarten (Thermoplaste, Duroplaste, Elastomere) .....	3-7
3.3.2	Amorphe und teilkristalline Thermoplaste .....	3-7
3.3.3	Zustandsbereiche (Aggregatzustände) .....	3-10
3.3.4	Bestimmung der Glasübergangstemperatur .....	3-11
3.3.5	Bestimmung der Schmelztemperatur .....	3-13
<b>3.4</b>	<b>Fertigungsprozess (Herstellung und Verarbeitung)</b> .....	<b>3-15</b>
3.4.1	Überblick .....	3-15
3.4.2	Polymerisation .....	3-16
3.4.3	Granulierung .....	3-17
3.4.4	Extrusion .....	3-18
3.4.4.1	Blasfolien und Flachfolien .....	3-19
3.4.4.2	Extruder .....	3-20
3.4.4.3	Formwerkzeug (Düse) .....	3-21
3.4.4.4	Walzenstuhl (Kalibrierung und Kühlung) .....	3-21
3.4.4.5	Abzug .....	3-22
3.4.4.6	Bahnfehler und Einflüsse auf die Folieneigenschaften .....	3-22
3.4.5	Konfektionierung .....	3-23
<b>3.5</b>	<b>Untersuchte Folien</b> .....	<b>3-23</b>
<b>4</b>	<b>Werkstoffprüfungen und FE-Simulationen</b> .....	<b>4-1</b>
<b>4.1</b>	<b>Aspekte der Werkstoffprüfung von ETFE-Folien</b> .....	<b>4-1</b>
4.1.1	Bemessungskennwerte .....	4-1
4.1.2	Einflussgrößen .....	4-2
4.1.3	Prüfmethoden .....	4-2
<b>4.2</b>	<b>Übersicht über die ausgewerteten Versuche</b> .....	<b>4-3</b>
<b>4.3</b>	<b>Monoaxiale Kurzzeitzugversuche</b> .....	<b>4-6</b>
4.3.1	Prüfverfahren nach DIN EN ISO 527 .....	4-6
4.3.2	Auswertung monoaxialer Kurzzeitzugversuche .....	4-12
4.3.3	Vergleichstests .....	4-21
4.3.4	FE-Simulationen zur Abschätzung des Einflusses der Probengeometrie .....	4-33
<b>4.4</b>	<b>Biaxiale Kurzzeitzugversuche</b> .....	<b>4-40</b>
4.4.1	Allgemeines .....	4-40
4.4.2	Aufbau und Auswertung der Versuche .....	4-41
4.4.3	Zyklische biaxiale Versuche bei verschiedenen Temperaturen .....	4-43
4.4.3.1	Versuchsbedingungen .....	4-43

---

4.4.3.2	Versuchsauswertung .....	4-46
4.4.3.3	Darstellung und Interpretation der Ergebnisse .....	4-56
4.4.4	Zyklische biaxiale Versuche bei verschiedenen Prüfgeschwindigkeiten .....	4-70
4.4.4.1	Versuchsbedingungen.....	4-70
4.4.4.2	Versuchsauswertung .....	4-71
4.4.4.3	Bestimmung eines Zeit-Temperatur-Verschiebungsfaktors .....	4-74
<b>4.5</b>	<b>Dynamisch-Thermisch-Mechanische Analyse (DMA)</b> .....	<b>4-76</b>
4.5.1	Allgemeines .....	4-76
4.5.2	Versuchsauswertung und Interpretation der Ergebnisse .....	4-76
4.5.3	Beispielrechnung .....	4-80
<b>4.6</b>	<b>Berstversuche</b> .....	<b>4-81</b>
4.6.1	Berstversuche an 1:1 Modellen.....	4-81
4.6.2	Berstversuch 3,0 x 5,8 m.....	4-82
4.6.3	FE-Vergleichsrechnung mit CARAT .....	4-84
4.6.4	FE-Vergleichsrechnung mit ANSYS .....	4-126
4.6.5	Berstversuche an kleinmaßstäblichen Modellen (Laborversuche).....	4-135
<b>4.7</b>	<b>Prüfung des Weiterreißwiderstandes</b> .....	<b>4-137</b>
4.7.1	Weiterreißversuche nach DIN 53363 .....	4-137
4.7.2	Weiterreißversuche nach DIN 53515 .....	4-138
<b>4.8</b>	<b>Prüfung der Durchsturzsicherheit</b> .....	<b>4-140</b>
<b>4.9</b>	<b>Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse</b> .....	<b>4-142</b>
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	<b>5-1</b>
5.1	Zusammenfassung.....	5-1
5.2	Ausblick .....	5-3
<b>Literatur- und Normenverzeichnis</b> .....	<b>L/N 1 – L/N 14</b>	

## Anhang

<b>A</b>	<b>Projektdokumentation</b> .....	<b>A 1 – A 62</b>
<b>B</b>	<b>Monoaxiale Kurzzeitzugversuche - Diagramme</b> .....	<b>B 1 – B 06</b>
<b>C</b>	<b>Grundlagen der Statistik</b> .....	<b>C 1 – C 12</b>
<b>D</b>	<b>Grundlagen der Werkstoffmechanik</b> .....	<b>D 1 – D 42</b>

## 1 Einführung und Zielsetzung

### 1.1 Überblick

In keinem anderen Bereich des Bauwesens sind die Disziplinen Architektur und Bauingenieurwesen so eng miteinander verknüpft, wie im Membranbau. Bei den flächenhaften und ausschließlich auf Zug beanspruchten Gebilden sind der Kraftverlauf und die entstehende Form unabdingbar miteinander gekoppelt. Dies bedeutet eine besondere Herausforderung für den entwerfenden Tragwerksplaner.

Das Ziel besteht in der Erschaffung einer sicheren, dauerhaften und der Aufgabe angemessenen Konstruktion. Die Einheit von Tragwerk, Form und dem erzielten Raum ist dabei von zentraler Bedeutung. Das Erreichen dieses Zieles mit neuen Werkstoffen (z.B. Kunststoffen und Verbundwerkstoffen), mit filigranen Tragwerken und Details, mit bauphysikalisch wirksamen (ggf. mehrschichtigen) Systemen, mit ressourcenschonenden Bauweisen oder auch mit anpassungsfähigen oder wandelbaren Konstruktionen ist die derzeitige Herausforderung für den Tragwerksplaner. Die vergleichsweise junge Technologie der ETFE-Folienkonstruktionen eröffnet diesbezüglich neue Möglichkeiten.

ETFE, genauer E/TFE, ist die Kurzform für den thermoplastisch verarbeitbaren Fluorpolymerwerkstoff Ethylen/Tetrafluorethylen-Copolymer. Die hieraus hergestellte Folie wurde im Bauwesen ab den frühen 80er Jahren verwendet. Zunächst diente sie als Eindeckung von temporären oder untergeordneten Bauteilen oder Bauwerken, wie Gewächshäusern oder als Hülle für Solarkollektoren. Kurze Zeit später wurde sie beispielsweise in Form großflächiger ETFE-Dachelemente für dauerhafte botanische Gärten, zoologische Anlagen, Schwimmbäder, Atrien, Hofüberdachungen und schließlich auch für Stadionüberdachungen verwendet. Als erstes Großprojekt mit ETFE-Folie gilt die Mangrovenhalle im Burgers Park von Arnheim. Sie wurde im Jahr 1982 fertig gestellt und hat sich bis heute als dauerhaft erwiesen.

In den letzten zwei Jahrzehnten kamen die transparent ausbildbaren ETFE-Folien zunehmend auch als tragendes Bauelement in der Gebäudehülle zum Einsatz. Entsprechend DIN 1055-100: 2001-03 (s. Normenverzeichnis [N1]) versteht man unter einem Gebäude eine selbständig benutzbare, überdeckte, bauliche Anlage, die von Menschen betreten werden kann und die geeignet oder bestimmt ist, dem Schutz von Menschen, Tieren oder Sachen zu dienen. Als Teil der Gebäudehülle müssen Bauteile aus ETFE-Folie neben dem Lastabtrag komplexe Funktionen übernehmen, beispielsweise in Bezug auf die Bauphysik, die Bauklimatik und den Brandschutz. Heute gibt es weltweit mehrere hundert realisierte Projekte bei denen ETFE-Folien in diesem Spektrum eingesetzt wurden (s. chronologische Projektdokumentation in Anhang A). Ihre Anzahl wächst zunehmend.

Die realisierbare Spannweite von unverstärkten und ungestützten ETFE-Folienkonstruktionen kann je nach Konstruktion, Anwendungsgebiet und Belastung etwa 4,5 m bei pneumatisch vorgespannten und etwa 1,5 m bei mechanisch vorgespannten Konstruktionen betragen. Diese Dimensionen sind in Relation zu Membrantragwerken aus Gewebe gering. Konstruktionen aus ETFE-Folie werden den leichten Flächentragwerken zugeordnet, da sie trotz der geringen Spannweite im Vergleich mit konventionellen Tragwerken extrem leicht sind.

Zerlegt man das an der Lastabtragung beteiligte Gesamttragwerk in ein Primär- und ein Sekundärtragwerk, so bildet die Folie den letztgenannten Tragwerksteil, d.h. sie benötigt zu ihrer eigenen Standsicherheit das Primärtragwerk, aber nicht umgekehrt. Die Folie dient damit zwar nicht der Gebäudeaussteifung oder der Bauteilstabilisierung, ist aber ein Last übertragendes Element und somit statisch und ggf. dynamisch zu bemessen. Dies bedeutet nicht, dass Folien grundsätzlich keine aussteifende Wirkung haben können, sondern, dass diese Wirkung infolge von Unsicherheiten über ihre Tragfähigkeit bislang nicht rechnerisch angesetzt wurden.

Die Kenntnis der mechanischen Eigenschaften von ETFE-Folien bildet nicht nur in Bezug auf die Einschätzung der Tragfähigkeit und des Tragverhaltens der daraus gebildeten Konstruktionen den Schlüssel, sondern auch im Hinblick auf etliche bauphysikalische, akustische und optische Fragestellungen. Beispielsweise wird die Foliensteifigkeit unter Last für eine sichere Berechnung des Schalldämmmaßes benötigt. Ungeeignete Steifigkeiten, übermäßige Temperaturdehnungen oder unerwünschte Faltenbildung können das Erreichen von Zielsetzungen verhindern, denkt man beispielsweise an derzeit anstehende Entwicklungen von bauphysikalisch wirksamen mehrschichtigen Folienverbundwerkstoffen, an Folienlamine für Solarzellen-Membranen oder an die zur Spannweitenvergrößerung bereits angedachten seilnetzverstärkten Folien.

### 1.2 ETFE-Folien im Hochbau

ETFE-Folien sind extrem leicht. Die z. Z. mit einer Dicke von 0,3 mm (300 µm) dickste herstellbare ETFE-Folie hat ein Flächengewicht von 528 g/m<sup>2</sup>. Sie ist transparent herstellbar, was in Kombination mit dem geringen Flächengewicht vorteilhaft gegenüber Glaskonstruktionen und auch gegenüber kunststoffbeschichteten, transluzenten (durchscheinenden, aber nicht durchsichtigen) Geweben ist. Die Folie lässt neben dem sichtbaren Spektrum auch einen Großteil der ultravioletten Strahlung passieren. Ihre UV-Absorption ist in Teilbereichen des Spektrums sehr gering, so dass sie im Gegensatz zu den meisten anderen transparenten Kunststoffen über Jahrzehnte UV-beständig ist. Die Durchlässigkeit eines dreilagigen Folienkissens ist im ultravioletten Strahlungsspektrum sogar höher, als die einer Mehrscheibenverglasung, was zu deutlich besseren Wachstumsbedingungen für Pflanzen und Tiere führt. Deshalb werden ETFE-Folien zunehmend eingesetzt für zoologische Anlagen und Palmengärten (z.B. Raubtierhaus im Tierpark Hellabrunn in München, 1995, "Eden Project" in St. Austell/GB, 2000, "Masoola Regenwald" im Zoo Zürich, 2002) für Schwimmbäder (Warmbad "Prienavera" in Prien/Chiemsee, 1999, "Moby Dick", in Rülzheim, 2000, "Triamare" in Bad Neustadt/Saale, 2001 etc.) sowie als Tribünenüberdachung bei Stadien mit Rasenspielfeld (Allianz Arena, München, 2005, AWD Arena (früher Niedersachsenstadion), Hannover, 2005).

In Verbindung mit der UV-Resistenz führt ihr großer Widerstand gegenüber Witterungseinflüssen und biologischen und chemischen Einwirkungen unter europäischen Klimabedingungen und normalen Umweltbedingungen zu einer derzeit geschätzten Lebenserwartung von mindestens 25 Jahren. ETFE-Folien sind nach ihrer Nutzung in gereinigter Form wieder in die Produktion neuer Folien rückführbar, so dass man von einem nahezu vollständigen Recycling sprechen kann [74].

Ebenso wie beim verwandten Fluorpolymer Polytetrafluorethylen (PTFE) - bekannt unter dem Handelsnamen "Teflon" – hat ETFE-Folie eine niederenergetische

(unpolare) Oberfläche, was zu einem günstigen Anschmutzverhalten ohne die Erfordernis einer speziellen Reinigung führt.

ETFE-Folien sind duktil. Sie haben eine sehr hohe Weiterreißfestigkeit nach DIN 53363. Beschädigungen, z.B. Schnitte oder Löcher, führen nicht - wie bei Geweben - zu einer schnellen Rissausbreitung unter Last. Im Fall von Versagen oder Beschädigung droht kein Herabfallen schwerer oder gefährlicher Bauteile. Für viele Regionen wird eine ausreichende Beständigkeit gegenüber simuliertem Hagelschlag nach der Schweizer Norm SIA 280 erreicht.

Das Brandverhalten der ETFE-Folie ermöglicht viele Anwendungen im Bauwesen. Die Folie ist als schwerentflammbarer Baustoff in die Brandklasse DIN 4102-B1 eingestuft. Sie öffnet sich über heißen Brandgasen durch Aufschmelzen, ist selbst verlöschend und gilt nach o.g. DIN als nicht brennend abtropfend. Ihre Brandlast ist aufgrund der geringen Foliendicke und Masse extrem klein.

Lediglich die Schalldämmung und die Wärmedämmung von ein- und auch mehrlagigen Systemen sind derzeit noch nicht zufrieden stellend. Hier ist Forschungs- und Entwicklungsarbeit zu leisten, bevor ETFE-Folienkonstruktionen die diesbezüglichen Anforderungen für konventionelle Gebäude erfüllen können.

### **1.3 Bauarten**

Membrankonstruktionen können in die zwei grundsätzlichen Bauarten der pneumatisch und der mechanisch vorgespannten Konstruktionen unterteilt werden. Sie unterscheiden sich in ihrem Erscheinungsbild, ihrem Tragverhalten, in den Versagensmechanismen und auch in den damit zusammenhängenden Sicherheitsbetrachtungen.

#### **1.3.1 Pneumatisch vorgespannte Systeme**

Der Begriff "Pneu" hat seinen Ursprung in dem griechischen Wort "Pneuma" (Wind, Hauch). In der Architektur verwendet man ihn heute beispielsweise für die "pneumatischen Konstruktionen" oder für die "Pneubauweise". Pneus sind Bauelemente, die - in Relation zum Umgebungsdruck - durch einen Über- oder Unterdruck eines eingeschlossenen Luftvolumens stabilisiert werden. Mit einer elastischen Membran als Hülle sind pneumatische Konstruktionen in der Lage, Lasten in eine Unterkonstruktion, in ein Primärtragwerk oder direkt in die Fundamente weiterzuleiten. Sie werden gemeinhin unterteilt in die drei Kategorien der Schlauchkonstruktionen, der Traglufthallen und der Pneukissen (s. Abb. 1.1).

Für pneumatisch gestützte ETFE-Folienkonstruktionen im Außenbereich kommt aufgrund der - in Relation zu Geweben - geringen Festigkeit derzeit ausschließlich die Anwendung als Pneukissen nach Abb. 1.1 c bzw. d in Betracht. Schlauchkonstruktionen nach Abb. 1.1 a - in Form von Balken, Stützen oder Bögen - werden bislang nicht mit ETFE Folie ausgeführt, da diese Elemente für eine im Bauwesen angemessene Tragfähigkeit einen hohen Innendruck benötigen, etwa 50.000 Pa (0,5 bar). Man nennt die Schlauchkonstruktionen daher auch Hochdrucksysteme. Die Anwendung von ETFE-Folien für derartige Systeme wäre allerdings mit einer engmaschigen Seilnetzummantelung vorstellbar.

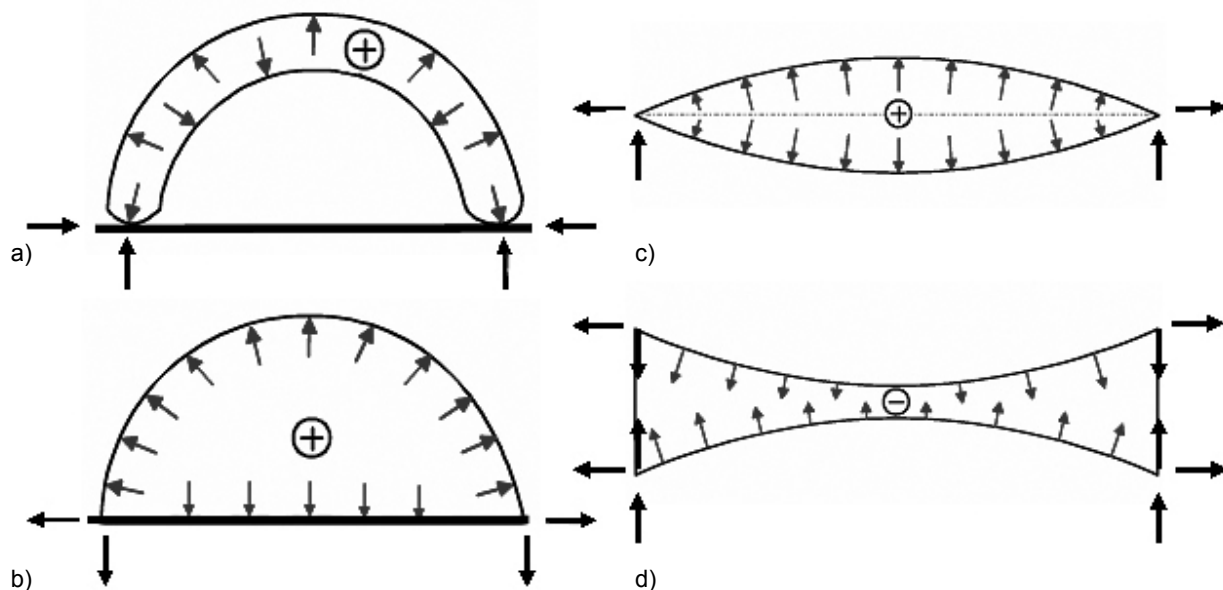


Abb. 1.1 Pneumatisch vorgespannte Systeme: a) Schlauchkonstruktionen, b) Traglufthallen, c) Pnekissen (Überdruck) und d) Pnekissen (Unterdruck); + = Überdruck; - = Unterdruck) [228], s. hierzu auch HERZOG 1976 [74]

Das Schweizer Unternehmen AIRLIGHT Ltd. hat diese Idee bereits unter der Produktbezeichnung TENSAIRITY<sup>®</sup> entwickelt und gemeinsam mit dem Schweizer Büro BLUE OFFICE ARCHITECTURE mehrere Studien unter Verwendung dieses Produktes ausgearbeitet. Abb. 1.2 zeigt zwei dieser Projektstudien: "Restaurant Chateau de Pentes" in Genf (a), Grundfläche 200 m<sup>2</sup>, Spannweite der seilnetzummantelten Folienschläuche 10 m, sowie "Villa Erba" in Como (b), Grundfläche 4.500 m<sup>2</sup>, Spannweite 27 m.



a)

b)

Abb. 1.2 Seilnetzummantelte Folienschläuche (TENSAIRITY<sup>®</sup>): a) "Restaurant Chateau de Pentes", Genf; b) "Villa Erba", Como; Projektstudien AIRLIGHT Ltd. und BLUE OFFICE ARCHITECTURE (CH), 2003 [203]



Als Traglufthalle nach Abb. 1.1 b wird ein Hallentyp bezeichnet, bei dem der gesamte Innenraum einen Überdruck zum atmosphärischen Außendruck aufweist. Hierdurch wird die Hülle gestützt, so dass bei dieser Bauweise auf eine Primärkonstruktion verzichtet werden kann. Die Lasten werden direkt in die Fundamente eingeleitet. Die Nutzer einer Traglufthalle bewegen sich im Innenraum in einem geringfügig erhöhten Umgebungsdruck von etwa 300 bis 1.000 Pa. Dennoch wären ETFE-Folien aufgrund der großen Hallenspannweiten auch für diese Kategorie pneumatischer Konstruktionen nur mit einer Seilnetzverstärkung realisierbar.

Die Berechnung, die Ausführung und der Betrieb von Traglufthallen werden in Deutschland nach DIN 4134: 02-1983 [N6] geregelt. Im weiteren Sinne können auch weit gespannte, luftgestützte Dächer (air supported structures) den Traglufthallen zugeordnet werden. Auch bei diesen Konstruktionen wird der gesamte Innenraum unter Überdruck gesetzt. Etliche große Sportarenen dieser Bauart sind in den 70er bis 90er Jahren vor allem in den USA und in Japan entstanden. Desgleichen gilt für die so genannten Radome, also kugelförmige Gebilde, die ebenfalls luftgestützt sind und einen Parabolspiegel umhüllen.

Alle diese Bauarten werden bislang mit PVC-beschichteten Polyestergeweben oder mit Glasfasergeweben mit unterschiedlichen Beschichtungen (z. B. Silikon oder PTFE) bzw. Gummierungen realisiert.

Pneukissen bestehen aus mindestens zwei Membranlagen, die durch einen geringen Überdruck (s. Abb. 1.1 c) oder Unterdruck (s. Abb. 1.1 d) des eingeschlossenen Luftvolumens pneumatisch vorgespannt und stabilisiert werden. ETFE-Folie ist derzeit das am häufigsten eingesetzte Material dieser Bauweise. Die durch Gebläse erzeugte Druckdifferenz zum Umgebungsdruck beträgt etwa der von Traglufthallen (ca. 300 bis 1.000 Pa). Die Vorspannung der Pneu-Membranen ist über den eingestellten Gebläsedruck regelbar, und kann so an die Einwirkungen angepasst werden. Der Gebläsedruck bleibt innerhalb des ebenfalls regelbaren Toleranzbereiches nahezu konstant. Die Maximalleistung des Gebläses bestimmt den maximalen Stützdruck.

Man ist bemüht, den Gebläsedruck so hoch wie statisch erforderlich, jedoch so niedrig wie möglich einzustellen, so dass Kriechverformungen und damit verbundene Geometrieänderungen (Stichzunahmen) der Folien möglichst gering bleiben. Deshalb wird er nur dann hochgefahren, wenn Wind- oder Schneelasten dies erfordern. Falls Kriechverformungen dennoch auftreten, werden die bei mechanisch vorgespannten Systemen zwangsläufig einhergehenden Vorspannungsverluste, bei einer pneumatischen Vorspannung automatisch ausgeglichen.

Bei Pneukissen aus ETFE können Kriechverformungen zu einer Stichzunahme führen. Dann nimmt die Krümmung im Laufe der Zeit etwas zu, die Foliendicke und die Vorspannung nehmen etwas ab. Im Regelfall wird das Vorspannungsniveau jedoch so niedrig gewählt, dass ein derartiger Prozess langfristig zu vernachlässigbaren Verformungen führt.

Durch den Überdruck im Pneukissen entsteht in weiten Bereichen eine synklastische, also in beiden Hauptkrümmungsrichtungen gleichsinnig gekrümmte Oberfläche. Die GAUSS'sche Krümmung beträgt in allen Punkten dieser Fläche  $k > 0$ . Nur in den Ecken können lokal antiklastische, also gegensinnig gekrümmte Bereiche mit  $k < 0$  auftreten. Solche Eckbereiche lassen sich jedoch durch einen geeigneten Zuschnitt der zusammengeschweißten Folienbahnen oftmals vermeiden.

In vielen Fällen ist die Anzahl der Folienlagen entscheidend für das Tragverhalten des Systems. Die folgende Ausführung soll dies verdeutlichen:

Ebene Mittellage: Dreilagige Folienpneus werden häufig mit einer dünneren, eben gespannten, Mittellage ausgeführt. Diese dient der Teilung der eingeschlossenen Luft in zwei (i.d.R. gekoppelte) Volumina und somit der Verbesserung der Wärmedämmung. Um die Mittellage faltenfrei zu halten, wird sie üblicherweise mit einer geringen Vorspannung ( $v_{0, m} \cong 0,1 \text{ kN/m}$ ) versehen. Die aus der Mittellage resultierenden Auflagerreaktionen sind im Vergleich zu denen der äußeren Folien gering, werden aber bei der Bemessung des Primärsystems im Normalfall berücksichtigt. Die Rückstellkraft der Mittellage wird i.d.R. nicht rechnerisch genutzt. Schnee- oder Wassersacklasten können bei Ausfall der Luftzufuhr (Betriebsstörung) zu plastischen Verformungen einer derartigen Mittellage führen. Das Risiko des als Gebrauchstauglichkeitskriterium einzuordnenden Falles wird i.d.R. durch eine redundante Luftversorgung (z.B. Notstromversorgung und Reservegebläse) minimiert.

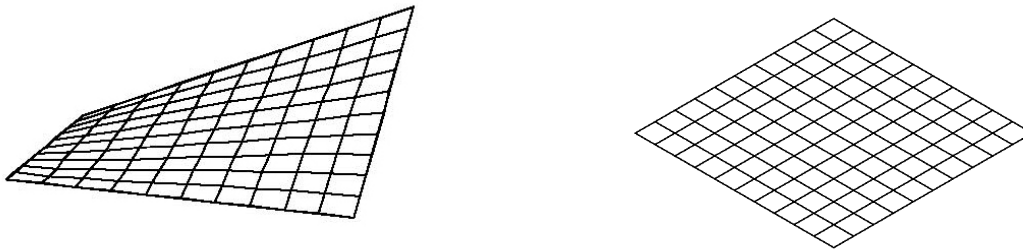
Gekrümmte Mittellage: Zunehmend werden auch dreilagige ETFE-Foliensysteme mit einer Mittellage versehen, die einen Zuschnitt erhält und eine synklastische Krümmung aufweist. Die beiden in diesem Fall entkoppelten Volumina werden mit unterschiedlichen Drücken gespeist, um die Mittellage zu stabilisieren. Bei aufeinander abgestimmten Bedruckungen der Mittellage (positiv) und einer der beiden äußeren Lagen (negativ), lässt sich durch die Steuerung der beiden Drücke die Lichtdurchlässigkeit des Pneus regeln. Solche Systeme bringen aber auch Vorteile für die Lastabtragung: Zum einen kann eine nach außen gekrümmte Mittellage einen Teil der häufig bemessungsrelevanten Windsogbelastung abtragen, was die äußere Folienlage entlastet bzw. die mögliche Spannweite des Pneus vergrößert. Zum anderen wird im Fall einer Schnee- oder Wasserlast bei Betriebsstörung (z.B. Ausfall der Luftzufuhr) eine gekrümmte Mittellage nicht so schnell überdehnt, wie eine ebene.

Da das Verschweißen von ETFE-Folien mit steigender Anzahl der Lagen schwieriger wird, wurden bislang vorwiegend Pneus mit maximal drei Folienlagen eingesetzt. Die Hülle des Masoala Regenwaldes in Zürich ist eines der ersten Projekte, bei denen eine vierte Folienlage eingesetzt wurde. Diese dient als zusätzliche Hagelschutzschicht (System "COVERTEX - Membrane Plus"). Sie wurde jedoch nicht mit den anderen Lagen verschweißt, sondern mit einem zweiten Profil auf dem Standard-Klemmprofil befestigt.

### 1.3.2 Mechanisch vorgespannte Systeme

Einlagige Folienmembranen werden durch ihren verkürzten Einbau in eine feste Umrandung mechanisch vorgespannt. Sie bilden im Vorspannungszustand eine antiklastische, also in beiden Hauptkrümmungsrichtungen gegensinnig gekrümmte Oberfläche mit einer GAUSS'schen Krümmung  $k < 0$  in allen Flächenpunkten (s. Abb. 1.3 a). Aus Relaxationsprozessen resultierende Vorspannungsverluste können bei mechanisch vorgespannten Systemen nur durch eine Nachspannvorrichtung ausgeglichen werden.

Ein Grenzfall dieser Bauart ist die ebene Membranfläche (s. Abb. 1.3 b). Die beiden Hauptkrümmungskreisradien sind hier in jedem Flächenpunkt unendlich, wodurch die GAUSS'sche Krümmung  $k$  null ist. Eine ebene Fläche kann ausschließlich durch mechanische Vorspannung erzeugt werden. Unter äußeren Lasten verformt sich die ebene Fläche in Abhängigkeit ihrer Steifigkeit, so dass sie unter relativ großen Verformungen ebenfalls in der Lage ist, Lasten zu übertragen. Ihre GAUSS'sche Krümmung  $k$  ist unter Last ungleich null.



a) b)  
Abb. 1.3 Mechanisch vorgespannte Systeme: a) antiklastische Membran; b) Grenzfall ebene Membran

### 1.3.3 Sonderfälle

Einachsig gekrümmte Membranflächen, wie beispielsweise die Mantelfläche eines Zylinders (s. Abb. 1.5 a) oder eines Kegels (s. Abb. 1.5 b), sind Zwitter beider Bauarten. Wie das Beispiel in Abb. 1.4 zeigt, kann der Zylindermantel ohne Einschnürungen mittels mechanischer Vorspannung erzeugt werden. Hierzu muss das Vorspannungsverhältnis der beiden Hauptspannungsrichtungen der Querkontraktionszahl entsprechen. Dies wird mit einem entsprechenden Zuschnitt erreicht.

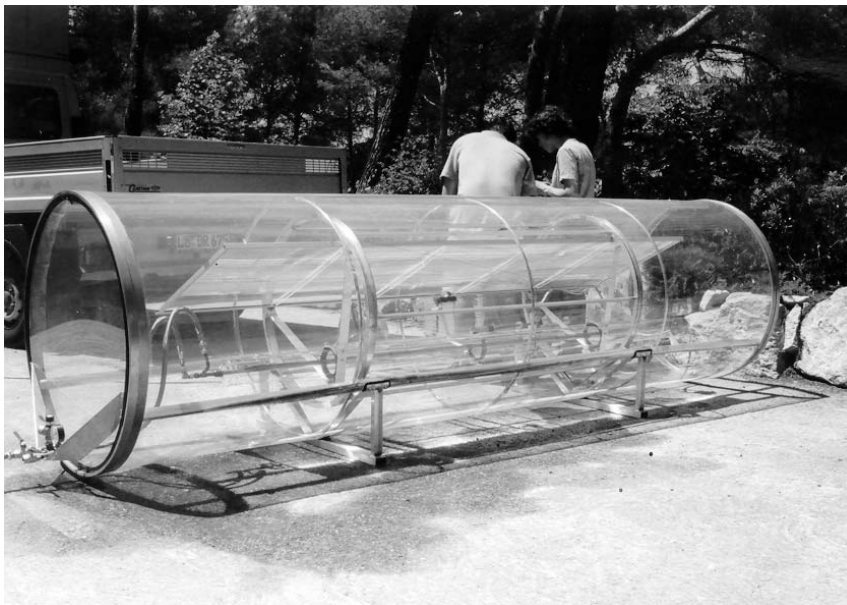
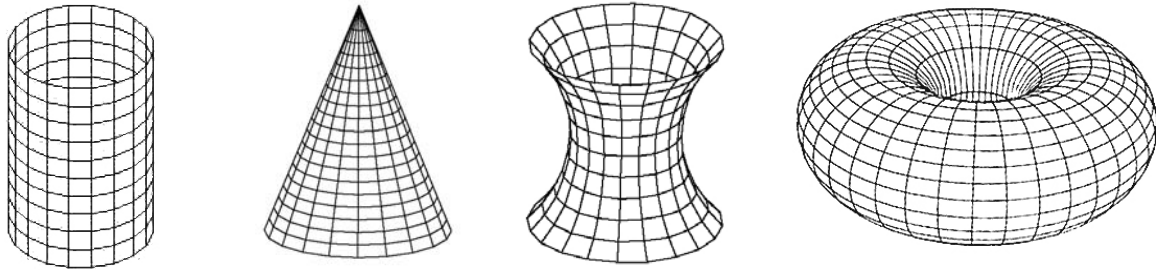


Abb. 1.4  
Mechanisch vorgespannter Zylindermantel aus ETFE-Folie ( $k = 0$ ), Bomin Solar Research (BSR), Lörrach, 2000, Foto: D. LINKE

Ist die angestrebte Pneumform ein Torus (s. Abb. 1.5 d), bildet die innere Halbschale eine antiklastische Fläche ( $k < 0$ ) und die äußere Halbschale eine synklastische Fläche ( $k > 0$ ). Der Scheitelkreis und der Basiskreis trennen die beiden Bereiche. Alle Punkte auf diesen beiden Kreisen haben die GAUSS'sche Krümmung Null.

Antiklastische Flächen, die sowohl mechanisch, als auch pneumatisch erzeugt werden können, wie das Hyperboloid oder auch die innere Halbschale des Torus, sind nicht selten, denkt man beispielsweise an Pnekissen, die zwischen zwei Bogenbindern eines Daches angeordnet sind. Bei derartigen Systemen nimmt die untere Folie generell eine antiklastische Form ein, welche in Abhängigkeit von der Krümmung der Bögen mit großen Folienkrümmungen, d.h. mit kleinen Krümmungskreisradien, verbunden sein kann. Bei

Lasten, die nach unten gerichtet sind, wird eine Hauptkrümmungsrichtung dieser Fläche belastet, und die andere entlastet. Dadurch besteht eine aus der Geometrie bedingte Faltenanfälligkeit während der unterschiedlichen Beanspruchungssituationen, welche im Extremfall mit monoaxialen Spannungszuständen einhergehen kann.



a) b) c) d)

Abb. 1.5 Mechanisch und/oder pneumatisch vorgespannte Systeme:  
a) Zylinder, b) Kegel, c) Hyperboloid und d) Torus

Unter Berücksichtigung der beiden Vorspannungsarten, der bislang ausgeführten ein- bis dreilagigen Systeme sowie der Krümmung der Mittellage, ergeben sich sechs Bauarten:

#### Pneumatisch vorgespannte Konstruktionen

- einlagig (Einkammerpneu mit starrem Boden, Traglufthalle)
- zweilagig (Einkammerpneu)
- dreilagig (Doppelkammerpneu mit zwei gleichen Innendrücken, mechanisch vorgespannte Mittellage)
- dreilagig (Doppelkammerpneu mit zwei differenten Innendrücken, pneumatisch vorgespannte Mittellage)

#### mechanisch vorgespannte Konstruktionen

- einlagig, eben
- einlagig, antiklastisch gekrümmt

### 1.4 Formen

Die realisierten Projekte (s. Anhang A) zeigen eine begrenzte Formenvielfalt. In der Ebene gibt es sechs grundlegende Randgeometrien, die miteinander kombiniert bzw. symmetrisch oder unsymmetrisch ausgeführt werden können (s. Abb. 1.6).

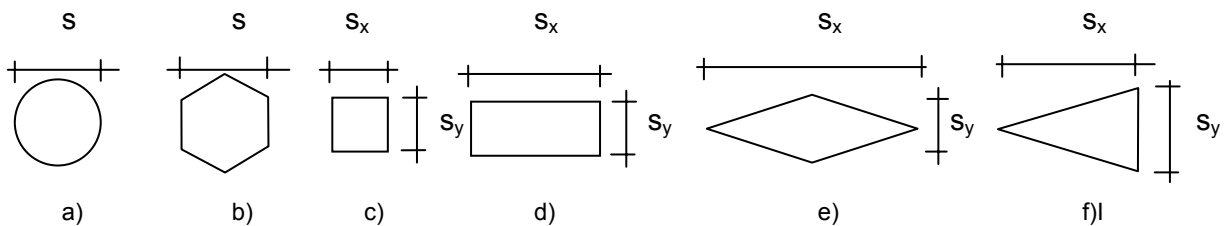


Abb. 1.6 Differenzierung von Konstruktionen aus ETFE-Folien nach der Randgeometrie, Einteilung in sechs Geometrien: a) Kreis (Ellipse), b) Polygon, c) Quadrat, d) Rechteck, e) Raute, f) Dreieck (Trapez)

Der Rand kann in der Ebene oder im Raum gekrümmt (polygonal) ausgeführt werden. Mit den beiden Vorspannungsarten (mechanisch, pneumatisch) und den sechs grundlegenden Randgeometrien (Kreis, Quadrat, ...) ergibt sich für die einzelne Folienlage eine morphologische Matrix aus vierundzwanzig Grundformen (s. Abb. 1.7).

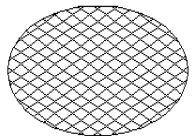
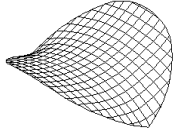
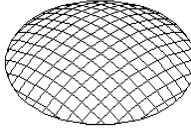
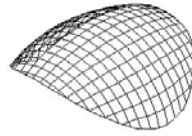
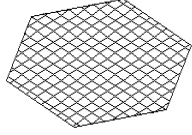
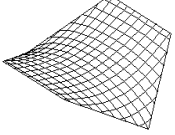
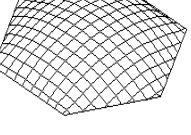
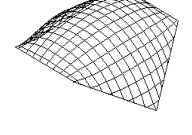
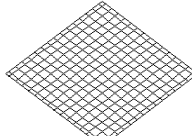
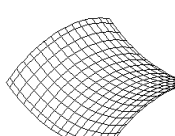
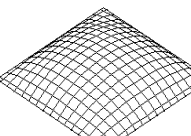
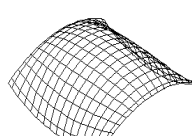
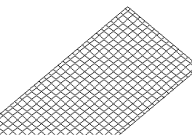
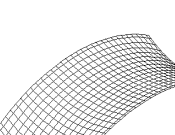
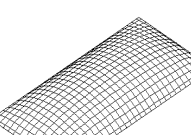
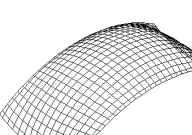
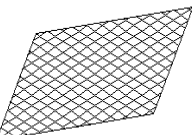
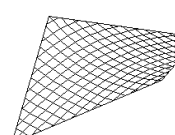
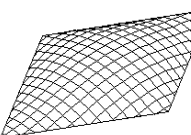
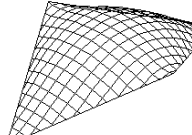
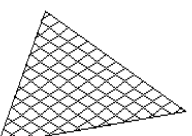
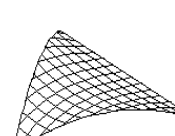
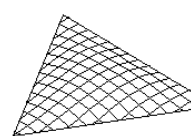
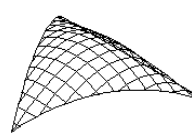
	Bauart mechanisch vorgespannt		Bauart pneumatisch vorgespannt	
	A Rand in der Ebene	B Rand räumlich gekrümmt	C Rand in der Ebene	D Rand räumlich gekrümmt
I Kreis/Ellipse				
II Polygon				
III Quadrat				
IV Rechteck				
V Raute				
VI Dreieck				

Abb. 1.7 Matrix der 24 Grundformen für Membranflächen aus ETFE-Folie

### 1.5 Auswertung von Daten gebauter Beispiele

Anhang A beinhaltet die Dokumentation von über 200 ETFE-Folienkonstruktionen, die in den Jahren 1980 bis 2006 gebaut wurden. Vermutlich existieren weit mehr realisierte Objekte, die aufgrund z.T. geringer Größe oder Bedeutung nicht dokumentiert sind.

Die aufgeführten Projekte wurden im Hinblick auf die folgenden Kategorien zahlenmäßig ausgewertet:

- Größenkategorien (s. Abb. 1.8)
- Projektstandort (s. Abb. 1.9)
- Nutzung und Bauteilanwendung (s. Abb. 1.10)
- Grundrissgeometrie und Bauart (s. Abb. 1.11)

Da nicht alle gebauten Objekte erfasst wurden, stellen die Diagramme lediglich eine prozentuale Abschätzung der derzeitigen Situation dar. Die Prozentangaben beziehen sich auf die Projektanzahl und nicht auf den flächenbezogenen Anteil.

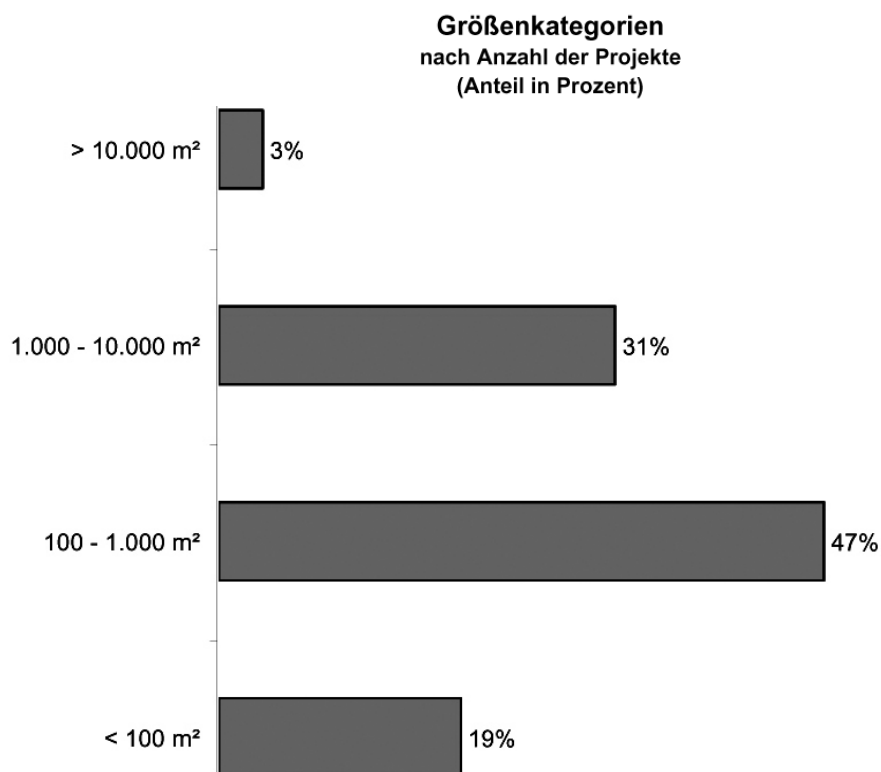


Abb. 1.8 Größenkategorien, bezogen auf die projizierte Grundfläche (nach Anzahl der Projekte, Anteil in Prozent): bis 100 m<sup>2</sup>, 100 bis 1.000 m<sup>2</sup>, 1.000 bis 10.000 m<sup>2</sup>, über 10.000 m<sup>2</sup>

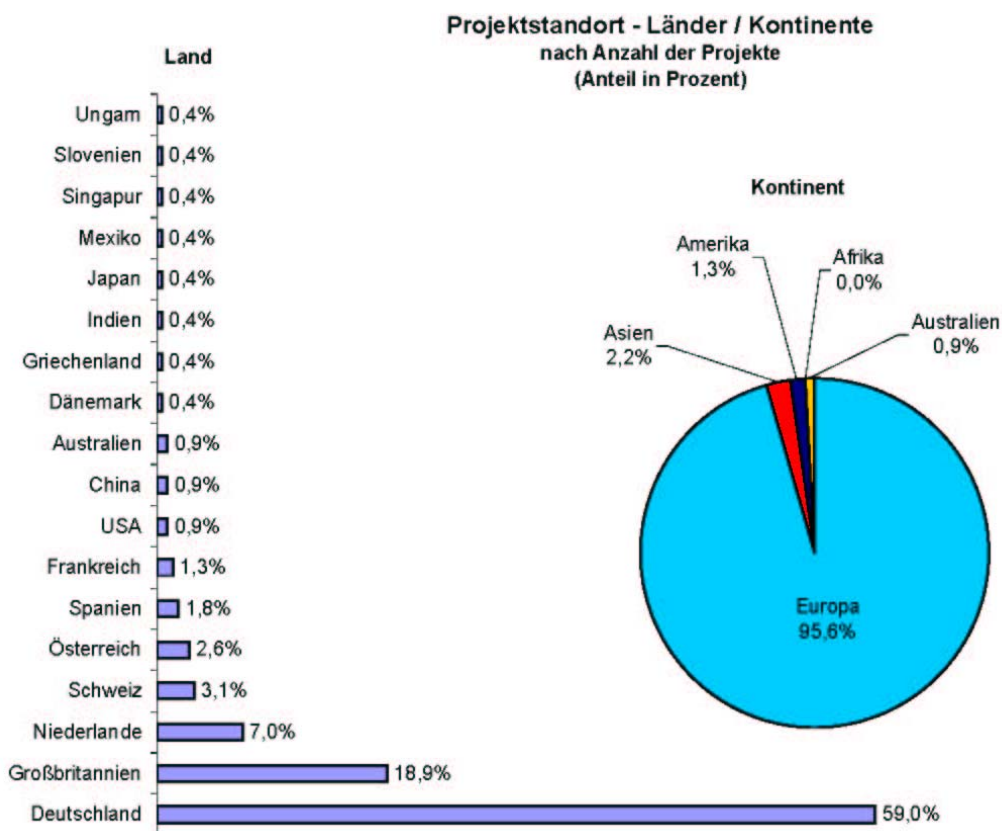


Abb. 1.9 Projektstandort nach Ländern und Kontinenten (nach Anzahl der Projekte, Anteil in Prozent)

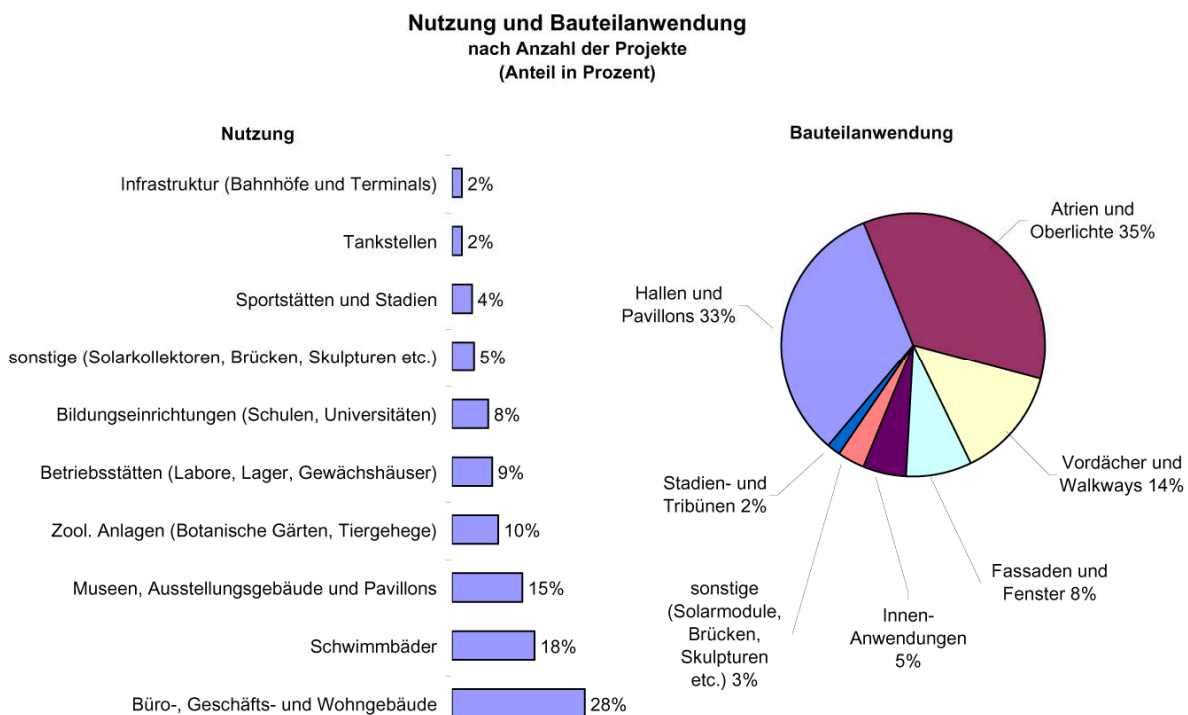


Abb. 1.10 Nutzung und Bauteilanwendung (nach Anzahl der Projekte, Anteil in Prozent)

### Grundrissgeometrie und Bauart nach Anzahl der Projekte (Anteil in Prozent)

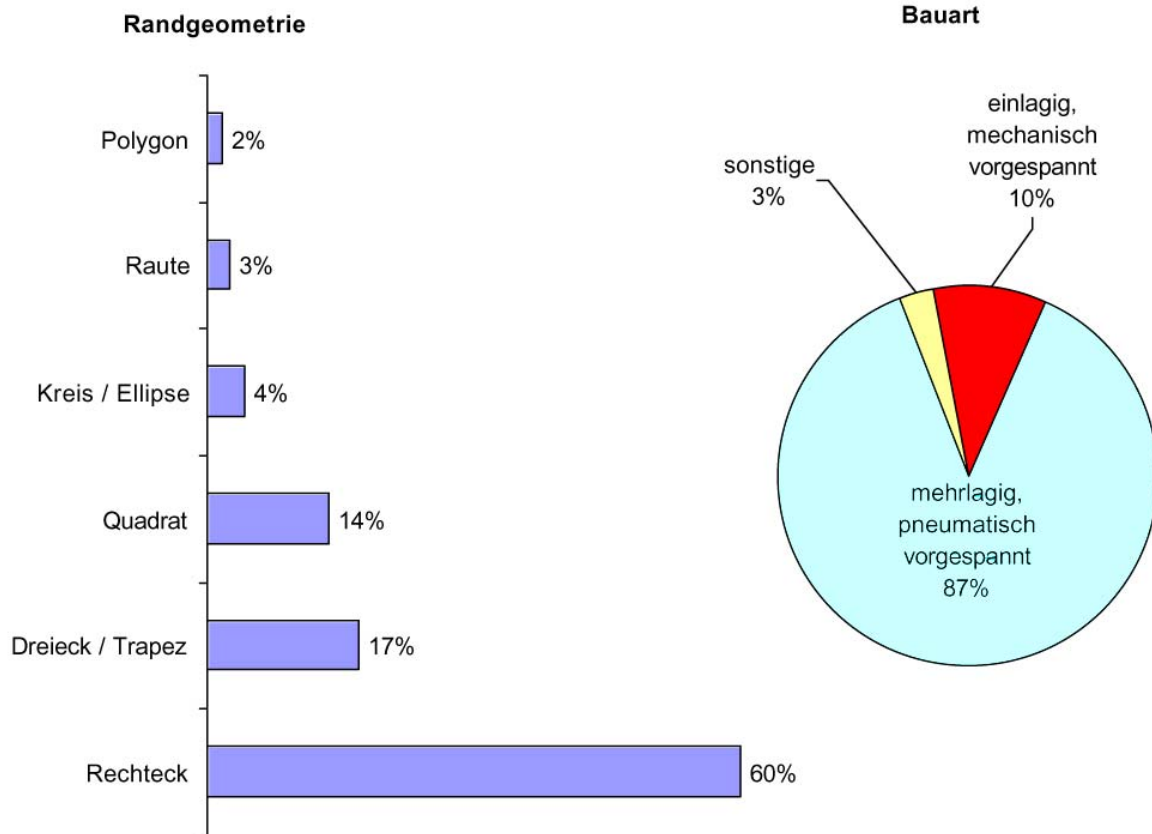


Abb. 1.11 Grundrissgeometrie (Randgeometrie) und Bauart (nach Anzahl der Projekte, Anteil in Prozent)  
(sonstige = nicht vorgespannte Folien, Laminierung von Parabolspiegeln etc.)



## 1.6 Geschichtliche Entwicklung

### 1.6.1 Meilensteine pneumatisch vorgespannter Systeme



Abb. 1.12 Plaza Pavillon EXPO Osaka, Japan, 1970 [226]



Abb. 1.13 Versuchsgewächshaus in Stuttgart Hohenheim, Mitte bis Ende der 80er-Jahre [79]

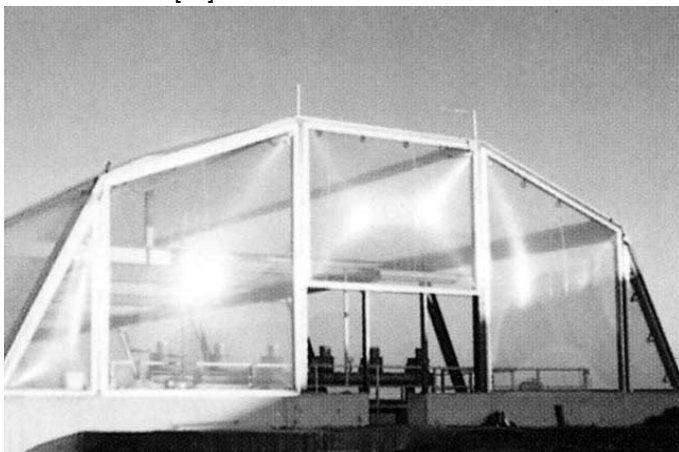


Abb. 1.14 Halle in Winsen an der Luhe, Mitte bis Ende der 80er-Jahre [79]

Anfang der siebziger Jahre des zwanzigsten Jahrhunderts wurden zwar bereits pneumatisch gestützte Kissen im Hochbau eingesetzt, jedoch bestanden diese entweder aus transluzenten Geweben (z.B. aus PVC-beschichtetem Polyestergewebe) oder, im transparenten Fall, aus mehrlagigen PVC-Folien, wie beispielsweise beim EXPO Pavillon auf der Plaza in Osaka 1970 (Architekt: Kenzo TANGE et. al.) mit Pneuabmessungen von 11 m x 11 m (s. Abb. 1.12.). Thomas HERZOG beschreibt in seinem Buch "Pneumatische Konstruktionen – Bauten aus Membranen und Luft" [74] den Stand der Entwicklung pneumatischer Konstruktionen bis 1976. Erst in den achtziger Jahren wurden im Bereich des Hochbaus auch ETFE-Folien als Pneu eingesetzt, allerdings zunächst nur für untergeordnete Anwendungen, wie Gewächshäuser (s. Abb. 1.13), Lagerhallen (s. Abb. 1.14) oder als Überdachung von Fischzuchtbecken (s. Abb. 1.15).

Herbert KOCH ist mit dem seinerzeitigen Unternehmen KOIT in Rimsting am Chiemsee als Pionier auf dem Gebiet der ETFE-Folien zu bezeichnen. Gemeinsam mit Hans und Jürgen KLEINWÄCHTER (Forschungslabor KLEINWÄCHTER, später BOMIN SOLAR RESEARCH) in Lörrach hat er zu Beginn der 1980er Jahre mit der Anwendung von ETFE-Folien für solartechnische Anlagen Neuland betreten, beispielsweise bei der Ummantelung von Solarkollektoren (s. Abb. 1.16) und Parabolspiegeln (s. Abb. 1.28), aber auch als metallbedampfte ETFE-Beschichtung von Radioteleskopen (s. Abb. 1.17). Einige der später entstandenen



Abb. 1.15 Fischzuchtbecken in Niederaußem Mitte bis Ende der 80er Jahre [79]



Abb. 1.16 Solarkollektor "Solar Gold 2000", Mitte bis Ende der 80er Jahre [79]

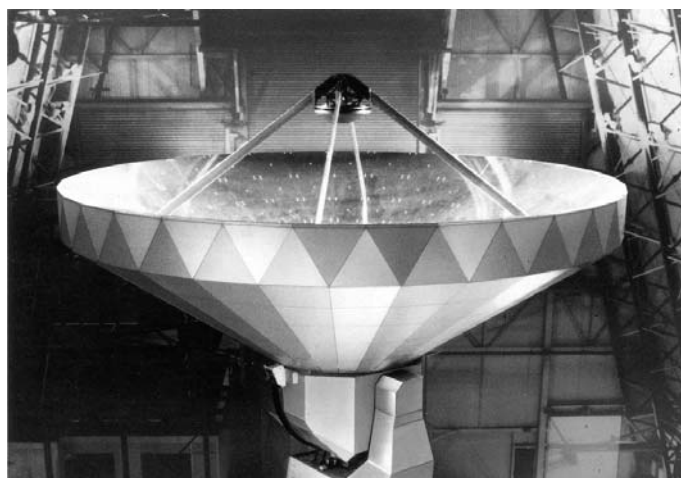


Abb. 1.17 Radioteleskop "Plateau de Burre", Genf, Mitte bis Ende der 80er Jahre [79]

Membranbau-Unternehmen haben einen Teil ihrer personellen Wurzeln im Unternehmen KOIT, wie z.B. die Firmen KOCH HIGHTEX, KOCH MEMBRANEN, KOCH MEMBRANE STRUCTURES, B&O HIGHTEX, HIGHTEX, SKYSPAN oder COVERTEX.

Weitere Pioniere auf dem Gebiet der Ausführung von Konstruktionen aus ETFE-Folie sind Bernd BEILKEN, Stefan LEHNERT und Horst SCHÜTZE, die mit dem Unternehmen TEXTLON in Lemwerder bei Bremen, später VECTOR (UK), FOILTEC, (D) und PLANTEC (D) diese Technologie in den ersten Jahrzehnten maßgeblich vorangetrieben haben.

Sämtliche Anwendungen wären jedoch nicht möglich gewesen, wenn nicht auf der Seite der Folienentwicklung der Chemiker Herbert FITZ im Unternehmen HOECHST die entsprechenden Verarbeitungsmöglichkeiten der Folie geschaffen hätte (Senkung der Dickentoleranzen und des MFI (Melt Flow Index), näherungsweise isotropes Verhalten, Folienplanlage etc.).

Für die statisch-konstruktive Planung der räumlich komplexen Geometrien textiler Membranen und Folien ist heute die Formfindung und die Spannungsermittlung mit Finite-Elemente-Methoden (FEM) unverzichtbar. In Deutschland wurde diese Entwicklung maßgeblich durch Arbeiten auf dem Gebiet der Geodäsie bestimmt, beispielsweise von LINKWITZ. Ende der 60er Jahre wurde die so genannte Kraftdichtemethode erstmals für die Planung des Olympiastadions in München auf Membran- bzw. Seilnetzkonstruktionen angewendet. Sie ermöglichte zunächst nur die Spannungsberechnung von Kabeln (Seilen und Seilnetzen). Hierauf aufbauend, wurde später die so genannte URS-Methode (Updated Reference Strategy) entwickelt, die heute sowohl auf Seilnetze, als auch auf schubweiche und schubsteife Membranwerkstoffe und Folien, angewendet werden kann.



Abb. 1.18 Mangrovenhalle im Burger's Park, erste permanente Halle mit ETFE-Pneus, Arnheim, 1982 [79]



Abb. 1.19 Raubtierhaus im Tierpark Hellabrunn, ETFE-Pneus auf Seilnetz, München, 1994, Foto: K. MORITZ



Abb. 1.20 Münchner Olympiagesellschaft MOG – Hublinse, ETFE-Folienpneu auf Seilnetz, München, 1996, Foto: K. MORITZ

In England hat sich parallel eine weitere FE-Methode etabliert – die Methode der dynamischen Relaxation, die zunächst auf anderen Gebieten des Bauwesens eingesetzt wurde. Arbeiten, beispielsweise von Mike BARNES und David WAKEFIELD (University of Bath, UK) führten schließlich auch zur Anwendung dieser Methode bei Membranen und Folien.

Das erste permanente und großflächige Dach aus ETFE-Folienkissen entstand 1982 mit der Mangrovenhalle im Zoo von Arnheim. Heute, also nach 25 Jahren, ist das Foliendach mit seilunterspannten Pneus (Spannweite ca. 3 m) noch immer intakt (s. Abb. 1.18).

Ein Meilenstein der Bauweise entstand 1994 mit dem Raubtierhaus im Tierpark Hellabrunn (s. Abb. 1.19). Das Pseudodach bildet hier eine antiklastische Gesamtform. Es besteht aus einem vorgespannten Seilnetz, das von zwei Stützen getragen wird, sowie aus langen räumlich gekrümmten Pneus. Sie spannen zwischen den Meridianseilen und legen sich auf die Ringseile des Netzes auf. Die obere Folienlage verläuft von der Traufe bis zum First, und erreicht so eine maximale Pneufeldgröße von etwa 2 x 20 m. Die untere Folienlage bildet näherungsweise quadratische Felder (ca. 2 x 2 m), die nach innen gerichtete Lasten sowohl auf die Ring- als auch auf die Meridianseile übertragen. Pneus und Seilnetz bilden hier ein harmonisches, weiches Gesamtsystem.

Einen weiteren Meilenstein der Pneubauweise stellt die Hublinse im Olympiapark München aus dem Jahr 1996 dar (s. Abb. 1.20).



Abb. 1.21 FESTO Pneuhalle "AIRTECTURE", ETFE-Unterdruckpneus, Esslingen, 1996 [184]

Sie ist die erste Anwendung von ETFE-Folie in Verbindung mit einem verfahrbaren Hubdach. Die untere Pneulage besteht aus ETFE-Folie. Sie wurde aufgrund ihrer begrenzten Tragfähigkeit durch ein Seilnetz gestützt. Die Oberlage besteht aus einem mit PTFE laminierten Glasfaser-Gittergewebe.

Ebenfalls 1996 entstand mit der Pneuhalle "Airteature" der Firma FESTO in Esslingen ein temporäres Bauwerk, bei dem ETFE-Folienpneus erstmals durch Unterdruck stabilisiert wurden (s. Abb. 1.21).



Abb. 1.22 Cycle Bowl, Duales-System-Deutschland GmbH, EXPO 2000, Hannover, Foto: K. MORITZ

Auf der EXPO 2000 in Hannover wurde mit dem Projekt "Cycle Bowl", einem Ausstellungspavillon der Duales-System-Deutschland GmbH, eine Technologie angewendet, bei der die äußere und die mittlere Lage der dreilagigen ETFE-Fassadenpneus alternierend bedruckt wurden (s. Abb. 1.22). Erhöht man den Druck in der inneren, und verringert ihn in der äußeren der beiden Pneukammern, legt sich die mit Zuschnitt versehene Mittellage an die äußere Lage an. Die beiden alternierenden Bedruckungen ergänzen sich so zu einer nahezu opaken Hülle. Die Lichttransmission der Außenhaut wurde damit erstmals mit Hilfe zweier differenter Kammerinnendrucke eines dreilagigen Pneus geregelt.



Abb. 1.23 Eden Project (Garden of Eden), St. Austell, UK, 2001 [226]

Im Jahr 2001 entstand mit dem Projekt "Garden of Eden" – kurz "Eden Project" genannt - die Hülle für einen botanischen Garten in Cornwall (UK). Sie übertraf mit einer Gesamtfläche von ca. 30.000 m<sup>2</sup> in ihrer Dimension und auch in ihrer Ästhetik alle bislang in dieser Bauweise entstandenen Konstruktionen (s. Abb. 1.23).



Abb. 1.24 Masoala Regenwald im Zoo Zürich, 2002 [32]



Abb. 1.25 Allianz Arena München Fröttmaning, 2005, Foto: K. MORITZ



Abb. 1.26 Atriumdach IABG, Ottobrunn, 2005, Foto: K. MORITZ

Ein Jahr später, 2002, entstand mit dem Masoala Regenwald im Zoo Zürich eine ähnlich genutzte Halle mit einer ETFE-Pneuhülle (s. Abb. 1.24). Hier wird die Flora und Fauna der Halbinsel Masoala auf Madagaskar ausgestellt und erhalten. Die Rechteckpneus spannen zwischen Virendeelträgern der bogenförmigen Tragstruktur. Die maximale Spannweite der Pneus beträgt 3,90 m, die maximale Pneulänge von Traufe zu Traufe 106 m. Aus Gründen der Hagelschlagsicherheit wurde hier eine vierte Folienlage – sozusagen als Verschleißschicht - nachträglich auf die bestehenden dreilagigen Pneus aufgesetzt, so dass hier erstmals ein Dreikammerpneu entstand.

Im April 2005 wurde die Hülle der Allianz Arena in Fröttmaning bei München fertig gestellt (s. Abb. 1.25). Sie besteht aus 2.760 transluzenten, z.T. auch transparenten, ETFE-Folienpneus. Die beiden Achsen der rautenförmigen Pneus messen maximal etwa 4,5 m x 16,5 m. Die ungewohnte Form, Struktur und Beleuchtung der ca. 74.000 m<sup>2</sup> großen Stadionhülle etablierte die ETFE-Folie endgültig als architektonisch, konstruktiv und tragwerksplanerisch interessanten Werkstoff im Hochbau.

Für die Befestigung der Pneus an der Unterkonstruktion wurden erstmals keine linearen Aluminium-Klemmprofil-Segmente eingesetzt, sondern ein biegeweiches Extrusionsprofil aus dem synthetisch hergestellten Kautschuk EPDM. Dies hat mehrere Vorteile: Zum einen ist die Pneulagerung nachgiebig, was Spannungsspitzen mindert. Zweitens ermöglicht die lokale - also nicht kontinuierliche - Befestigung des EPDM-Profiles an

der Unterkonstruktion mittels Stahlklammern die Ausbildung von Normalkraftgelenken in den Rautenecken der Unterkonstruktion. Diese waren durch die Temperaturexpansion ( $\pm 13$  mm) der zusammenhängend wirkenden Dachscheibe zwingend erforderlich. Drittens bildet das EPDM-Profil eine thermische Trennschicht zwischen ETFE und Metall. Hierdurch wird eine Verbesserung der Dauerhaftigkeit der Randverbindung erwartet.

Im Dezember 2005 wurde das ca.  $1.850 \text{ m}^2$  große Atriumdach für das Verwaltungsgebäude der IABG in Ottobrunn bei München fertig gestellt (s. Abb. 1.26). Das Tragsystem des Flachdaches besteht aus unterspannten Einfeldträgern mit einer maximalen Länge von 37,60 m, die auf der Attika des Festdaches sowie auf Stahlrahmen der Fassade aufliegen. Zwischen den Trägern (Achismaß 5,50 m) spannen seilunterspannte dreilagige ETFE-Folienpneus ( $250 / 200 / 250 \text{ }\mu\text{m}$ ) mit einer Spannweite von 5,40 m. Ermöglicht wurde diese, für rechteckige Pneus große Spannweite, durch drei Maßnahmen bzw. Faktoren. Zum einen ist das Pseudach von einem etwas tiefer gelegenen Massivdach umgeben, so dass die in der Höhe der Dachkante bei ca. 21 m rechnerisch anzusetzenden Randsogspitzen nach DIN 1055-4:2005 stark reduziert werden konnten. Zweitens wurde die untere Folie zur Aufnahme von Schneelasten seilunterspannt (Seilabstand 1,5 m). Zum dritten wurde die Mittellage mit einem Zuschnitt versehen und die beiden Luftkammern mit unterschiedlichen Drücken gespeist. Somit entstand ein Zweikammersystem, bei dem die Mittellage mit trägt und erstmals für Windlasten rechnerisch in Ansatz gebracht wurde.



Abb. 1.27 Freizeitbad "Tropical Island" (Umbau der CargoLifter Werfthalle in Briesen bei Brand, Brandenburg), 2005 [157]

Ebenfalls im Jahr 2005 wurde der Umbau der "CargoLifter" Werfthalle zum Freizeitbad "Tropical Island" in Briesen bei Brand, Brandenburg, fertig gestellt (s. Abb. 1.27). Auf der Südseite der 106 m hohen Bogenhalle wurde die aus vier Lagen bestehende Membrandachhaut (PVC-beschichtetes PES-Gewebe) der vier Mittelfelder gegen dreilagige Folienpneus aus ETFE-Folie ausgetauscht. Zweck des Fassadenumbaus war die Versorgung des Innenraumes und

der darin befindlichen Vegetation mit Sonnenlicht und UV-Strahlung. Die vier Bogenfelder á ca.  $5.000 \text{ m}^2$  bilden nach dem Umbau eine transparente Gesamtfläche von etwa  $20.000 \text{ m}^2$ . Jedes der vier Felder besteht aus 14 Pneus. Die größten Pneus stellen mit einer Feldgröße von ca.  $400 \text{ m}^2$  die bislang größten gebauten ETFE-Folienkissen dar. Da das Bogentragwerk beim Umbau erhalten blieb, waren die maximalen Auflagerreaktionen vorgegeben. Dies erforderte ein weiches Sekundärtragwerk, bei dem die Pneus erstmalig sowohl innen als auch außen durch ein Seilnetz gestützt wurden.

## 1.6.2 Meilensteine mechanisch vorgespannter Systeme

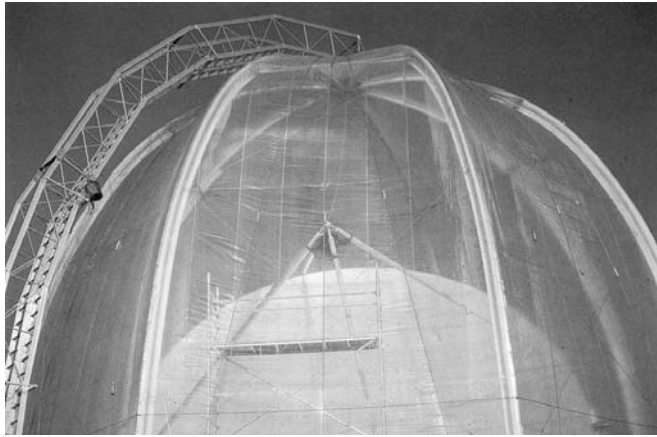


Abb. 1.28 ETFE-Dom auf dem 3. Internationalen Sonnenforum, Hamburg, 1980 [79]

Die Anwendung einlagiger und mechanisch vorgespannter ETFE-Folien wurde erstmals 1980 im Rahmen des 3. Internationalen Sonnenforums in Hamburg dokumentiert. Der dort temporär aufgestellte ETFE-Dom umhüllte einen Parabolspiegel. Der Durchmesser und die Höhe des Domes betragen jeweils ca. 14 m. Die Spannweite der Folie zwischen den Sogseilen betrug ca. 0,8 m (s. Abb. 1.28). Neben dem ETFE-Dom war auf dem Sonnenforum auch die einlagige ETFE-Folienbespannung einer kugelförmigen Halle in ähnlicher Größenordnung zu sehen [79].



Abb. 1.29 Warmbad "Prienavera", Prien/Chiemsee, 1999 [184]

Das einlagige Vordach des Warmbades Prienavera in Prien am Chiemsee wurde 1999 fertig gestellt (s. Abb. 1.29). Es diente als Pilotprojekt zur Beobachtung des Relaxationsverhaltens mechanisch vorgespannter Konstruktionen aus ETFE-Folie für permanente Bauwerke. Die Gesamtfläche beträgt ca. 200 m<sup>2</sup>. Sie wird von den 18 auskragenden BSH-Bindern in 17 Folienfelder mit einer Feldbreite von maximal ca. 5 m und einer Auskragung von ca. 4 m unterteilt. Die durchschnittliche Feldgröße beträgt ca. 12 m<sup>2</sup>. Jedes Feld ist an drei Seiten von Klemmprofilen eingefasst. Die vierte Seite bildet ein Girlandenseil. Die Folie wird durch drei annähernd parallele Seile pro Feld gehalten, die in ankonfektionierten Taschen unter der Folie verlaufen. Hierdurch entsteht eine Feldteilung in vier Felder mit einer jeweiligen Spannweite von max. 1,25 m zwischen den Seilen.



Abb. 1.30 E.ON Informationszentrum Walchenseekraftwerk, Kochel am See, 2001, Foto: K. MORITZ

Aufgrund der positiven Erfahrungen beim Vordach des Warmbades Prien in Bezug auf das Relaxationsverhalten der Folie entstand im Jahr 2001 das einlagige, mechanisch vorgespannte ETFE-Foliendach des Informationszentrums am Walchenseekraftwerk in Kochel am See (s. Abb. 1.30). Zwischen den Aluminiumrohren der Unterkonstruktion überspannt die nahezu ebene Folie etwa 1,25 m.



Abb. 1.31 Konferenzgebäude, Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU), Osnabrück, 2002, Foto: BARTHEL & MAUS

Auf der Unterseite der Folie wurden Folienstreifen ankonfektioniert, die seitlich der Aluminiumrohr-Unterkonstruktion in Nuten gelegt und mit Klemmprofilen linear befestigt wurden. Die Folie wird an ihren Rändern umlaufend von einem girlandenförmigen Klemmrand gehalten. Anstelle eines Randseiles werden hier kurze geradlinige Edelstahlplatten zu einer polygonalen Kette zusammengefügt. Das zu einem Stück konfektionierte ETFE-Dach hat eine Gesamtfläche von ca. 400 m<sup>2</sup>.

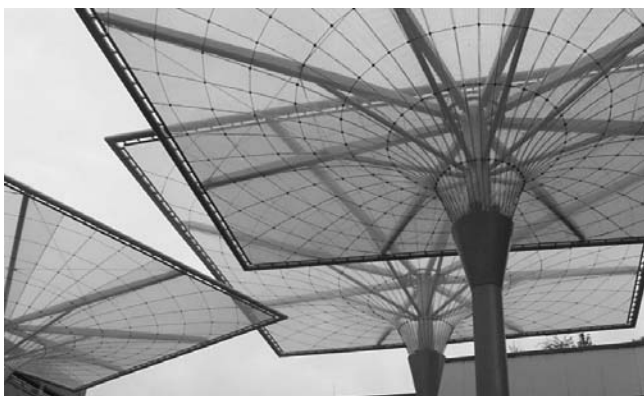


Abb. 1.32 IHK Trichterschirme, Würzburg, 2004 [177]

Im Jahr 2002 wurde das transparente ETFE-Foliendach für das Konferenzgebäude der Deutschen Bundesstiftung Umwelt in Osnabrück fertig gestellt (s. Abb. 1.31). Die Folien spannen hier mit einer Spannweite von 1,4 m zwischen bogenförmigen BSH-Bindern (Achsabstand 1,50 m, Bogenstich 0,80 m) und bilden damit nahezu tonnenförmige Dächer mit einer Spannweite von 7,89 m. Die einlagige Folie mit einer Dicke von 225 µm ist als äußere Haut des Kaltdaches erstmals Teil des bauphysikalischen und in Verbindung mit regelbaren Lammellen über dem Konferenzraum auch Teil des lichttechnischen Konzeptes.



Abb. 1.33 AWD Arena Hannover, 2005, Foto: K. MORITZ

Im Jahr 2004 wurden auf dem Innenhof der Industrie und Handelskammer (IHK) in Würzburg erstmals einlagige ETFE-Folien in Kombination mit einem Seilnetz (8 und 10 mm) ausgeführt (s. Abb. 1.32). Die drei im Grundriss quadratischen Trichterschirme mit Kantenlängen 11, 12,5 und 14 m und Höhen 10,5, 12 und 13,5 m bilden doppelt gekrümmte Tiefpunktmembranen. Die Meridianseile werden in Folientaschen geführt, die Ringseile verlaufen frei unter der Folie und verbinden die Meridianseile über verstellbare Seilklemmen.

Das ca. 10.000 m<sup>2</sup> große transparente ETFE-Foliendach über der Tribüne der AWD Arena in Hannover (ehem. Niedersachsenstadion) wurde 2005 fertig gestellt (s. Abb. 1.33). Die 250 µm dicke Folie bildet hier nahezu ebene Flächen (max. 363 m<sup>2</sup>). Die Feldbreiten betragen maximal 13 m am Dachinnenring und 18 m am Dachaußenring, die Dachtiefe max. 23,4 m. Die Folie wird durch eine Schar in Taschen unter der Folienebene radial angeordneter Seile im Abstand von 1,1 m (am Innenrand) und 1,4 m (am Außenrand) gestützt. Die Folielfelder haben ein Gefälle, so dass Regen- und Schmelzwasser über die leicht abgesenkte Traufe auf das äußere Festdach abfließen kann.



### 1.6.3 Stand der Technologie

Seit 1970 gibt es den Werkstoff ETFE, seit den frühen 80er Jahren werden Membranen aus ETFE-Folie als gestalterisches, Last abtragendes und bauphysikalisch wirksames Element der Gebäudehülle eingesetzt. Dennoch ist das publizierte Wissen über den Werkstoff und seine mechanischen und bauphysikalischen Eigenschaften noch immer gering. Es stellt sich die Frage, woran das liegt - bzw., in welchem Stadium des Lebenszyklus einer Technologie sich ETFE-Folien befinden? Die Anwendung eines bekannten Marketing-Modells [31] bringt Aufschluss. Es teilt die Entwicklung einer Technologie in die folgenden vier Phasen (s. Abb. 1.34):

1. Phase: Schrittmachertechnologie: Es herrscht eine hohe technische Unsicherheit und es bestehen große wissenschaftliche Entwicklungsanforderungen. Die möglichen Anwendungsgebiete sind noch weitgehend unbekannt und die Verfügbarkeit ist sehr beschränkt.
2. Phase: Schlüsseltechnologie: Die technische Unsicherheit ist reduziert und die Technologie wird zunehmend in einer großen Breite von Anwendungsgebieten eingesetzt.
3. Phase: Basistechnologie: Die Technologie wird weitgehend beherrscht und ist verfügbar. Die möglichen Einsatzgebiete sind abgedeckt.
4. Phase: Verdrängte Technologie: Die technische Unsicherheit ist verschwunden. Die Anzahl der Einsatzgebiete nimmt wieder ab. Die Verfügbarkeit ist nach wie vor hoch. Die Technologie wird durch andere Technologien verdrängt.

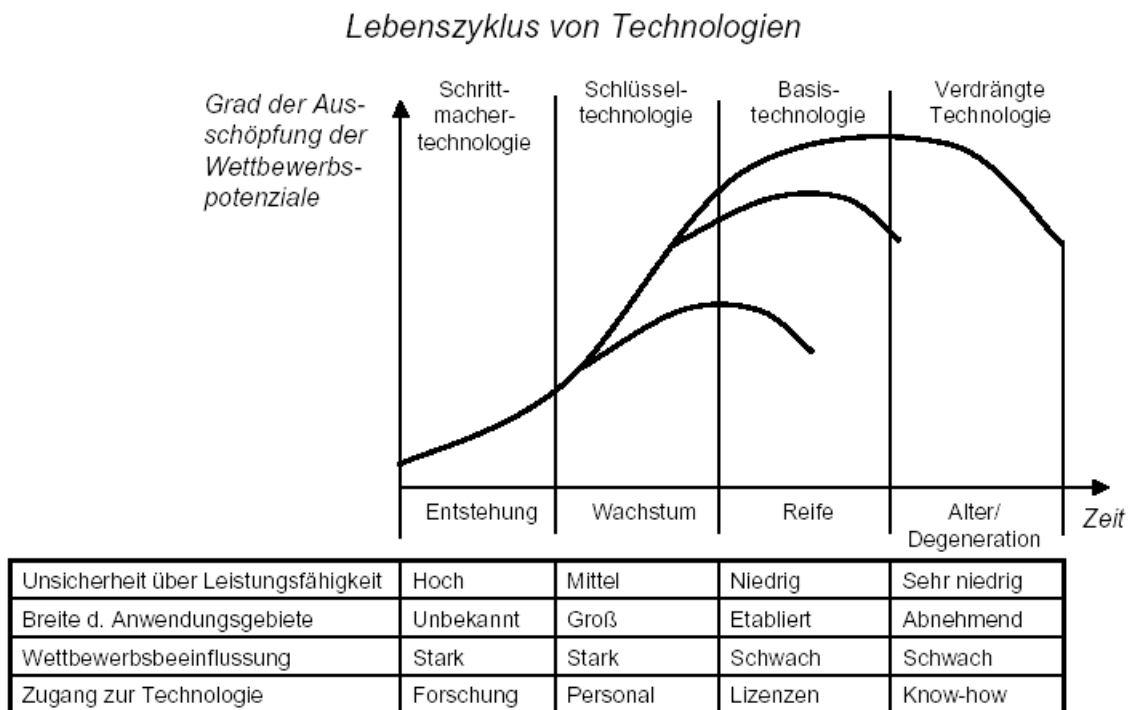


Abb. 1.34 Lebenszyklus von Technologien, BULLINGER, 1994 [31]

Die Entwicklung von ETFE-Folien erfolgte bislang vorwiegend durch die Pionierarbeit einiger Architekten, Ingenieure und ausführenden Unternehmen, begleitet von den jeweiligen Werkstoffprüfern (und -gutachtern), Prüfsachverständigen und Genehmigungsbehörden. Da man nicht auf bewährte Lösungen zurückgreifen konnte, stellen viele der ausgeführten Objekte Pilotprojekte dar, welche die erstmalige Anwendung konstruktiver Detaillösungen beinhalteten. Dementsprechend gibt es heute noch diverse konstruktive Verbesserungsmöglichkeiten.

Die Unsicherheit über die Leistungsfähigkeit der Technologie ist heute bereits deutlich vermindert aber noch nicht ganz eliminiert. Das Anwendungspotential der Fluorpolymere im allgemeinen, und der ETFE-Folien im besonderen, ist groß und derzeit nur zu erahnen. Die Wachstumsphase hat bereits begonnen. Eine übliche Entwicklung vorausgesetzt, befinden sich Membrankonstruktionen aus Fluorpolymerfolien derzeit in der frühen Phase einer Schlüsseltechnologie. Bislang haben (abweichend vom o.g. Modell) jedoch nicht die Forschungsinstitutionen Zugang zu dieser Technologie, sondern die ausführenden Unternehmen. Die Forschung hinkt hinter der Ausführung her. Verschiedene Symposien zu den Themen Fluorpolymere (FLUOROPLAST, Zürich 2004) bauphysikalische Eigenschaften von ETFE-Folien (DER 5. BAUSTOFF – BAUEN MIT MEMBRANEN, Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP, Holzkirchen 2006), pneumatische Konstruktionen (ECCOMAS, CONFERENCE INFLATABLE MEMBRANES, Stuttgart, 2005, oder auch zum Thema Membrankonstruktionen (ECCOMAS, STRUCTURAL MEMBRANES, Barcelona 2007) zeigen ein erwachtes Interesse von dieser Seite.

Die dokumentierten Erkenntnisse über ETFE-Folien zur Verwendung im Bauwesen sind im Vergleich zu denen etablierter Baustoffe, wie Stahl, Holz, Beton oder Mauerwerk gering. Für die zum Teil seit Jahrhunderten eingesetzten und untersuchten Werkstoffe liegen heute umfangreiche Erkenntnisse sowie differenzierte technische Regelwerke vor, während für Folien (und auch für Gewebe) in Deutschland keine einzige materialspezifische Norm in Bezug auf die Bemessung und Konstruktion existiert. Es sei angemerkt, dass dies lediglich eine Feststellung und kein Ruf nach umfangreichen Normenwerken ist. Für das fehlende Wissen gibt es mehrere Gründe:

- ETFE-Folien sind erst seit 1970 verfügbar. Gegenüber den etablierten Baustoffen stellen sie damit einen jungen Baustoff bzw. eine junge Bauart dar.
- Das mit Folien erreichte Bauvolumen erreicht bislang weder mengen- noch kostenmäßig die Größenordnung konventioneller Werkstoffe.
- Die Festigkeit von ETFE-Folien ist deutlich geringer als von Gewebemembranen. Damit decken ETFE-Folien nur einen kleinen Spannweitenbereich der leichten Flächentragwerke ab. Unter anderem hat dies dazu geführt, dass die Kenntnis von den Werkstoffeigenschaften der Gewebemembranen heute tiefer ist, als die der Folien.
- Die Tragfähigkeit von ETFE-Foliensystemen weist große herstellungs- und konstruktionsbedingte Abhängigkeiten auf. Permanente Kombinationen und Modifizierungen der Konstruktionen und der verwendeten Werkstoffe in allen Herstellungsebenen erschweren die Einführung allgemeiner Regelwerke. Sie sprechen aber für die Anwendung von Qualitätsstandards.
- Das mechanische Verhalten der viskoelastischen, temperaturabhängigen und relativ schubsteifen ETFE-Folien ist komplex und dementsprechend aufwändig zu prüfen. Als Beispiel denke man an biaxiale Kriechversuche über 1.000 Stunden bei hohen oder niedrigen Temperaturen. Wie bei anderen Kunststoffen auch, ist das Wissen über die temperatur- und zeitabhängigen Werkstoffeigenschaften noch nicht sehr tief.

- Es gibt nur wenige materialspezifisch geeignete und durchgängig angewendete Prüfverfahren für Folien. Viele existierende Prüfverfahren im Bauwesen beziehen sich auf (schubweiche) beschichtete Gewebe oder auf Kunststoffplatten und Spritzgussteile, weitere Prüfverfahren zielen auf andere Anwendungen ab, beispielsweise auf Verpackungsfolien.
- Mechanische Werkstoffprüfungen an ETFE-Folien wurden in Deutschland vornehmlich projektbezogenen im Rahmen von bauordnungsrechtlich geregelten Zustimmungsverfahren im Einzelfall durchgeführt. Die Ergebnisse blieben daher zumeist unveröffentlicht. Je nach Projektbedingungen und Prüfmethode, aber auch je nach Tragwerksplaner und Prüfenieur resultieren unterschiedliche Prüfanforderungen, Prüfergebnisse und Bemessungskonzepte.
- Gelegentlich vernimmt man die These, dass die in den 80er Jahren des letzten Jahrhunderts erfolgreich abgeschlossenen Sonderforschungsbereiche 64 (Weitgespannte Flächentragwerke) und 230 (Natürliche Konstruktionen) bereits alle interessanten Forschungsthemen im Membranbau abgedeckt hätten, was nicht richtig ist.

## 1.7 Zielsetzung

Die Aufgaben und die Kernkompetenzen des Tragwerksplaners sind der Entwurf, die Konstruktion sowie die Bemessung und der Nachweis von Tragwerken. Im Hinblick auf ETFE-Folienkonstruktionen ergeben sich hieraus zwei grundlegende Forschungsthemen. Zum einen die Frage nach dem Zusammenhang von Konstruktion, Form und Raum und zum anderen die Frage nach der Nachweisführung die Herleitung eines Bemessungskonzeptes. Die Bearbeitung beider Fragestellungen ergibt jedoch nur einen Sinn, wenn die Werkstoffeigenschaften der ETFE-Folie bekannt und dokumentiert sind. Da dies bislang nicht der Fall ist, liegt der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit auf der Untersuchung der mechanischen Eigenschaften der ETFE-Folie.

Die Arbeit verknüpft eigene Erfahrungen bei der Planung und Bemessung von ETFE-Folienkonstruktionen, Beobachtungen am Objekt und Erkenntnisse aus Literatur und aus Werkstoffuntersuchungen. Insbesondere der Vergleich von Ergebnissen aus Werkstoffprüfungen mit den in der Literatur zu findenden Hinweisen zu viskoelastischen Werkstoffen führt zu neuen Erkenntnissen über das mechanische Verhalten der ETFE-Folien und zur Begründung von Beobachtungen am Bauwerk.

**Kapitel 1** beinhaltet eine Einführung in das Themengebiet. Es werden die Bauarten der pneumatischen und der mechanischen Vorspannung differenziert und die grundlegenden Formen der ETFE-Folien in einer Matrix vorgestellt. Die geschichtliche Entwicklung, die Initiatoren wichtiger Neuerungen, sowie die hieraus begründeten Meilensteine der Technologie werden beschrieben. Die über zweihundert, in Anhang A dargestellten, Projektbeispiele werden in Bezug auf ihre Größe, Nutzung, Bauteilanzahl, Grundrissgeometrie und Bauart sowie in Bezug auf ihren Standort (Staat) ausgewertet und in Diagrammen dargestellt. Die Anwendung eines bekannten Marketingmodells liefert einen Ausblick auf die erwartete Entwicklung. Mögliche Ursachen für derzeitige Forschungsdefizite werden genannt. Die Einführung basiert auf eigenen Erkenntnissen, die der Autor durch die zehnjährige berufliche Beschäftigung in Forschung, Planung, Bemessung und Praxis mit diesem Thema gewonnen hat. Darüber hinaus wurden Literaturquellen ausgewertet, die bis zu den Anfängen des Bauens mit ETFE-Folien zurückgehen.

**Kapitel 2** beinhaltet die Darstellung des aktuellen Wissensstandes und dessen Strukturierung in Bezug auf die relevanten Forschungsgebiete Mechanik, Werkstoffprüfung,

Bemessung, Herstellung, Konstruktion und chemischer Aufbau der ETFE-Folien. Die von Laboren und Folienherstellern bislang veröffentlichten oder zur Verfügung gestellten Ergebnisse mechanischer Prüfungen, werden zitiert, beschrieben und teilweise mit eigenen Diagrammen veranschaulicht. Hinweise auf weiterführende Literatur sollen den Einstieg in die jeweilige Disziplin erleichtern.

**Kapitel 3** liefert eine Zusammenstellung der in der einschlägigen Literatur verfügbaren Angaben zum chemischen und strukturellen Aufbau des ETFE als Ausgangswerkstoff, sowie zur Herstellung des Granulats und zur Weiterverarbeitung zur Folie. Die Auswertung der Polymerliteratur liefert wichtige Hinweise auf den in der Baupraxis vorliegenden Glaszustand sowie auf die für teilkristalline Polymerwerkstoffe bedeutende Glasübergangstemperatur.

**Kapitel 4** behandelt den Themenkomplex der Werkstoffprüfungen an ETFE-Folien. Angewendete Prüfnormen werden interpretiert, die Abhängigkeit der Festigkeit von der Materialdicke aufgezeigt und eine statistische Auswertung monoaxialer Kurzzeitzugversuche an Folien- und Schweißnahtproben mit dem Ziel der Erfassung von Streuungen vorgenommen. Die eigene Auswertung von Rohdaten sowie deren Verknüpfung mit zur Verfügung gestellten Ergebnissen von Werkstoffprüfungen führen zu einer weitgehenden Beschreibung des Werkstoffverhaltens und zu Werkstoffkennwerten und Kennwertfunktionen in Abhängigkeit verschiedener Parameter. Die Einflüsse aus Temperatur, Dehngeschwindigkeit und biaxialem Spannungszustand auf die Fließgrenze sowie auf das Spannungs-Dehnungsverhalten im HOOKE'schen Bereich (E-Modul, Schubmodul und Querkontraktionszahl) werden separiert. Bei konstanter Temperatur und Dehngeschwindigkeit wird die VON MISES'sche Fließbedingung auf den ebenen Spannungszustand angewendet. Der Zusammenhang von Zeit und Temperatur wird in Form des in der Literatur beschriebenen Zeit-Temperatur-Verschiebungsprinzips erläutert und eine erste Abschätzung eines Verschiebungsfaktors für ETFE-Folien aus den Ergebnissen abgeleitet. Letztlich verdeutlichen Simulationsrechnungen mit der FE-Methode den Einfluss der Probengeometrie auf die Ergebnisse von Monoaxialversuchen und den Einfluss der Zuschnittsgeometrie auf die Spannungen in einem Pneu.

In **Kapitel 5** werden die wesentlichen Erkenntnisse zusammengefasst und Anknüpfungspunkte genannt.

**Anhang A** beinhaltet die Dokumentation von mehr als zweihundert gebauten Projekten.

**Anhang B** zeigt Monoaxialversuche des Herstellers NOWOFOL, die bei verschiedenen Verhältnissen von Probenbreite zu Probenlänge durchgeführt wurden.

**Anhang C** beinhaltet die statistischen Grundlagen zur Ermittlung der Bemessungsgrößen Mittelwert, Standardabweichung, Variationskoeffizient, 5%-Fraktilwert etc., sowie zu häufig anzutreffenden Verteilungen.




In **Anhang D** werden die Definitionen und die theoretischen Grundlagen der Werkstoffmechanik geliefert, die für die Auswertung und Einordnung der Versuche wichtig sind. Die Ansätze der Kriech-, Fließ- und Bruchgrenzenbestimmung, das Zeit-Temperatur-Verschiebungsprinzip, der Unterschied zwischen wahrer Dehnung und technischer Dehnung sowie zwischen Traversengeschwindigkeit und Dehngeschwindigkeit werden unter besonderem Bezug zu viskoelastischen Polymerwerkstoffen dargestellt.

## 2 Stand des Wissens

### 2.1 Mechanisches Verhalten

Die allgemeinen theoretischen Grundlagen der Kontinuumsmechanik und der Festigkeitslehre werden in einschlägigen Fachbüchern beschrieben. Die Tensoren der Spannungen, Dehnungen und Steifigkeiten sind für den räumlichen, ebenen und einachsigen Fall bekannt. Je nach mechanischem Verhalten stehen elastische Werkstoffgesetze für lineare/nichtlineare, isotrope/orthotrope/anisotrope sowie homogene/inhomogene Werkstoffe zur Verfügung. Geläufig sind beispielsweise die Gesetze nach HOOKE, SAINT-VENANT-KIRCHOFF, NEO-HOOKE, OGDEN oder MOONEY-RIVLIN.

Zur Elastizitätstheorie von Werkstoffen, speziell auch für Kunststoffe liefern beispielsweise folgende Quellen detaillierte Informationen:

-  OSWALD und MENGES 2003 (Material Science of Polymers for Engineers) [143]
-  MENGES 2002 (Werkstoffkunde Kunststoffe) [111]
-  GROSS und MEHLHORN 1997 (Der Ingenieurbau – Band 4 - Werkstoffe / Elastizitätstheorie, Teil 1 - Werkstoffe des Bauwesens) [67]

Die bislang publizierten Ergebnisse monoaxialer Werkstoffuntersuchungen an ETFE-Folien deuten auf ein annähernd lineares, homogenes und isotropes Verhalten bis zur Fließgrenze hin. Für diesen Bereich werden bislang ausschließlich HOOKE'sches Verhalten in Kombination mit den Zustandsgleichungen für den einachsigen Spannungszustand eines homogenen und isotropen Werkstoffes angesetzt.

Zur Beschreibung des viskoelastischen Verhaltens stehen zwei Betrachtungsweisen zur Verfügung: Die mikro-strukturelle Betrachtung, bei der energetische Variable als Zustandsgrößen dienen, und die phänomenologische Betrachtung der makroskopischen Vorgänge unter Zuhilfenahme von Feder-Dämpfer-Modellen (ggf. auch Reibungselemente). Nach MICHAELI und GLISSMANN 2000 [120] ist derzeit nur eine begrenzte Übertragung der mikrostrukturellen Vorgänge auf makroskopische beobachtbare Verhaltensweisen möglich.

Die für den Ingenieur anschaulichere Betrachtungsweise ist die phänomenologische. Die Feder beschreibt darin einen viskosen Festkörper, der Dämpfer eine viskose (newtonsche) Flüssigkeit. Schaltet man beide parallel, entsteht das VOIGT-KELVIN-Element, schaltet man sie in Reihe, entsteht das MAXWELL-Element. Das Modell von BURGER kombiniert diese beiden Grundelemente nochmals in einer Reihenschaltung. Mit diesem Modell ist das Kriech- und Relaxationsverhalten viskoelastischer Werkstoffe prinzipiell beschreibbar, jedoch nicht für jedes Polymer in hinreichender Genauigkeit.

In den letzten Jahren wurden am Institut für Kunststofftechnik der RWTH Aachen etliche Untersuchungen an verschiedenen Polymerwerkstoffen durchgeführt. Zur mechanischen Modellierung bediente man sich zumeist der o.g. Federn und Dämpfer, jedoch in weit größerer Anzahl.

Die generalisierten Modelle (Deformationsmodelle) ermöglichen durch die Parallel- und/oder Reihenschaltung beliebig vieler Federn und Dämpfer eine genaue Abbildung von Kriech- und

Relaxationskurven der Polymerwerkstoffe, prinzipiell auch der komplexen teilkristallinen Thermoplaste mit ihren amorphen und kristallinen Phasen.

Damit kann voraussichtlich auch das mechanische Verhalten von ETFE-Folie modelliert werden, jedoch nur, wenn die Werkstoffeigenschaften, insbesondere die Zeit- und die Temperaturabhängigkeit, hinreichend genau bekannt sind, was bislang nicht der Fall ist.

Die Deformationsmodelle erfordern aufgrund der Interaktion der Feder- und Dämpferparameter eine rechnergestützte Berechnung mit entsprechender Software, die an der RWTH Aachen entwickelt und angewendet wird. Einige der dort entstandenen Arbeiten liefern wichtige Hinweise auf die prinzipielle Vorgehensweise bei der Bestimmung der viskoelastischen Parameter. Sie verdeutlichen anhand verschiedener Polymerwerkstoffe die große Abhängigkeit der baupraktischen Kennwerte bzw. Kennwertfunktionen (E-Modul, Schubmodul und Querkontraktionszahl) vom Spannungsverhältnis, der Temperatur und der Dehngeschwindigkeit.

In Bezug auf das Deformationsmodell sind folgende Arbeiten zu nennen:

- 📖 HYING 2003 (Analyse der viskoelastischen Eigenschaften von Poly(tetrafluorethylen) im Bereich des  $\beta$ -Übergangs) [84]
- 📖 SCHMACHTENBERG 1998 (Der Einfluss des biaxialen Spannungszustandes auf die Werkstoffkennwertfunktionen nichtlinear viskoelastischer Werkstoffe) [170]
- 📖 DASSOW 1995 (Messung und Beschreibung der Querkontraktionszahl von teilkristallinen Thermoplasten als nichtlinear viskoelastischer Materialkennwert) [39]
- 📖 LEWEN 1991 (Das nichtlineare viskoelastische Verhalten von Kunststoffen am Beispiel der Zeit-Temperatur-Verschiebung und der Querkontraktionszahl) [108]
- 📖 MICHAELI, FÖLSTER und LEWEN 1989 (Beschreibung des nichtlinear-viskoelastischen Verhaltens mit dem Deformationsmodell) [117]
- 📖 MENGES, SCHMACHTENBERG 1987 (Das Deformationsmodell) [113]
- 📖 SCHMACHTENBERG 1985 (Die mechanischen Eigenschaften nichtlinear viskoelastischer Werkstoffe) [171]
- 📖 KNAUSENBERGER 1982 (Das mechanische Verhalten isotroper und anisotroper Werkstoffe mit nichtlinearen Eigenschaften) [97].

In Bezug auf Polymerwerkstoffe im Allgemeinen sowie auf die theoretischen Grundlagen der beiden o.g. Betrachtungsweisen viskoelastischer Werkstoffe liefert die folgende Literatur einen Überblick:

- 📖 WINEMAN und RAJAGOPAL 2000 (Mechanical Response of Polymers) [197]
- 📖 SCHWARZL 1990 (Polymermechanik) [181]
- 📖 BOYLE und SPENCE (1983 (Stress Analysis for Creep) [24]
- 📖 POMEROY 1978 (Creep of Engineering Materials) [144]
- 📖 RABOTNOW und ILJUSCHIN 1970 (Methode der Viskoelastizitätstheorie) [148]

Weder die phänomenologische noch die strukturelle Betrachtungsweise wurde bisher bei ETFE-Folien angewendet, da die entsprechenden Daten des zeit- und temperaturabhängigen Verhaltens fehlten. Mit diesen Daten wäre auch die Bestimmung der in der Literatur beschriebenen **Zeit-Temperatur-Verschiebungsfunktion (ZTV)** (engl.: **Time-Temperature Shift-function (TTS)**) möglich. Diese erlaubt die Abschätzung von Kennwerten für sehr lange/kurze Zeiträume (schnelle/langsame Beanspruchungen) bzw. sehr niedrige/hohe Temperaturen aus Versuchsreihen bei mittleren Dehngeschwindigkeiten bzw. mehreren Temperaturen. Neuere Erkenntnisse über die Zeit-Temperatur-Verschiebung am Beispiel gummielastischer Polymere sind in folgender Literatur beschrieben:

- 📖 HABERSTROH und GRAMBOW 2002 (Das Zeit/Temperatur-Verschiebungsprinzip (ZTV-Prinzip) - Simulation von Elastomerbauteilen) [72]
- 📖 GRAMBOW und HABERSTROH 2000 (Application of the time-temperature shift principle to the material behaviour of rubber under high deformations) [65]

Bekannt ist, dass bei viskoelastischen Werkstoffen die elastische, die viskoelastische und die viskose (zeitabhängig irreversible plastische) Dehnung nicht nacheinander auftreten, sondern sich überlagern. Bei derartigen Werkstoffen ist auch der Grenzzustand, ab welchem dauerhafte plastische Verformungen auftreten (Fließgrenzdefinition), von der Zeit, also der Dehngeschwindigkeit und der Belastungsgeschichte, der Temperatur und dem Spannungszustand abhängig. Zur Beschreibung ist daher eine Fließbedingung aufzustellen, welche diese Parameter berücksichtigt und welche die Mehrachsigkeit auf einen eindimensionalen Bemessungskennwert – die Vergleichsspannung - überführt. Desgleichen gilt für die Bruchbedingung. Grundlage für Fließ- und Bruchbedingungen bilden die Festigkeitshypothesen, die in der Literatur zur Kontinuumsmechanik beschrieben werden. Nach KARA 2005 (Untersuchung des viskoelastisch exzentrischen Knickens von Polymeren) [91] sind die folgenden sieben Festigkeitshypothesen bekannt:

- Normalspannungs-Hypothese
- Normaldehnungs-Hypothese
- Schubspannungs-Hypothese (TRESKA)
- Schubdehnungs-Hypothese
- Hypothese der Gesamtbelastungsenergie
- Hypothese der Gestaltänderungsenergie (HUBER-MISES-HENCKY)
- Hypothese der gespeicherten Gestaltänderungsenergie (REINER und WEISSENBERG)

Nach KARA [91] berücksichtigt nur die Hypothese von REINER und WEISSENBERG [149] eine zeitliche Abhängigkeit. Nach BRÜLLER, POTENTE und MENGES (Energiebetrachtungen zum Kriechverhalten von Polymeren) 1977 [29] ermöglicht sie energetische Aussagen über die Grenze zwischen linearer und nichtlinearer Viskoelastizität und über das Auftreten erster sichtbarer Werkstoffschädigungen beim einachsigen Kriechen von Polymeren.

Eine Fließ- oder eine Bruchbedingung wurde für viele teilkristalline Thermoplaste, so auch für ETFE-Folien, bislang nicht gefunden, da die Einflüsse der Zeit, der Temperatur und des Spannungszustandes nicht vollständig bekannt sind. Lediglich DE VRIES 2003 (Tensile Foil – ETFE-Foil as Membrane Construction Material), hat versucht, die Fließbedingungen nach TRESCA und nach VON MISES auf eine Versuchsreihe mit unterschiedlichen biaxialen Spannungszuständen bei konstanter Temperatur (+20°C) und konstanter (kraftgesteuerter) Prüfgeschwindigkeit, anzuwenden. Seine Versuchsergebnisse waren jedoch mit großen verfahrensbedingten Schwankungen behaftet, so dass er für diese eine Temperatur und Prüfgeschwindigkeit keine der beiden Bedingungen mit Sicherheit feststellen konnte. Die Arbeit von DE VRIES wird in Kapitel 2.2.2.3 noch genauer vorgestellt. Die folgenden Arbeiten befassen sich mit der Fließgrenzdefinition aus Kurzzeitversuchen, die speziell bei viskoelastischen Werkstoffen ohne ausgeprägte Streckgrenze problematisch ist:

- 📖 QUINSON und PEREZ 1997 (Yield Criteria for Amorphous Glassy Polymers) [147]
- 📖 ROBERTS 1988 (Stress-Strain property reference points for non-linear materials) [155]

Der Brucheintritt (die Bruchbedingung) und der Bruchfortschritt (das Bruchverhalten) der duktil eingeschätzten ETFE-Folien waren bislang ebenfalls kein Gegenstand der Forschung. Allgemeine Angaben zu strukturellen Vorgängen, insbesondere in Polymerwerkstoffen sind in folgender Literatur finden:

- 📖 MOORE, PAVAN und WILLIAMS 2001 (Fracture Mechanics Testing Methods for Polymers Adhesives and Composites) [123]
- 📖 GRELLMANN und SEIDLER (Hrsg.) 1998 (Deformation und Bruchverhalten von Kunststoffen)
- 📖 MICHLER 1992 (Kunststoff-Mikromechanik – Morphologie, Deformations- und Bruchmechanismen) [121]
- 📖 BARDENHEIER 1982 (Mechanisches Versagen von Polymerwerkstoffen – Anstrengungsbewertung mehrachsialer Spannungszustände) [4]
- 📖 DOMKE 1977 (Struktur-rheologisches Modell zur Beschreibung des Festigkeits-, Verformungs- und Bruchverhaltens von Kunststoffen) [42].
- 📖 DOMKE 1977 (Einfluss des wirklichen Temperaturablaufes auf das Kriechverhalten und die Festigkeit von tragenden Kunststoffen) [43]

## 2.2 Mechanische Werkstoffprüfung

Allgemeine Angaben zur Vorbereitung und Durchführung von Prüfungen an Polymerwerkstoffen, zur Auswertung und Interpretation der Ergebnisse sowie zu ihrem Bezug zur Kontinuumsmechanik finden sich in

- 📖 GRELLMANN und SEIDLER 2005 (Kunststoffprüfung) [66]
- 📖 SCHMIEDEL 1992 (Handbuch der Kunststoffprüfung) [174]
- 📖 HENGL und GUST 1989 (Einfluß von Vorbeanspruchungen auf die mechanischen Eigenschaften polymerer Werkstoffe) [217]



Spezielle Hinweise zur Durchführung und Auswertung biaxialer Prüfungen von Membranwerkstoffen (mehrachsigem ebener Spannungszustand) finden sich beispielsweise in:

- 📖 MÜNSCH und REINHARDT 1995 (Zur Berechnung von Membrantragwerken aus beschichteten Geweben mit Hilfe genäherter elastischer Materialparameter) [134]
- 📖 SAXE und BAIER 1989 (Ein biaxiales Prüfsystem – Entwicklung, Stand, Perspektiven) [163]
- 📖 SAXE und KOENEN 1991 (Biaxiale Zugprüfungen an technischen Membranen) [164]

### 2.2.1 Herstellerangaben

Die Folienhersteller und die weiterverarbeitenden Membrankonfektionäre stellen auf Wunsch Produktdatenblätter, Diagramme zu mechanischen Eigenschaften und ggf. allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen und Prüfzeugnisse, insbesondere zum Brandverhalten zur Verfügung. Die Angaben zum mechanischen Verhalten beziehen sich im Wesentlichen auf die Bruchspannung, die Bruchdehnung, die Zugspannung bei 10 % Dehnung und die Weiterreißfestigkeit. Angegebene Zahlenwerte beziehen sich auf eine Prüftemperatur von etwa 23°C (Raumtemperatur). Sie stellen zumeist Mittelwerte ohne Angaben zur statistischen Verteilung dar. Wenn es sich um Werks- bzw. Werksprüfzeugnisse handelt, werden i.d.R. auch einzuhaltende Mindest- und Höchstwerte bzw. Toleranzbereiche angegeben. Diagramme zur Temperaturabhängigkeit der mechanischen Kennwerte (monoaxial) sind z.T. ebenfalls veröffentlicht. Die jeweils angewendete Prüfnorm richtet sich im Normalfall nach dem Herstellungsland.

Es existieren folgende veröffentlichte Studien der Hersteller zum Werkstoff ETFE:

- 📖 TEFZEL® Fluorpolymer Resin – Properties Handbook, Du PONT®, 2003 [45]
- 📖 HOECHST HIGH CHEM® - HOSTAFLON® ET 6235 Informationsblätter und Broschüren, HOECHST®, z.B. 1983, 1991 etc. [79]

#### **TEFZEL® Fluorpolymer Resin – Properties Handbook, DuPONT® 2003**

Das ETFE-Handbuch (TEFZEL® Fluorpolymer Resin – Properties Handbook, DuPONT® 2003 [45]) enthält Untersuchungsergebnisse, die nicht an Folien, sondern an spritzgegossenen, prismatischen Probekörpern aus unterschiedlichen ETFE-Granulaten gewonnen wurden.

Eine wesentliche Erkenntnis resultiert aus den beiden Spannungs-Dehnungs-Diagrammen für Druck- und Zugbeanspruchung eines prismatischen Probekörpers aus dem Granulat TEFZEL® 200 (s. Abb. 2.1) (Anm.: Die mechanischen Eigenschaften einer Folie aus dem Granulat TEFZEL® 200 kommen denen der Folie aus dem Granulat DYNEON® ET 6235 (HOSTAFLON® ET 6235) nahe [77]). Die Spannungs-Dehnungsbeziehung ist demnach speziell unter Verwendung dieses Granulats für Zug- und Druckbeanspruchung ähnlich. Dies bedeutet eine näherungsweise achsensymmetrische Fließbedingung (bezogen auf die Winkelhalbierende im II und IV Quadranten des Hauptspannungsdiagramms ( $\sigma_I - \sigma_{II}$  - Diagramm, vgl. Anhang D, Abb. D 18 und Kap. 4, Abb. 4.60).

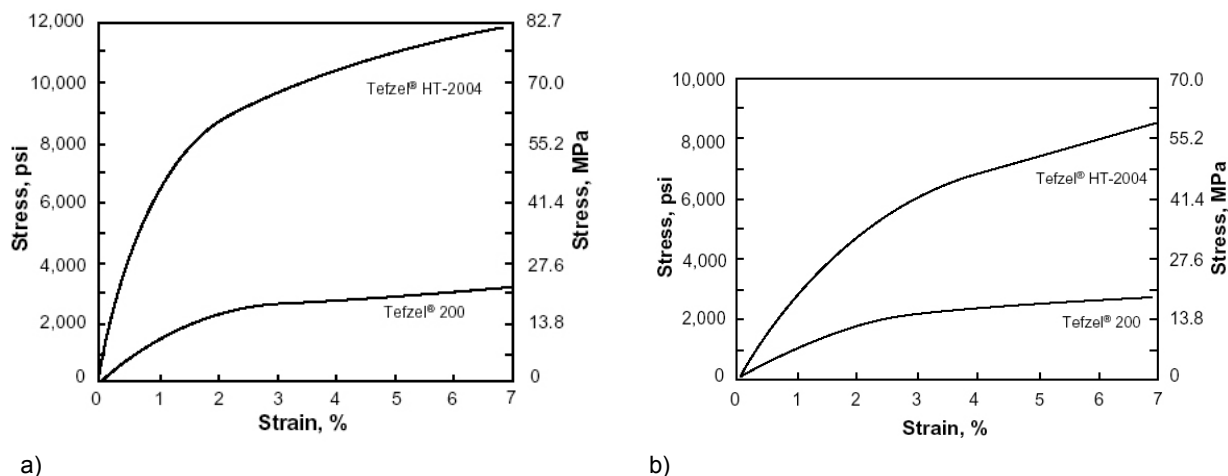


Abb. 2.1 Spannungs-Dehnungsdiagramme bei +23°C für spritzgegossene prismatische ETFE-Probekörper (Granulate: DuPont® TEFZEL® HT-2004 und DuPont® TEFZEL® 200: a) Zug und b) Druck [45]

**HOECHST HIGH CHEM® - HOSTAFILON® ET 6235 Informationsblätter und Broschüren, HOECHST®, z.B. 1983, 1991 etc.**

Bis zum Jahr 2000 wurde fast ausnahmslos die Folie HOSTAFILON® ET 6235 im Membranbau verwendet. Sie ist nach Herstellerangaben [77] mit dem von NOWOFOL® unter dem Handelsnamen NOWOFILON® ET 6235 angebotenen Produkt identisch.

Aus den Informationsblättern und Broschüren zur ETFE-Folie HOSTAFILON® ET 6235 (z.B. HOECHST HIGH CHEM® - Ausgabe August 1984 [79]) vom Unternehmen HOECHST® (heute DYNELON®, Teil der Unternehmensgruppe 3M®) gehen viele mechanische, optische und bauphysikalische Eigenschaften der Folie hervor, u.a. zur Weiteißfestigkeit, Dimensionstreu bei Lagerung im Wasser, Lichttransmission, Reflektion und Absorption sowie zum Brandverhalten und Temperaturschrumpf.

In Kap. 4 werden die vorliegenden Herstellerangaben über die monoaxialen Kurzzeitzugversuche bei 23° C am Material HOSTAFILON® ET 6235 – transparent – detailliert dargestellt, analysiert und mit eigenen Prüfungen verglichen.

Das Diagramm in Abb. 2.2 zeigt die nach der amerikanischen Norm ASTM D 1708 gemessene Spannung bei 10 % Dehnung (nahe der Fließgrenze), die Zugfestigkeit und die Bruchdehnung, aufgetragen über die Temperatur (von -50° C bis +200° C). Die Abhängigkeiten der Fließgrenze und der Bruchgrenze von der Temperatur sind also seit vielen Jahren bekannt. Bislang wurden sie aber nur für monoaxiale Beanspruchungen gezeigt. Der Einfluss der Dehngeschwindigkeit auf die Kennwerte ist bis heute nicht umfassend dokumentiert.

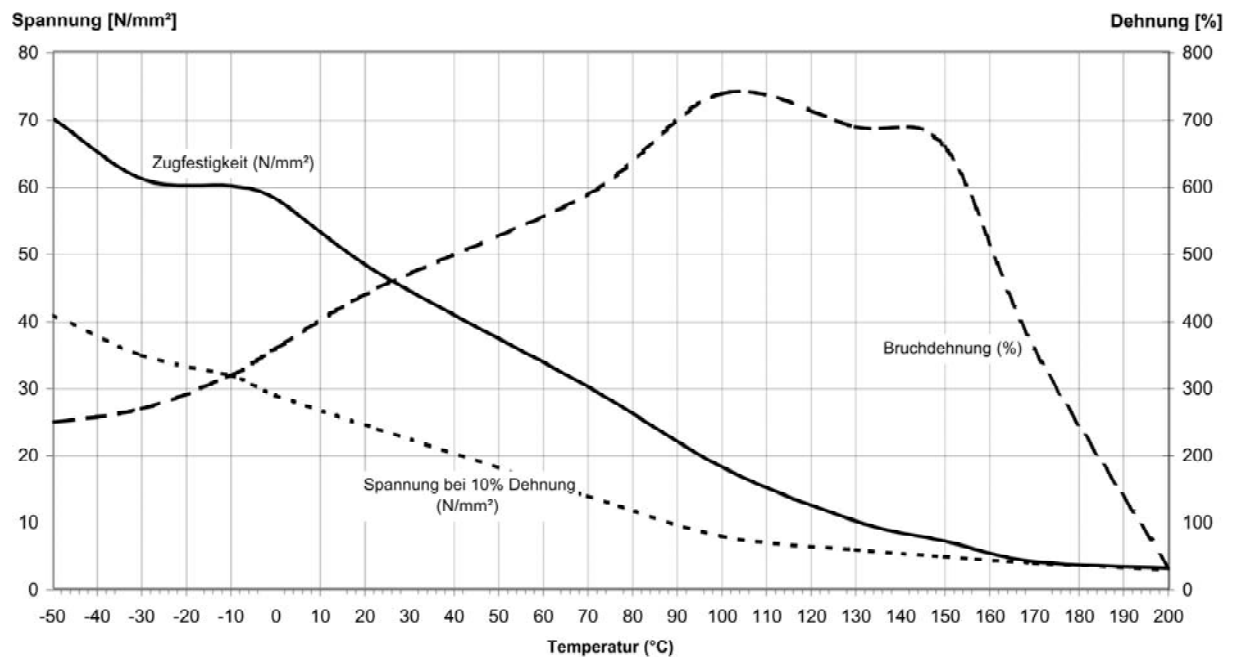


Abb. 2.2 Prinzipielles Verhalten der Zugfestigkeit, der Bruchdehnung und der Spannung bei 10 % Dehnung in Abhängigkeit von der Temperatur, gemessen an Streifenproben in monoaxialen Zugversuchen nach ASTM D 1708, ETFE-Folie<sup>®</sup> HOSTAFILON ET 6235 – transparent, 200  $\mu\text{m}$ , Herstellerangaben<sup>®</sup> HOECHST (heute<sup>®</sup> DYNEON) 1991 [79]

## 2.2.2 Weitere Prüfungen

Die meisten Projekte mit ETFE-Folien wurden in Deutschland realisiert (s. Abb. 1.9). Hier wurden auch wesentliche Erkenntnisse über ihr mechanisches Werkstoffverhalten gewonnen.

Gewebemembranen und auch Folien sind hierzulande im Normalfall als nicht geregelte Baustoffe bzw. Bauarten nach Bauregelliste (in Verbindung mit der Bauproduktenrichtlinie) eingestuft, für die das Bauordnungsrecht die Beantragung einer Zustimmung im Einzelfall (Z.i.E.) vorsieht. Etliche Werkstoffdaten der ETFE-Folien stammen daher aus Materialprüfungen, die im Rahmen eines solchen behördlichen Verfahrens durch den Antragsteller, i.d.R. das ausführende Unternehmen, an Laboren beauftragt wurden. Im Folgenden werden die Ergebnisse und die daraus abgeleiteten Erkenntnisse kurz vorgestellt.

### 2.2.2.1 Versuchsprogramm bei 23°C der Universität Duisburg-Essen (SAXE) 2002

Für das Bauvorhaben der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) 2002 wurden an der Universität Duisburg Essen Prüfungen an der Folie NOWOFLON® ET 6235 ( $d = 225 \mu\text{m}$ ) unter der Leitung von Dipl.-Ing. SAXE durchgeführt. Diese beinhalteten monoaxiale Prüfungen der Folie und ihrer Rand- und Teilflächenverbindungen, biaxiale Kurzzeittests, zyklische biaxiale Lastwiederholungsversuche sowie monoaxiale Dauerlastversuche über 1.000 Stunden (Kriechversuche). Die Versuche erfolgten bei der Prüftemperatur  $T = +23^\circ\text{C}$ . In SAXE 2002 [162], BARTHEL und BURGER 2002 [10] sowie in BARTHEL, BURGER und SAXE 2003 [9] sind die Ergebnisse in Auszügen dargestellt.

**Biaxialversuche (Spannungsverhältnis 1:1, kraftgesteuert ( $v_T = 0,2 \text{ (kN/m)/s}$ ),  $T = +23^\circ\text{C}$ , Maximalspannung:  $26,7 \text{ N/mm}^2$  ( $6 \text{ kN/m}$ ))**

Die Schlussfolgerungen aus [9] sind im Folgenden genannt:

- Das Material verhält sich nahezu isotrop und bei kurzzeitiger Belastung mindestens bis zu einer Spannung von etwa  $13,3 \text{ N/mm}^2$  ( $3 \text{ kN/m}$ ) näherungsweise linear elastisch (s. Abb. 2.3).

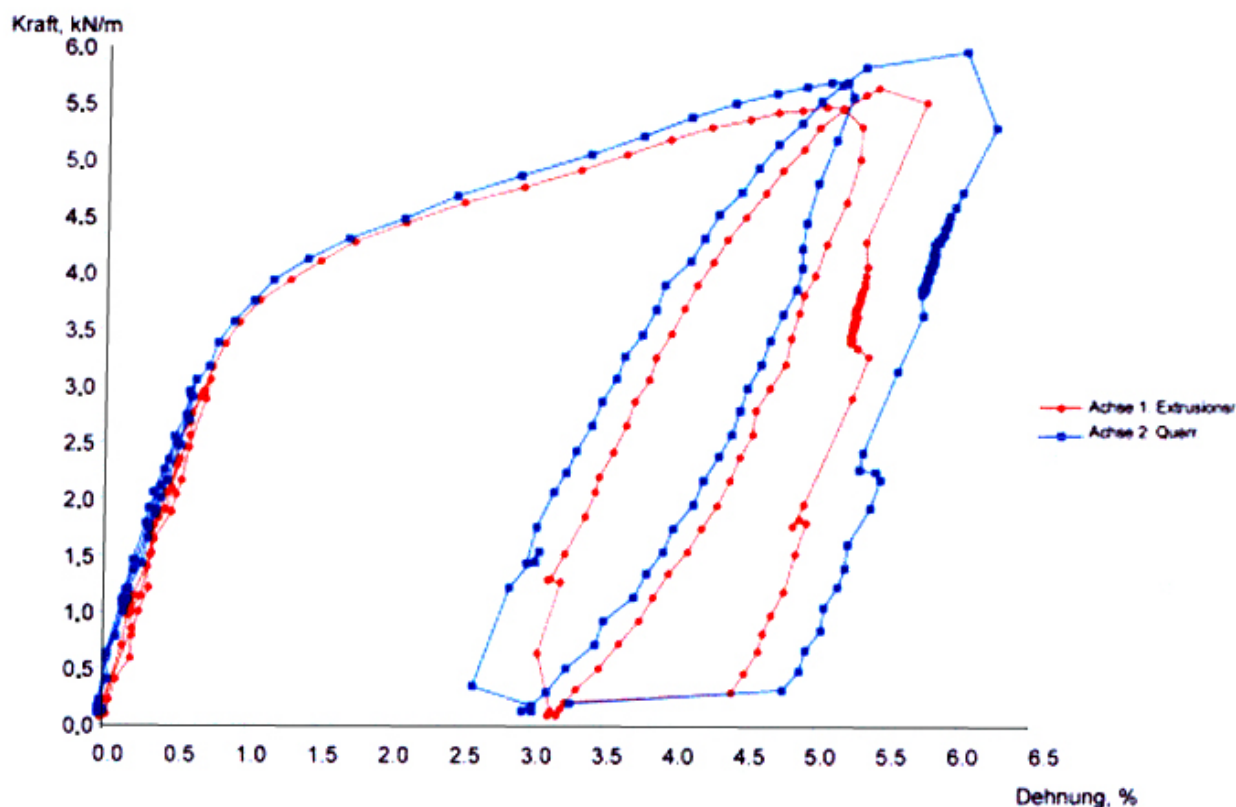


Abb. 2.3 Biaxiales Spannungs-Dehnungsdiagramm, Spannungsverhältnis 1:1, zweimalige Belastung bis zur Maximallast  $6,0 \text{ kN/m}$  ( $26,7 \text{ N/mm}^2$ ), NOWOFLON® ET 6235  $225 \mu\text{m}$ , SAXE 2002 [162]

- Zwischen 13,3 und 17,8 N/mm<sup>2</sup> (4 kN/m) flacht die Spannungs-Dehnungskurve deutlich ab. Der Verlauf ist durch eine verstärkte Dehnungszunahme mit zunehmend plastischen Verformungsanteilen gekennzeichnet. Ein Verformungsmodul ist hier nicht mehr als Elastizitätsmodul definiert.
- Ab 17,8 N/mm<sup>2</sup> stellt sich ein weiterer näherungsweise linearer Verlauf ein, der jedoch deutlich flacher ist. Jede Laststeigerung führt zu einer ausgeprägten Dehnungszunahme, die nach einer vollständigen Entlastung über einen Zeitraum von 24 Stunden nur geringfügig zurückgebildet wurde.
- Der aus den Versuchen bestimmte Wert für die Querkontraktionszahl beträgt 0,45. Bei monoaxialer Beanspruchung tritt daher eine starke Einschnürung auf, wenn die Querdehnung nicht behindert wird. Der Elastizitätsmodul kann daher nicht in monoaxialen Versuchen bestimmt werden.
- Der Elastizitätsmodul ist abhängig von der Belastungsgeschichte. Bei Erstbelastung verhält sich das Material deutlich steifer, als nach einigen Vorbelastungen. Durch lineare Regression der Messwerte im linear elastischen Bereich wurde nach einigen Vorbelastungen ein Elastizitätsmodul von 650-700 N/mm<sup>2</sup> ermittelt.
- Relaxationswerte konnten auf Grund der kraftgesteuerten biaxialen Prüfeinrichtung nicht direkt ermittelt werden, können jedoch im Umkehrschluss aus den Werten für das Kriechen abgeleitet werden.

**Monoaxiale Dauerlastversuche (Kriechversuche, Dauer 1.000 h, T ≅ +23°C, b = 100 mm, l<sub>0</sub> = 200 mm, Belastungen: 5,3, 8,0 und 10,7 N/mm<sup>2</sup>, Rückdehnungsversuch (Entlastung) über 96 h)**

- Die Dehnungen nähern sich, abhängig von der Größe der Last, einem Endwert. Die Dehnungszunahme nimmt mit zunehmendem Lastniveau überproportional zu. Dies gilt gleichermaßen für die nach der Entlastung im Probestreifen verbleibenden Dehnungen (Rückdehnungsversuch, s. Abb. 2.4).

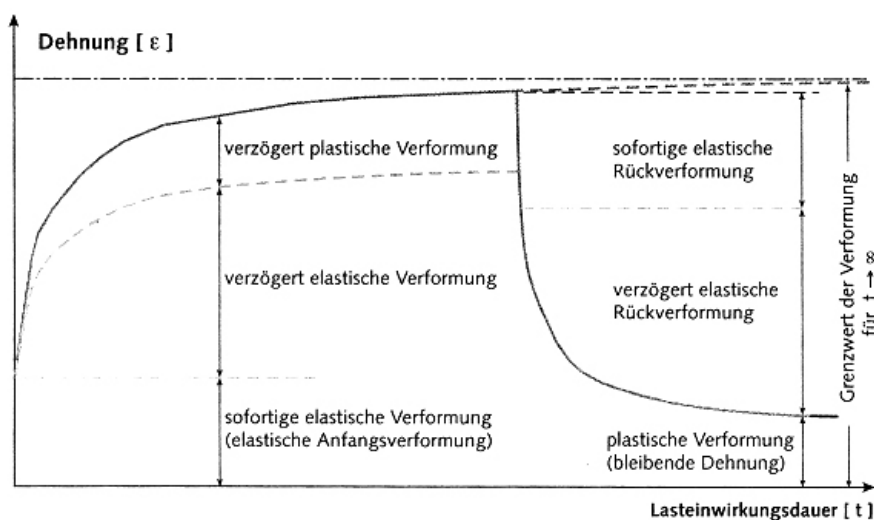


Abb. 2.4 Separierung der im Kriech- und Rückdehnungsversuch ermittelten Anteile der elastischen, verzögert elastischen und plastischen Dehnung (auf ETFE-Folie angewendet) entsprechend dem rheologischen 4-Parameter-Modell; BARTHEL, BURGER und SAXE 2003 [9]

- Die Gesamtverformungen setzen sich aus sofortigen und verzögert elastischen Anteilen, sowie aus sofortigen und verzögert plastischen Anteilen zusammen (s. Abb. 2.4). Das Material zeigt einen ausgeprägten Anteil an verzögert elastischer Verformung, die erst nach der Entlastung über einen längeren Zeitraum zurückgeht. Bei einem Lastniveau von ungefähr 40 % der Elastizitätsgrenze geht die Verformung nach einiger Zeit wieder vollständig zurück.

**Monoaxiale Lastwiederholungsversuche (kraftgesteuert ( $v_T = 0,2$  (kN/m)/s),  $b = 100$  mm,  $l_0 = 200$  mm,  $T = +23^\circ\text{C}$ , fünfmalige Belastung auf  $17,8$  N/mm<sup>2</sup>, 24 h Entlastung, fünfmalige Belastung auf  $17,8$  N/mm<sup>2</sup>, 72 h Entlastung)**

- Bei wiederholten Belastungen über den linear elastischen Bereich hinaus auf den Spannungswert von  $17,8$  N/mm<sup>2</sup> ( $4$  kN/m) nehmen die Dehnungen mit zunehmender Wiederholung der Belastung zu. Die Dehnungszunahme wird mit zunehmender Lastspielzahl jedoch geringer. Die Versuche ergaben, dass die bleibenden Dehnungen in Querrichtung etwas größer zu erwarten sind, als in Extrusionsrichtung.
- Die Lastwiederholungsversuche lassen auch nach eingetretenen plastischen Verformungen aus der Erstbelastung auf einen gemeinsamen Endwert der Verformungen unter Dauerlast schließen.

**Monoaxiale Kurzzeitzugversuche (kraftgesteuert ( $v_T = 0,2$  (kN/m)/s),  $b = 100$  mm,  $l_0 = 200$  mm,  $T = +23^\circ\text{C}$ )**

- Es wurden mittlere Zugfestigkeiten von  $39,1$  N/mm<sup>2</sup> (Extrusionsrichtung) und  $40,3$  N/mm<sup>2</sup> (Querrichtung) gemessen. Die Bruchdehnungen waren mit  $340$  % (im Mittel) geringer, als nach den vorhandenen monoaxialen Bruchversuchen zu erwarten war. Dies ist jedoch wegen der ausgeprägten Querkontraktion des Materials auf den Einfluss der Probenbreite zurückzuführen, die bei den hier durchgeführten Versuchen etwa um den Faktor  $6,7$  größer war, als bei den zur Verfügung gestellten Versuchen des Folienherstellers.
- Die Kurvenverläufe lassen ein äußerst gutmütiges Materialverhalten erkennen. Nach dem Erreichen der Proportionalitätsgrenze lässt sich die Last vor dem Bruch noch auf den fast dreifachen Wert steigern.
- Bei erkennbarem Anriss der Probestreifen wurde der Versuch zunächst angehalten, um den Rissfortschritt zu beobachten. Hierbei war festzustellen, dass der Riss bei gleich bleibender Beanspruchung nicht fortschreitet. Ein weiterer Rissfortschritt und der Bruch des Probestreifens treten erst nach weiterer Laststeigerung ein.

Die Einflüsse von Temperatur, Dehngeschwindigkeit und Spannungsverhältnis auf die mechanischen Eigenschaften wurden in diesem Versuchsprogramm nicht untersucht.

Neben den dargestellten Untersuchungsergebnissen wurde seit Beginn der Technologie sicherlich eine Vielzahl weiterer mechanischer, optischer und bauphysikalischer Untersuchungen durchgeführt. Diese Untersuchungen wurden bislang jedoch nicht veröffentlicht.

### 2.2.2.2 Versuchsprogramm der University of Bath (ANSELL) 1985

1985 wurde von ANSELL [3], University of Bath, im Auftrag des BURO HAPPOLD CONSULTING ENGINEERS eine Studie zur Untersuchung der mechanischen Eigenschaften von ETFE-Folie zur Anwendung in der Gebäudehülle durchgeführt. Sie stand im Zusammenhang mit dem seinerzeit in Planung befindlichen Gebäudekomplex Basildon Town Square. Es wurden monoaxiale Kurzzeitzugversuche, Weiterreißtests und Kriechversuche an produktionsfrischem Material sowie an solchem, das zuvor acht Wochen in destilliertem Wasser bei 105°C gekocht wurde, durchgeführt. Die Weiterreißtests erfolgten zudem an zuvor mehrmals geknickten Proben. Darüber hinaus wurden der E-Modul, die Fließspannung und die Fließdehnung mit einem Extensometer gemessen und der Schmelzpunkt mit dem Verfahren der **Differential Scanning Calorimetry (DSC)** ermittelt. Das untersuchte Material war HOSTAFLO<sup>®</sup> ET 6235 – transparent ( $d = 100 \mu\text{m}$  und  $300 \mu\text{m}$ ).

#### Monoaxiale Kurzzeitzugversuche bei unterschiedlichen Temperaturen

Die Prüfbedingungen sind nach ANSELL [3] in Tab. 2.1 angegeben:

<b>Hersteller</b>	HOECHST <sup>®</sup>
<b>Material</b>	HOSTAFLO <sup>®</sup> ET 6235, transparent
<b>Ort</b>	University of Bath (GB)
<b>Prüfer</b>	ANSELL, M. P.
<b>Datum</b>	1985
<b>Prüfart</b>	monoaxial
<b>Maschine</b>	Zwick
<b>Norm</b>	British Standard BS 2782: Part 3:1970, Method 301E
<b>Probenbreite b</b>	12,5 mm
<b>Probendicke d</b>	300 $\mu\text{m}$
<b>Messlänge <math>L_0</math></b>	?
<b>Anfangsabstand der Einspannklemmen L</b>	?
<b>Prüfgeschwindigkeit <math>v_T</math></b>	5 mm/min
<b>Temperatur T</b>	23° C (Raumtemperatur), 21°, 37°, 63°, 84°, 93° und 105° C
<b>Probenanzahl gesamt</b>	19
<b>Probenanzahl <math>n_{23^\circ\text{C E}}</math>, <math>n_{23^\circ\text{C Q}}</math></b>	5/5 (E = Extrusionsrichtung / Q = Querrichtung)
<b>Probenanzahl <math>n_{x^\circ\text{C E}}</math>, <math>n_{x^\circ\text{C Q}}</math></b>	2/0 (21°C bis 63°C) und 1/0 (84°C bis 105°C)

Tab. 2.1 Probekörperabmessungen und Versuchsbedingungen, monoaxiale Zugversuche bei unterschiedlichen Temperaturen, HOSTAFLO<sup>®</sup> ET 6235 - transparent, ANSELL, University of Bath 1985 [3]

Bei T = +23°C (Raumtemperatur) ergaben sich folgende Mittelwerte der Höchstzugkraft\* (maximum tensile force, max. stress): in Extrusionsrichtung (MD = machine direction):  $\max \sigma_{MD} = 17,59 \text{ N/mm}^2$ ; in Querrichtung (TD = transversal direction):  $\max \sigma_{TD} = 16,56 \text{ N/mm}^2$ . In Tab. 2.2 sind die Ergebnisse der entsprechenden Versuche in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt. Abb. 2.5 zeigt die über die Temperatur aufgetragenen Fließspannungen.

Probe	Temperatur	max. Spannung $\max \sigma$	Kommentar ANSELL
Nr.	°C	N/mm <sup>2</sup>	
1	21	18,62	geflossen
2	21	18,57	
3	37	14,60	
4	37	14,37	
5	63	~ 7,7	Proben erreichen keine maximale Spannung, "Yield is recoverable"
6	63	~ 7,7	
7	84	~ 3,9	
8	93	~ 3,9	
9	105	~ 2,8	

Tab. 2.2 Ergebnisse der Kurzzeitzugtests (nur in Extrusionsrichtung durchgeführt), HOSTAFロン® ET 6235 - transparent, d = 300 µm, ANSELL, University of Bath 1985 [3]

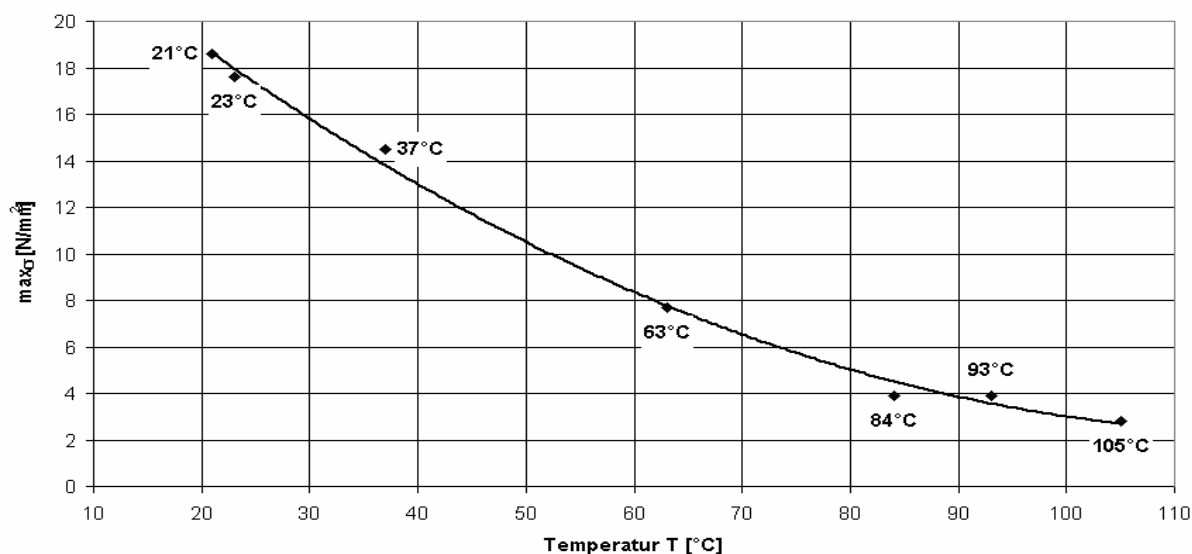


Abb. 2.5 Maximale Spannung in Abhängigkeit von der Temperatur,  $v_T = 5 \text{ mm/min}$ , monoaxiale Kurzzeitzugversuche in Extrusionsrichtung, HOSTAFロン® ET 6235 - transparent, d = 300 µm, Diagramm auf der Basis von Daten von ANSELL, University of Bath 1985 [3]

\* Anmerkung: Entsprechend Prüfbericht wiesen alle Proben eine wenig ausgeprägte Fließgrenze auf, was auf die sehr kleine Prüfgeschwindigkeit von 5 mm/min zurückzuführen ist. Die geringe Prüfgeschwindigkeit lässt eine niedrige Fließspannung und auch Bruchspannung erwarten. Die Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von der Dehngeschwindigkeit war ANSELL offensichtlich nicht bekannt. Die Methode der Fließgrenzendefinition ist ebenso wie die Probenlänge nicht dokumentiert. Er gibt nicht an, ob die Proben bis zum Bruch gefahren wurden. Es ist daher nicht erkennbar, ob ANSELL mit Höchstzugkraft ein Versagen der Probe durch Bruch oder durch Fließen meint.



### Monoaxiale Kurzzeitzugversuche nach achtwöchiger Lagerung in 105°C heißem, destilliertem Wasser

Die Lagerung erfolgte in destilliertem Wasser bei 105°C [3]. Es wurden jeweils sechs Proben nach 9, 19, 29, 36, 42, 50 und 56 Tagen entnommen (je 3 Proben á 100 µm und 300 µm). Lediglich die 300 µm dicken Proben wurde anschließend bei T = 23°C (Raumtemperatur) nach den o.g. Prüfbedingungen der Kurzzeitzugversuche monoaxial belastet (s. Tab. 2.1).

Tab. 2.3 zeigt die Ergebnisdaten, Abb. 2.6 zeigt die über die vorherige Lagerungsdauer aufgetragenen Maximalspannungen. Als Mittelwert ergibt sich  $\max \sigma_{mean, 105^\circ C} = 19,21 \text{ N/mm}^2$ .

Probe	max $\sigma$	Mittelwerte max $\sigma$	Anzahl der Tage in 105°C heißem Wasser
Nr.	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	-
A4	19,18	19,41	9
A5	20,19		
A6	18,87		
B4	18,95	18,50	19
B5	18,46		
B6	18,10		
C4	17,56	19,54	29
C5	20,24		
C6	20,83		
D4	19,03	18,90	36
D5	19,11		
D6	18,57		
E4	20,81	20,33	42
E5	19,31		
E6	20,88		
F4	20,21	19,11	50
F5	18,77		
F6	18,36		
G4	18,93	18,74	56
G5	18,21		
G6	19,08		

Tab. 2.3 Ergebnisse der Kurzzeitzugtests nach Lagerung in 105°C heißem Wasser (nur in Extrusionsrichtung durchgeführt), HOSTAFロン® ET 6235 - transparent, d = 300 µm, ANSELL, University of Bath 1985 [3]

ANSELL zieht den Schluss, dass die Dauer der Lagerung in kochendem Wasser keinen Einfluss auf die Maximalspannung und somit keine schädigende Wirkung hat. Er merkt an, dass der durchgeführte Versuch einen sehr strengen Test darstellt, der bei anderen Polymerwerkstoffen, z.B. bei Polyesterfasern oder weichmacherhaltigen PVC-Folien, deutliche Verschlechterungen der Eigenschaften bewirkt. Die entnommenen Proben zeigten augenscheinlich auch keine farbliche Veränderung. Allerdings stellt er im Vergleich mit dem Mittelwert der Maximalspannungen der ungekochten Proben fest, dass diese etwas geringer sind. Er erwartet aber, dass die Festigkeit der Folie HOSTAFLON® ET auch durch klimatische Bedingungen, die denen von heißem Dampf ähnlich sind, nicht beeinträchtigt wird.

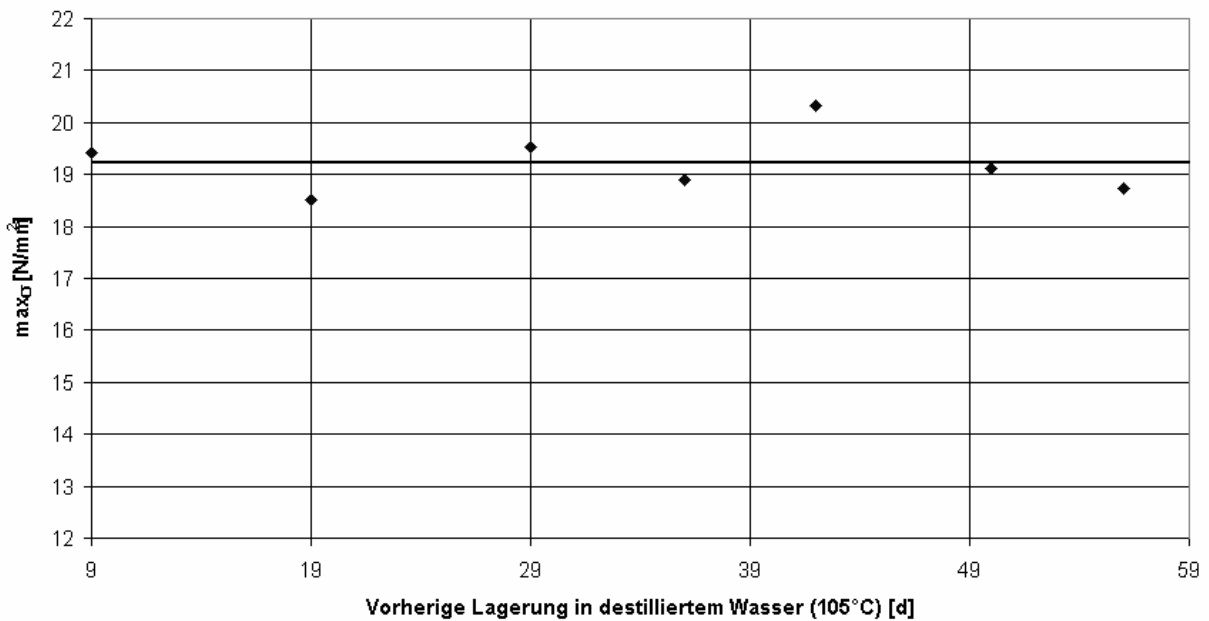


Abb. 2.6 Maximalspannung (Mittelwerte und lineare Regression) in Abhängigkeit von der vorherigen Lagerungsdauer in destilliertem Wasser bei 105°C, Entnahme nach 9, 19, 29, 36,42, 50 und 56 Tagen, monoaxiale Kurzzeitzugversuche in Extrusionsrichtung bei  $T = 23^{\circ}\text{C}$  (Raumtemperatur),  $v_T = 5 \text{ mm / min}$ , HOSTAFLON® ET 6235 - transparent,  $d = 300 \mu\text{m}$ , Diagramm auf der Basis von Daten von ANSELL, University of Bath 1985 [3]

### Monoaxiale Kurzzeitzugversuche nach 51-tägiger Bestrahlung mit gefiltertem Xenon-Bogenlicht

Eine Xenonbogenlampe mit geeigneter Filterung simuliert die terrestrische Sonnenstrahlung im sichtbaren und ultravioletten Wellenlängenbereich mit ähnlicher spektraler Verteilung. Heute ist die Bestrahlung mit Xenonbogenlicht zur Abschätzung von Alterungseffekten infolge Sonnenstrahlung definiert nach DIN EN ISO 4892-2: 11/2000 (bzw. Entwurf v. 10/2003) - Künstliches Bestrahlen oder Bewittern in Geräten - Teil 2: Gefilterte Xenonbogenstrahlung.

Die in Bath durchgeführte Bestrahlung wurde nach dem Versuchsaufbau als Original-Hanau-Sonnentest bezeichnet. Es wurden zwei Lampen mit einer Leistungsabgabe von je  $1.000 \text{ W/m}^2$  im Wellenlängenbereich zwischen 300 und 830 nm verwendet.

Die Bestrahlung erfolgte 51 Tage lang an 100  $\mu\text{m}$  und 300  $\mu\text{m}$  dicken Proben der Folie HOSTAFLO<sup>®</sup> ET 6235 – transparent. Anschließend wurden Kurzzeitzugversuche unter den o.g. Prüfbedingungen an 5 Proben ( $d = 300 \mu\text{m}$ ) bei  $T = +23^\circ\text{C}$  (Raumtemperatur) durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tab. 2.4 dargestellt.

Probe	Maximalspannung max $\sigma$	Mittelwert max $\sigma$
Nr.	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
UV 1	19,06	19,43
UV 2	20,73	
UV 3	19,06	
UV 4	19,34	
UV 5	18,95	

Tab. 2.4 Ergebnisse der Kurzzeitzugtests nach 51-tägiger Bestrahlung mit Xenonbogenlampen (2 x 1.000 W/m<sup>2</sup>, nur in Extrusionsrichtung durchgeführt), HOSTAFLO<sup>®</sup> ET 6235 - transparent,  $d = 300 \mu\text{m}$ , ANSELL, University of Bath 1985 [3]

Die durchgeführte UV-Bestrahlung hatte nach ANSELL keinen Einfluss auf die maximale Spannung.

### Messungen des E-Moduls, der Fließspannung und der Fließdehnung im Zugversuch mit einem Extensometer (INSTRON 1195)

In Tab. 2.5 sind die technischen Daten des Gerätes INSTRON 1195 dargestellt:

Load Cells	5 N - 100 KN
Crosshead Speed Range	0.5 - 500 mm/min
Return Speed	500 mm/min
Crosshead Speed Accuracy	$\pm 0.1 \%$ of Set Speed
Space between Columns	560 mm
Testing Type	Tension and Compression
Drive Unit	Lead Screws

Tab. 2.5 Technische Daten des Extensometers INSTRON 1195, Herstellerangaben

Die Messungen im Zugversuch ergaben folgende Werte: E-Modul: 460 N/mm<sup>2</sup>; Fließspannung: 13,08 N/mm<sup>2</sup> und Fließdehnung: 2,87 %. ANSELL beschreibt eine Spannungs-Dehnungskurve, die unterhalb von etwa 2,6 N/mm<sup>2</sup> und oberhalb von etwa 12,9 N/mm<sup>2</sup> nichtlinear ist. Dazwischen ist sie linear. Um das elastische Verhalten bei mehrmaliger Belastung unterhalb der Fließgrenze zu untersuchen, belastete er anschließend einen zweiten Probekörper zwanzig Mal mit 90 % der Fließspannung (11,6 N/mm<sup>2</sup>). Die Aufzeichnungen des Extensometers ergaben ein vollständig reversibles Verhalten mit einer geringen Hysterese.

## Messungen des Weiterreißwiderstandes

Es wurden Messungen des Weiterreißwiderstandes an produktionsfrischen Proben (50 x 50 mm) durchgeführt, die in der Mitte geschlitzt waren (ohne Normangabe). Die Ergebnisse der drei Testreihen sind in Tab. 2.6 dargestellt (1 kgf (kilogramm-force) = 9,81 N):

Vor- behand- lung	Dicke d	Richtung	Weiterreißkraft F		Weiterreißwiderstand F/d (d = 0,3 mm)	
	µm	E / Q	kgf	N	N/mm	N/mm (Mittelwert)
Produktionsfrische Proben	300 L2T	E	22,2	217,78	725,7	699,5
	300 L3T	E	22,2	217,78	725,7	
	300 L4T	E	21,8	213,86	712,6	
	300 L5T	E	20,8	204,05	680,0	
	300 L6T	E	20,2	198,16	660,3	
	300 T1T	Q	20,0	196,20	653,7	657,0
	300 T2T	Q	20,1	197,18	657,0	
	300 T3T	Q	20,1	197,18	657,0	
	300 T4T	Q	20,2	198,16	660,3	
	300 T5T	Q	20,0	196,20	653,7	

Tab. 2.6 Weiterreißwiderstand der produktionsfrischen Proben, T = 23°C, HOSTAFLO<sup>®</sup> ET 6235 - transparent, d = 300 µm, ANSELL, University of Bath 1985 [3]

Anschließend wurden Weiterreißtests an Proben durchgeführt, die zuvor 44 Tage in destilliertem Wasser bei 105°C gekocht wurden (s. Tab. 2.7).

Vor- behand- lung	Dicke d	Richtung	Weiterreißkraft F		Weiterreißwiderstand F/d (d = 0,1 mm)	
	µm	E / Q	kgf	N	N/mm	N/mm (Mittelwert)
Proben nach Lagerung in 105°C heißem destilliertem Wasser	100 L1T	E	7,86	77,08	770,8	865,9
	100 L2T	E	8,33	81,70	817,0	
	100 L3T	E	8,32	81,59	815,9	
	100 L4T	E	9,32	91,40	914,0	
	100 L5T	E	9,78	95,91	959,1	
	100 L6T	E	9,40	92,18	921,8	
	100 T1T	Q	7,16	70,22	702,2	707,1
	100 T2T	Q	7,32	71,78	717,8	
	100 T3T	Q	6,73	66,00	660,0	
	100 T4T	Q	7,32	71,78	717,8	
	100 T5T	Q	7,58	74,33	743,3	
	100 T6T	Q	7,12	69,82	698,2	

Tab. 2.7 Weiterreißwiderstand bei T = 23°C nach 44 Tagen in destilliertem Wasser bei 105°C, HOSTAFLO<sup>®</sup> ET 6235 - transparent, d = 300 µm, ANSELL, University of Bath 1985 [3]

Abschließend wurden Weiterreißversuche an geknickten Proben durchgeführt. Hier wurden die Proben in der Schnittlinie gefaltet und für 10 Sekunden mit einem 10 kg schweren Gewicht belastet. Danach wurden die Proben in die andere Richtung gefaltet und wieder mit dem Gewicht für 10 Sekunden belastet. Diese Prozedur wurde zweimal wiederholt, so dass die Probe insgesamt viermal gefaltet und belastet wurde. Danach wurde der Weiterreißversuch gestartet (s. Tab. 2.8).

Vor- behand- lung	Dicke d	Richtung	Weiterreißkraft F		Weiterreißwiderstand F/d (d = 0,1 bzw. 0,3 mm)	
	µm	E / Q	kgf	N	N/mm	N/mm (Mittelwert)
Proben nach Knickbeanspruchung	100 L7T	E	9,33	91,53	915,3	885,6
	100 L8T	E	8,65	84,86	848,6	
	100 L9T	E	9,12	89,47	894,7	
	300 L7T	E	23,4	229,55	765,5	735,8
	300 L8T	E	22,9	224,65	748,8	
	300 L9T	E	21,2	207,97	693,2	

Tab. 2.8 Weiterreißwiderstand bei T = 23°C nach viermaliger Knickbeanspruchung, HOSTAFロン® ET 6235 - transparent, d = 300 µm, ANSELL, University of Bath 1985 [3]

Die Messungen der bei 105°C gekochten Proben (s. Tab. 2.7) zeigten sowohl in Extrusionsrichtung als auch in Querrichtung einen höheren Weiterreißwiderstand als die Messungen an produktionsfrischen Folien (s. Tab. 2.6). Dies entspricht den Ergebnissen der Kurzzeitzugversuche mit und ohne Temperaturbeanspruchung. Die Knickbeanspruchung zeigte ebenfalls keinen verminderten, sondern einen erhöhten Weiterreißwiderstand (s. Tab. 2.8).

In Deutschland wird der Weiterreißwiderstand heute nach DIN ISO 34 – Teil 1: 2004-07: Bestimmung des Weiterreißwiderstandes - Teil 1: Streifen-, winkel-, und bogenförmige Probekörper [N25] bzw. speziell bei Folien nach DIN 53 363:2003-10: Prüfung von Kunststofffolien - Weiterreißversuch an trapezförmigen Proben mit Einschnitt [N10], ermittelt. Da die in Bath ermittelten Werte deutlich höher liegen, als die des Herstellers NOWOFOL®, müssen erhebliche Differenzen in den Versuchsbedingungen angenommen werden. Die Ergebnisse von ANSELL sind aber für eine vergleichende Betrachtung der produktionsfrischen Proben mit den vorbeanspruchten Proben aussagekräftig.

### Monoaxiale Kriechversuche bei 40°C, 60°C und 100°C

Es wurden in einer Klimakammer monoaxiale Kriechversuche mit konstanter Spannung an Streifenproben in Extrusions- und Querrichtung bei drei Temperaturstufen durchgeführt: 40°C (99 % rel. Luftfeuchte), 60°C (trockene Luft) und 100°C (trockene Luft). Die Versuchsbedingungen sind in Tab. 2.9 aufgeführt.

<b>Hersteller</b>	HOECHST®
<b>Material</b>	HOSTAFILON® ET 6235, transparent
<b>Ort</b>	University of Bath (GB)
<b>Prüfer</b>	ANSELL, M. P.
<b>Datum</b>	1985
<b>Prüfart</b>	Kriechversuche monoaxial
<b>Norm</b>	
<b>Belastung <math>\sigma = \sigma_0</math></b>	5 N/mm <sup>2</sup>
<b>Probendicke <math>d_0</math></b>	100 $\mu\text{m}$ und 300 $\mu\text{m}$
<b>Messlänge <math>l_0</math></b>	250 mm
<b>Probenbreite <math>b_0</math></b>	33 mm
<b>Temperatur T</b>	40°C (99 % rel. Luftfeuchte), 60°C und 100°C (trockene Luft)
<b>Probenanzahl gesamt</b>	12
<b>Probenanzahl <math>n_{40^\circ\text{C E}}</math>, <math>n_{40^\circ\text{C Q}}</math></b>	2/2 (E = Extrusionsrichtung / Q = Querrichtung)
<b>Probenanzahl <math>n_{60^\circ\text{C E}}</math>, <math>n_{60^\circ\text{C Q}}</math></b>	2/2 (E = Extrusionsrichtung / Q = Querrichtung)
<b>Probenanzahl <math>n_{100^\circ\text{C E}}</math>, <math>n_{100^\circ\text{C Q}}</math></b>	2/2 (E = Extrusionsrichtung / Q = Querrichtung)

Tab. 2.9 Probekörperabmessungen und Versuchsbedingungen, monoaxiale Kriechversuche bei 40°C, 60°C und 100°C, HOSTAFILON® ET 6235 - transparent, d = 100  $\mu\text{m}$  und 300  $\mu\text{m}$ , ANSELL, University of Bath 1985 [3]

Die Dehnungen sind in Tab. 2.10 dargestellt, und in Abb. 2.7 über die logarithmische Zeitachse aufgetragen. Die Versuche bei 40°C wurden 46 Tage (1.104 h) aufgezeichnet. Der Prüfbericht wurde verfasst, als die Versuche bei 60°C gerade 19 Tage (456 h) liefen. Die weiteren Messdaten sind nicht überliefert.

Die Versuche bei 100°C wurden nach 4 Stunden abgebrochen, weil die Folie schnell floss, und den Boden der Klimakammer erreichte.

Der erste bei 40°C gemessene Dehnungswert (nach 2 Tagen) war größer als die folgenden. Da offensichtlich ein Messfehler vorlag, wurden die Werte zwar in die Tabelle übernommen, aber nicht im Diagramm dargestellt. Die Dehnungen in Querrichtung waren jeweils größer, als in Extrusionsrichtung (mit Ausnahme des 100°C-Versuchs mit 100  $\mu\text{m}$ -Folie).

ANSELL äußerte Bedenken, dass die Folie Vorspannungskräften bei Temperaturen über etwa 60°C widerstehen kann, ohne dass große Kriechverformungen auftreten.

40°C	100 % rel. Luftfeuchte	Zeit	E 100 µm	Q 100 µm	E 300 µm	Q 300 µm
		[h]	[%]	[%]	[%]	[%]
		0	0,00	0,00	0,00	0,00
		48	1,20	3,20	2,00	2,80
		216	0,80	2,40	1,60	2,20
		696	0,80	2,80	1,60	2,40
		1.104	0,60	2,80	1,80	2,60
60°C	trockene Luft	Zeit	E 100 µm	Q 100 µm	E 300 µm	Q 300 µm
		[h]	[%]	[%]	[%]	[%]
		0	0,00	0,00	0,00	0,00
		120	15,40	32,50	18,00	28,50
		140	16,40	34,50	18,40	29,60
		264	17,00	36,40	19,60	30,40
		456	17,60	37,20	20,60	32,10
100°C	trockene Luft	Zeit	E 100 µm	Q 100 µm	E 300 µm	Q 300 µm
		[h]	[%]	[%]	[%]	[%]
		2	13,20	11,6	39,6	31,2
		4	schnelles Fließen			

Tab. 2.10 Monoaxiale Kriechversuche bei 40°C, 60°C und 100°C, HOSTAFロン® ET 6235 - transparent, d = 100 µm und 300 µm, ANSELL, University of Bath 1985 [3]

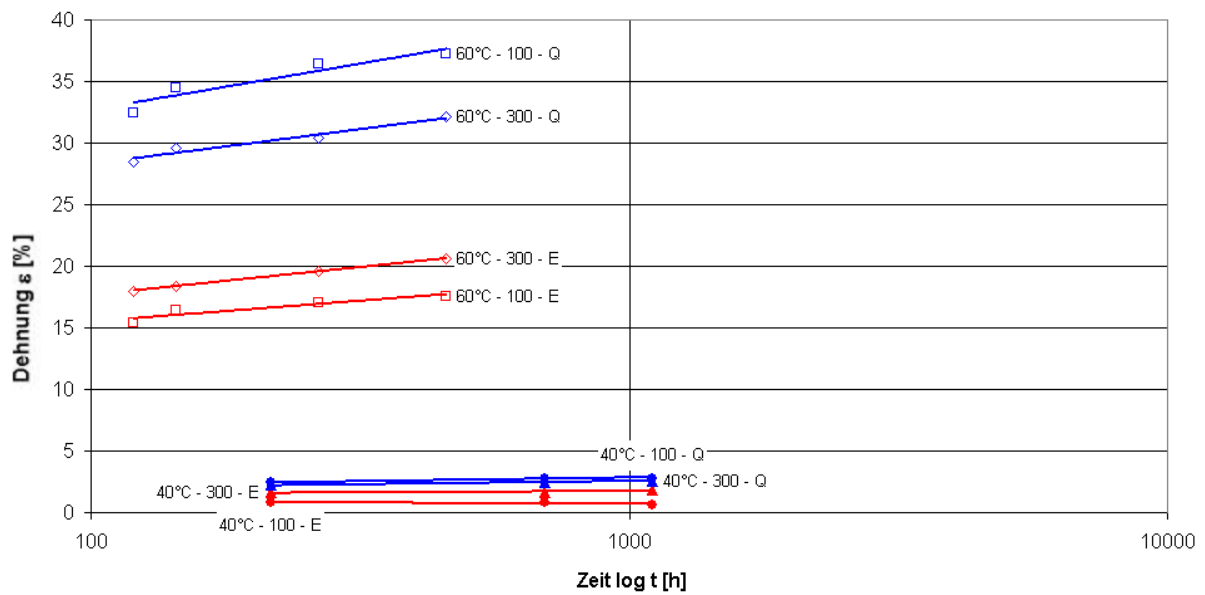


Abb. 2.7 Monoaxiale Kriechversuche bei 40°C und 60°C, Dehnung  $\epsilon$  [%] aufgetragen über die Zeit  $\log t$  [h], HOSTAFロン® ET 6235 - transparent, d = 100 µm und 300 µm, Diagramm auf der Basis von Daten von ANSELL, University of Bath 1985 [3]

### Schlussfolgerungen von ANSELL

ANSELL [3] konstatierte der Folie einen exzellenten Widerstand gegenüber Feuchtigkeit, UV-Strahlung, Umwelteinflüssen und Rissausbreitung. Das Kriechverhalten bezeichnete er selbst bei moderaten Temperaturen und Spannungen als beunruhigend. Bei 21°C sei es exzellent, aber bei 60°C dürftig. Die monoaxial gemessene Streckgrenze (elastic limit) gibt er für die Extrusionsrichtung mit 13,1 N/mm<sup>2</sup> (bei 2,78 % Dehnung) an, die Bruchfestigkeit (ultimate strength)\* mit etwas unter 20 N/mm<sup>2</sup>. Sollte die Folie als Teil der Gebäudehülle eingesetzt werden, so empfahl er, sollte auf den Vorspannungsgrad in Verbindung mit der Oberflächentemperatur bei sehr heißen Wetterbedingungen geachtet werden.

#### 2.2.2.3 Versuchsprogramm der TU Delft (DE VRIES) 2003

Eine wissenschaftliche Arbeit, die sich gezielt mit dem Werkstoff ETFE und seiner Anwendung als Last abtragende Membran im Hochbau befasst, ist die als Masters Project an der Delft University of Technology (TU) veröffentlichte Arbeit von DE VRIES aus dem Jahr 2003. Das Thema der Arbeit lautet Tensile Foil – ETFE-Foil as Membrane Construction Material. Sie beinhaltet im Wesentlichen monoaxiale Kurzzeitzugversuche, biaxiale Kurzzeitzugversuche bei unterschiedlichen Spannungsverhältnissen und bei einer Temperatur (T = 20°C) sowie monoaxiale und biaxiale Kriechversuche.

In Abb. 2.8 a ist der Versuchsstand der TU Delft dargestellt, an welchem die biaxialen Versuche durchgeführt wurden. Abb. 2.8 b zeigt die auf Rollen gleitende Einspannvorrichtung eines der vier Arme einer geschlitzten ETFE-Biaxialprobe [40].

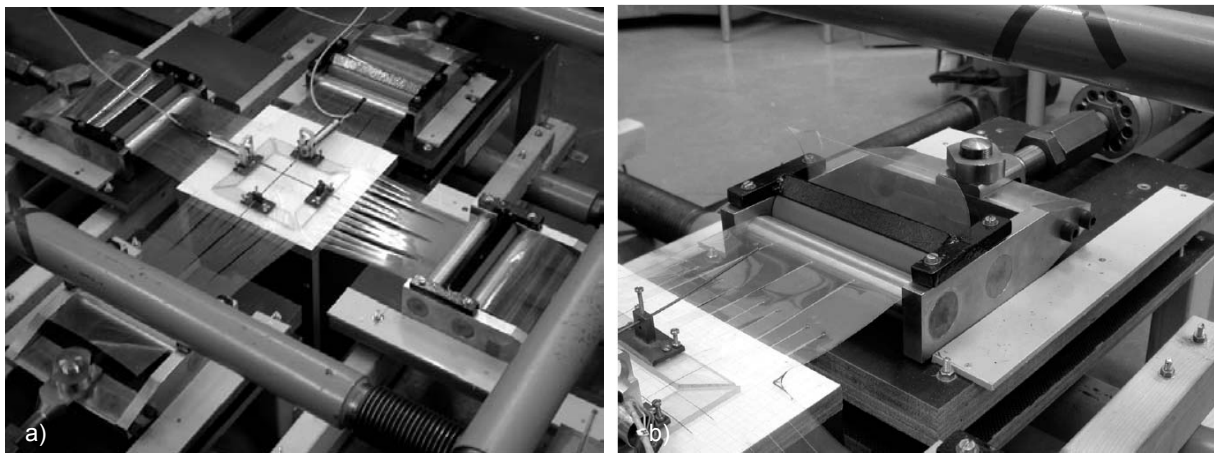


Abb. 2.8 a) Biaxialtisch mit ETFE-Probe und Dehnungsmesselementen, b) Einspannvorrichtung eines der vier Probenarme, DE VRIES, TU Delft 2003 [40]

DE VRIES beschreibt, dass sich in seinen Proben eine lastabhängige Schiefstellung der vier Arme eingestellt hat, wie aus Abb. 2.9 a ersichtlich.

---

\* In Bezug auf die von ANSELL als "ultimate strength" bezeichnete Festigkeit siehe Anmerkung zur Höchstzugkraft (Kap. 2.2.2.2).



Als mögliche Ursachen für dieses Problem kommen folgende, von ihm angeführte, Punkte in Betracht: die schwierige manuelle Herstellung der Probekörper mit der Folge möglicher geringfügiger Asymmetrien, mögliche Reibungsverluste der gelagerten Einspannklemmen sowie eine mögliche geringfügige Asymmetrie des Biaxialtisches.

Um die o.g. Schiefstellung auszugleichen, hat DE VRIES eine Ausgleichsvorrichtung am Versuchsstand angebracht (s. Abb. 2.9 b). Da diese Vorrichtung während des Versuchs über "Turnbuckles" manuell bedient werden musste, wurde die Prüfgeschwindigkeit (konstante kraftgesteuerte Traversengeschwindigkeit) mit 2,75 N/s sehr langsam gewählt. (Anm.: Dies entspricht einer Prüfgeschwindigkeit von 4,58 N/mm<sup>2</sup>/min, bezogen auf den Ausgangsquerschnitt der Probenarme mit dem Querschnitt 180 mm x 0,2 mm. Rechnet man die Traversengeschwindigkeit in eine mittlere Dehngeschwindigkeit um, erreicht man im elastischen Bereich etwa eine Größenordnung von  $\dot{\epsilon} \cong 0,5 \% / \text{min}$ .) In Bezug auf die Genauigkeit der Messergebnisse war es nach DE VRIES zudem problematisch, dass sich die Belastungsgrößen im unteren Grenzbereich der hydraulischen Zugzylinder bewegten.

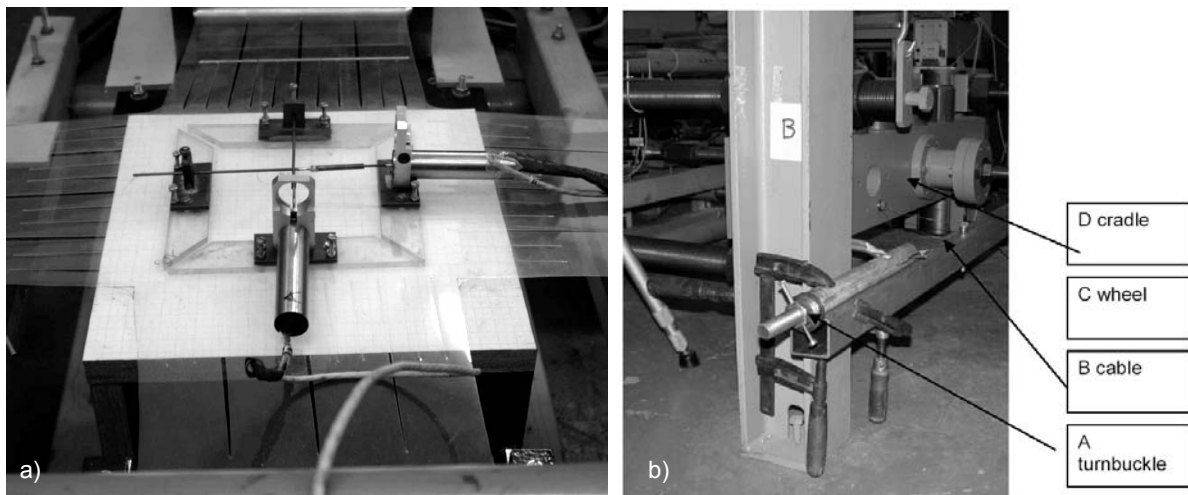


Abb. 2.9 a) Eingespannte ETFE-Probe mit deutlich erkennbarer Schiefstellung der Probenarme, b) Manuell justierbare Ausgleichsvorrichtung zur Minimierung der Schiefstellung, Biaxialversuche DE VRIES, TU Delft 2003 [40]

Die bei etlichen Spannungsverhältnissen, ausschließlich bei einer Temperatur von  $T = +20^{\circ}\text{C}$  durchgeführten Biaxialversuche ergaben somit schwer interpretierbare Ergebnisse. Nach DE VRIES begannen Biaxialproben mit einem ungleichen Spannungsverhältnis selbst bei einer Neunzig-Grad-Drehung immer in einer bestimmten Tischrichtung zu fließen. Demzufolge ergab sich ein anisotropes Verhalten der Folie mit einer deutlich schiefen Fließbedingung (s. Abb. 2.10 b). Nach DE VRIES waren daher die Bedingungen für das Ende des HOOKE'schen Bereichs (s. Abb. 2.10 a) und für die Fließgrenze (s. Abb. 2.10 b) nicht eindeutig ablesbar. Er empfahl, die lineare Fließbedingung nach TRESCA zu verwenden, da diese einen konservativeren Wert darstellt, als beispielsweise die elliptische Fließbedingung nach VON MISES.

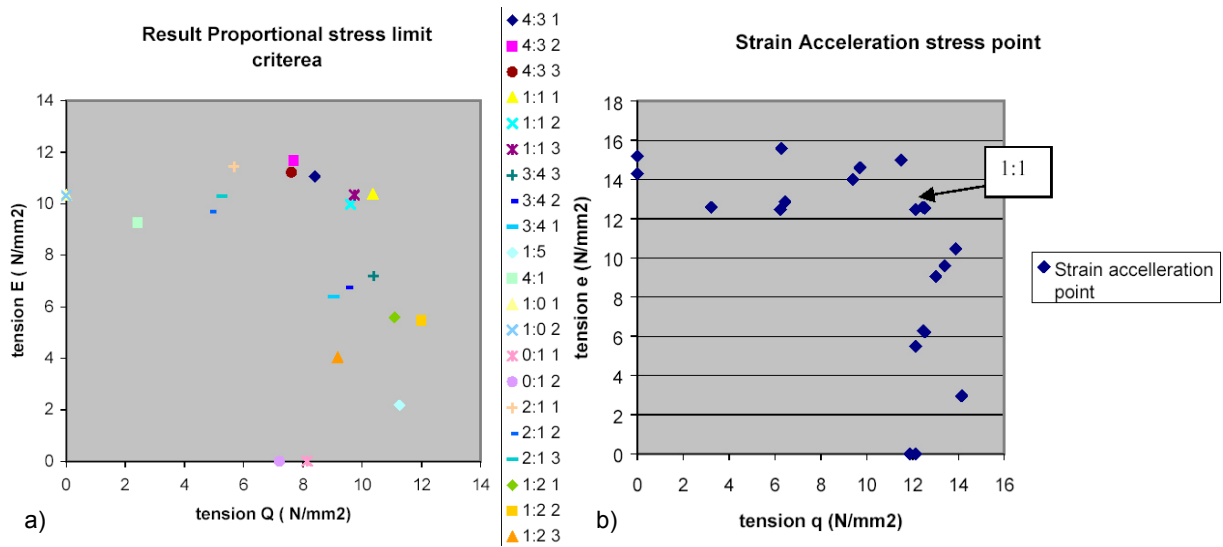


Abb. 2.10 Gemessene biaxiale Spannungen: a) an der Proportionalitätsgrenze ("Result Proportional Stress Limit Criteria"), b) an der Fließgrenze ("Strain Acceleration Stress Point"), DE VRIES, TU Delft 2003 [40]

Die Fließgrenze definierte DE VRIES über eine Tangentenkonstruktion (Linien 1 bis 3), wie sie in Abb. 2.11 dargestellt ist. Den so ermittelten Punkt auf der Spannungs-Dehnungs-Kennlinie bezeichnete er als Strain Acceleration Stress Point (S), die Proportionalitätsgrenze als Proportional Stress Limit (P).

### ETFE foil test result

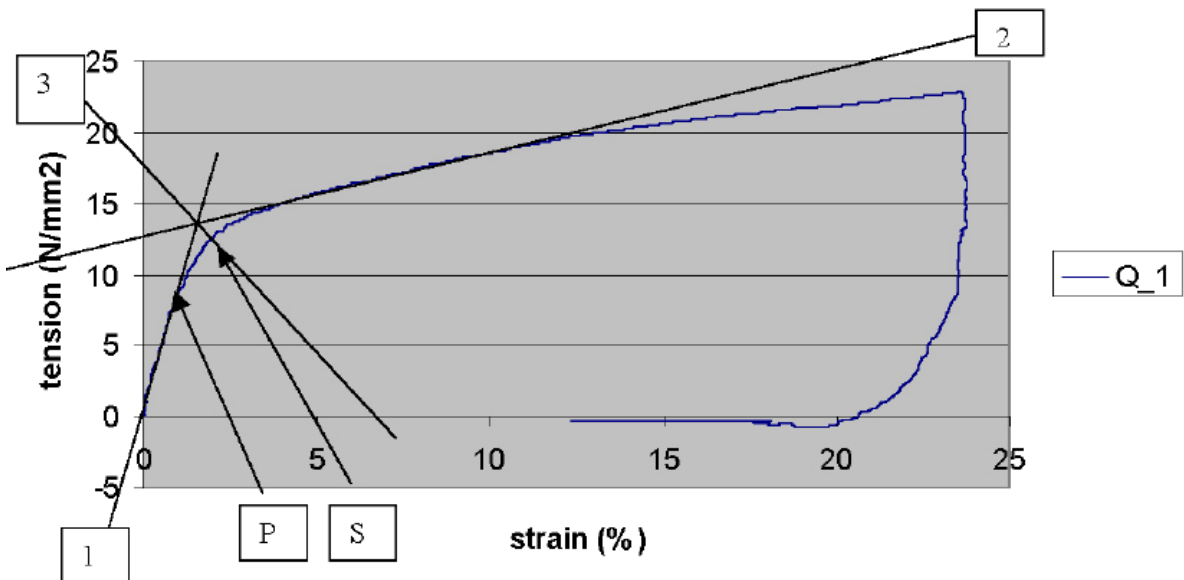


Abb. 2.11 Tangentenkonstruktion zur Definition der Proportionalitätsgrenze und der Fließgrenze (S = Strain Acceleration Stress Point, P = Proportional Stress Limit, Linien 1 und 3 = Tangenten an die Spannungs-Dehnungskurve, Linie 2 = Winkelhalbierende des zwischen den Linien 1 und 3 eingeschlossenen Winkels) ("ETFE-foil test result"), DE VRIES, TU Delft 2003 [40]

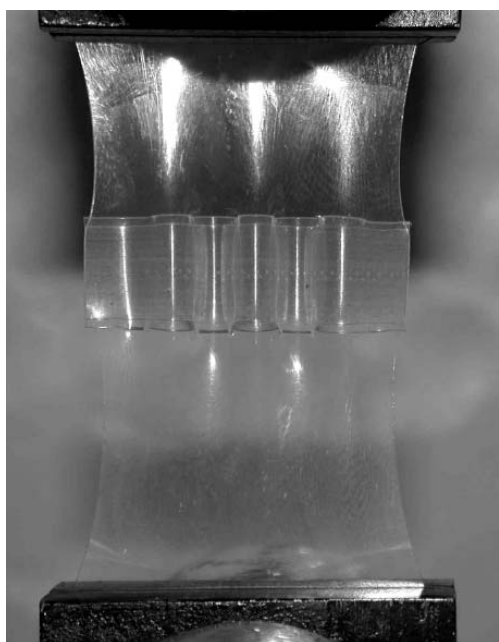


Abb. 2.12 Faltenbildung\* an monoaxial gezogenen Probekörpern, DE VRIES, TU Delft 2003 [40]

Ein weiteres Problem der Versuche entstand nach DE VRIES in der ausgeprägten Faltenbildung\* der biaxial (z.B. Spannungsverhältnis 1:0 und 0:1) und der breiten, monoaxial beanspruchten Probekörper mit und ohne Schweißnähte (s. Abb. 2.12). Aus den Monoaxialversuchen hat DE VRIES eine Abhängigkeit der Folieneigenschaften (E-Modul, Fließgrenze und Proportionalitätsgrenze) von der Probenlänge abgeleitet. Hierbei wurden die Probenbreite und die Prüfgeschwindigkeit (definiert als Weg pro Zeiteinheit [mm/min]) konstant gehalten, und die Probenlänge variiert. Die Ergebnisse lassen sich jedoch besser interpretieren, wenn man nicht die Prüfgeschwindigkeit (Traversengeschwindigkeit), sondern die (technische) Dehngeschwindigkeit betrachtet. Mit der technisch definierten Dehnung wird sie - bezogen auf die Ausgangslänge - angegeben in Dehnung [%] pro Zeiteinheit [min]. Somit verändert sie sich mit der gewählten Probenlänge (Ausführungen hierzu s. Kap. 4.3.2 und Anhang D, Kap. D 5).

Angaben zum Einfluss der Temperatur beinhaltet die Arbeit von DE VRIES nicht. Unter Berücksichtigung der genannten Einschränkungen in Bezug auf die Genauigkeit der Messergebnisse liefert die Arbeit dennoch etliche Ansätze zum besseren Verständnis der ETFE-Folie. Sie zeigt darüber hinaus die Probleme auf, die sich bei der komplizierten biaxialen Prüfung ergeben haben. Sie ist die erste wissenschaftliche Arbeit von Seite der Universitäten seit der Studie von ANSELL, University of Bath, aus dem Jahr 1985 (s. Kap. 2.2.2.2).

#### 2.2.2.4 Versuchsprogramm der D-SET Laboratories (“Arizona-Test“) 1979 - 1989

Eine von NOWOFOL® veröffentlichte Langzeitstudie der D-SET Laboratories (USA) zeigt den Einfluss von Freibewitterung (insbesondere starker UV-Strahlung) auf ETFE-Folien über einen Zeitraum von 10 Jahren. Folienproben des Produktes NOWOFOLON® ET 6235 – transparent,  $d = 200 \mu\text{m}$ , wurden von Juni 1979 bis Juni 1989 klimatischen Bedingungen von Arizona (USA) ausgesetzt (“Arizona-Test“). Die gemessene Gesamtstrahlungsmenge betrug  $78,1 \text{ MJ/m}^2 (= 1,8 \text{ Mlys})$ . Die Zug- bzw. Bruchfestigkeit, die Bruchdehnung, die Spannung bei 10 % Dehnung, die Weitereißfestigkeit und die Lichttransmission (Gesamtlicht, Direktdurchlass und Streulicht) wurden am produktionsfrischen Material, sowie nach 1, 2, 3, 5, 7 und 10 Jahren untersucht. Die mechanischen Werte wurden monoaxial in Extrusions- und Querrichtung gemessen. Die Messdaten sind in Tab. 2.11 dargestellt.

\* Eine Falte ist unabhängig vom herrschenden (monoaxialen) Spannungszustand mit einem “scharfen Knick“, d.h. mit einer irreversiblen Verformung, verbunden, was hier nicht der Fall ist. Daher wäre umgangssprachlich in diesem Fall statt der mechanisch üblichen Bezeichnung “Falte“ eher die Bezeichnung “Welle“ angebracht.

Eigenschaft	Einheit	Jahre						
		Original	1	2	3	5	7	10
Zugfestigkeit Extrusionsrichtung (E)	N/mm <sup>2</sup>	46,7	45,6	46,2	44,9	46,0	48,4	52,4
Zugfestigkeit Querrichtung (Q)	N/mm <sup>2</sup>	42,3	43,8	45,5	42,6	44,8	42,4	44,6
Spannung bei 10 % Dehnung (E)	N/mm <sup>2</sup>	22,6	22,5	25,0	22,3	23,2	22,8	22,5
Spannung bei 10 % Dehnung (Q)	N/mm <sup>2</sup>	21,8	21,4	22,0	-	22,3	21,0	21,5
Bruchdehnung (E)	%	330	340	310	345	315	325	340
Bruchdehnung (Q)	%	390	405	390	390	420	390	405
Weiterreißfestigkeit (E)	N/mm	420	430	415	445	440	525	-
Weiterreißfestigkeit (Q)	N/mm	435	425	420	480	430	530	-
Lichttransmission (gesamt)	%	95	96	94	95	96	96	96
Lichttransmission (Streulicht)	%	8	8	11	9	11	11	8
Lichttransmission (direkt)	%	87	88	83	86	85	85	88

Tab. 2.11 Langzeitverhalten von ETFE-Folie, 10 jähriger Freibewitterungstest („Arizonatest“, Juni 1979 bis Juni 1989), NOWOFLON ET 6235 – transparent, d = 200 µm, Herstellerdaten des Unternehmens NOWOFOL® [78] mit Verweis auf D-SET LABORATORIES, 1989

Abb. 2.13 zeigt die Bruchspannung, die Bruchdehnung und die Spannung bei 10 % Dehnung jeweils in Extrusions- und Querrichtung, aufgetragen über den 10-jährigen Zeitraum der Freibewitterung. Eine signifikante Zunahme ist für keinen der Werte eingetreten.

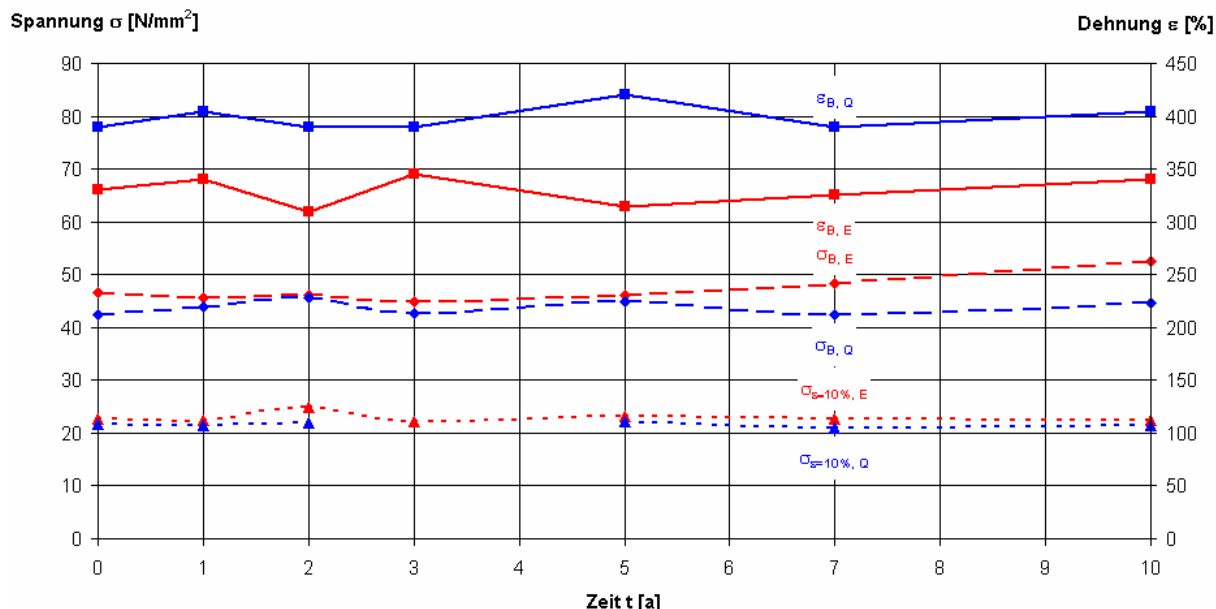


Abb. 2.13 Bruchdehnung  $\sigma_B$ , Bruchspannung  $\varepsilon_B$  und Spannung bei 10 % Dehnung  $\sigma_{\varepsilon=10\%}$  in Abhängigkeit von der Zeit t (E = Extrusionsrichtung, Q = Querrichtung), monoaxialer Kurzzeitzugversuch vor Einbau sowie nach 1, 2, 3, 5, 7 und 10 Jahren, Freibewitterungstest („Arizona-Test“), NOWOFLON ET 6235 – transparent, d = 200 µm, Diagramm auf der Basis von Herstellerdaten des Unternehmens NOWOFOL® [78] mit Verweis auf D-SET Laboratories, 1989

Abb. 2.14 zeigt die Weiterreißfestigkeit in Extrusions- und Querrichtung. Sie hat nach 7 Jahren in beiden Richtungen um etwa 25 % zugenommen. Da sich weder die Bruchfestigkeit, die Bruchdehnung noch die Spannung bei 10 % Dehnung in diesem Zeitraum signifikant verändert haben, ist eine Interpretation der erhöhten Weiterreißfestigkeit schwierig.

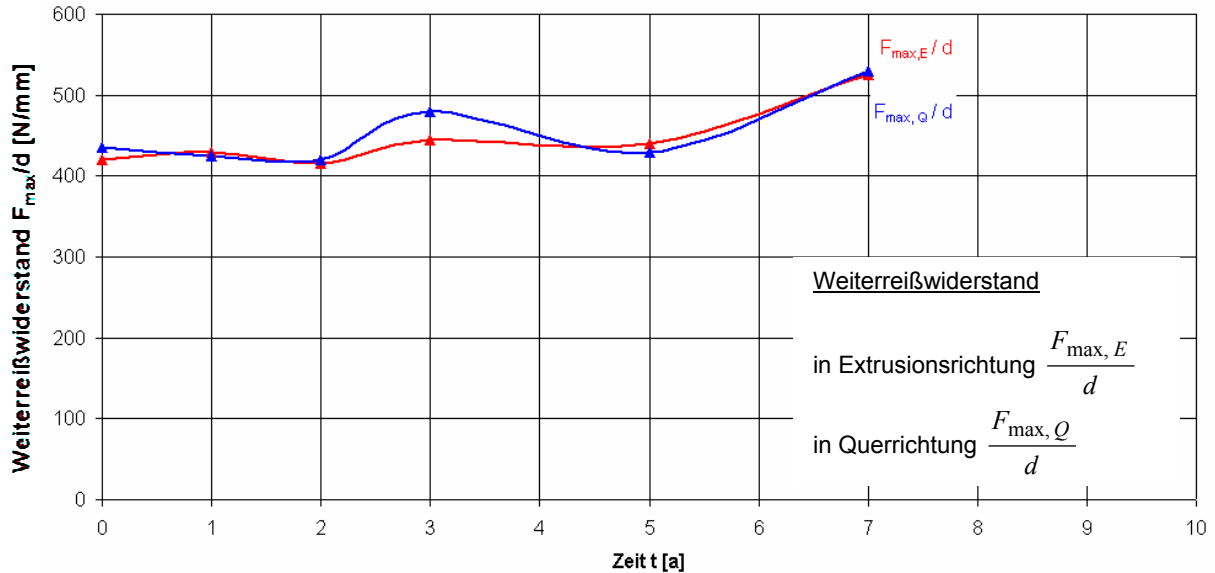


Abb. 2.14 Weiterreißwiderstand  $F_{max}/d$  in Abhängigkeit von der Zeit  $t$ , Versuch des Originalmaterials sowie nach 1, 2, 3, 5, 7 und 10 Jahren, Freibewitterungstest („Arizona-Test“), NOWOFLON ET 6235 – transparent,  $d = 200 \mu\text{m}$ , Diagramm auf der Basis von Herstellerdaten des Unternehmens NOWOFOL® [78] mit Verweis auf D-SET Laboratories, 1989

Abb. 2.15 zeigt die Lichttransmission des gesamten Lichtes, sowie der Anteile des direkten Lichts und des Streulichts. Abgesehen von geringen Schwankungen ist keine signifikante Zu- oder Abnahme über den Zeitraum 10 jähriger Freibewitterung zu erkennen.

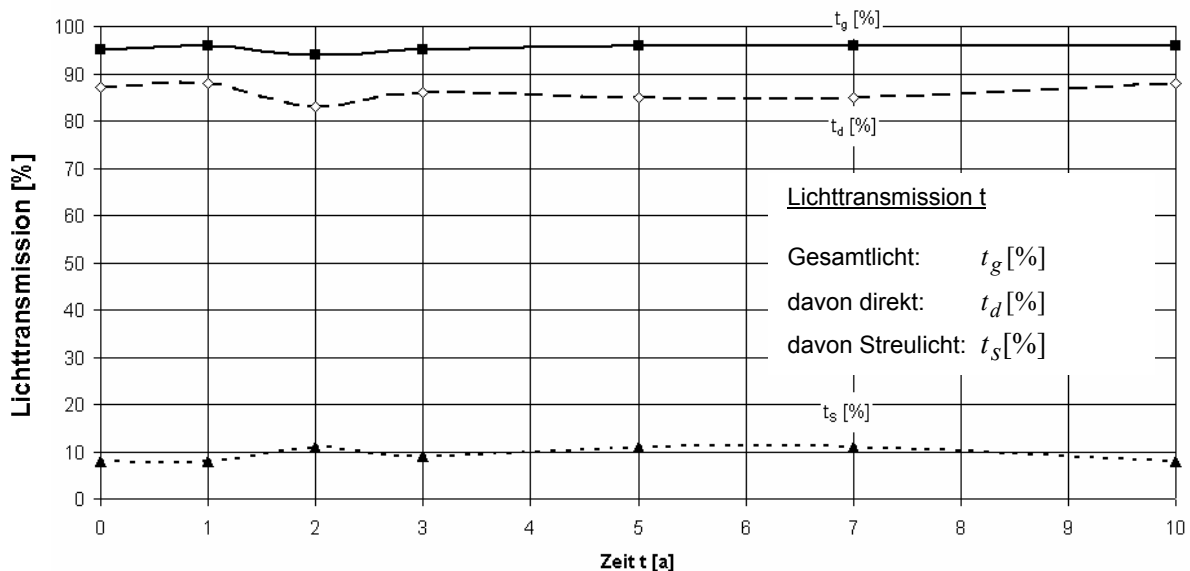


Abb. 2.15 Anteile der Lichttransmission  $t_g, t_s, t_d$  (g = gesamt, S = Streulicht, d = direkt) in Abhängigkeit von der Zeit  $t$ , Messung am Originalmaterial sowie nach 1, 2, 3, 5, 7 und 10 Jahren, Freibewitterungstest („Arizona-Test“), NOWOFLON ET 6235 – transparent,  $d = 200 \mu\text{m}$ , Diagramm auf der Basis von Herstellerdaten des Unternehmens NOWOFOL® [78] mit Verweis auf D-SET Laboratories, 1989





### 2.2.3 Versuchsergebnisse aus der Fachliteratur

In technischen Formelsammlungen finden sich etliche Daten mechanischer und physikalischer Eigenschaften, die mit unterschiedlichen Versuchsmethoden auf der Basis unterschiedlicher Standards (nationaler Normen) und an unterschiedlichen Probekörpergeometrien (Platte, Folien, Spritzgussteile etc.) an ETFE durchgeführt wurden, z.B. in:

📖 SAECHTLING 2001: Kunststoffaschenbuch [158]

📖 CARLOWITZ 1995: Kunststofftabellen [34]

Die Tabellen 2.12 und 2.13 zeigen eine Zusammenstellung aus Tabellenwerken für die vier Fluorpolymerwerkstoffe PTFE, FEP, ETFE und PFA. Die Werte sind keine Bemessungskennwerte. Sie dienen lediglich Vergleichszwecken.

Eigenschaft (Prüfnorm DIN / ASTM)	Einheit	PTFE	FEP	ETFE	PFA
Modell der Molekülstruktur					
Polymer		Polytetrafluor-ethylen	Polyfluorethylen/Propylen-Copolymer	Ethylen/Tetrafluorethylen-Copolymer	PTFE/Perfluoracyl-vinylether (Perfluoralkoxy)-Copolymer
Jahr der Einführung		1938	1960	1970	1972
Eingetragenes Warenzeichen		TEFLON® TFE, HOSTAFILON® TF, ALGOFLON®, POLYFLON®, LUBRIFLON®, TARFLEN® etc.	TEFLON® FEP, NORTON® FEP, NEOFLON® etc.	TEFZEL®, HOSTAFILON® ET, TOYOFILON®, FLUON® ETFE, NORTON® ETFE, AFLON®, TECAFLON® ETFE etc.	NORTON® PFA, TEFLON® PFA etc.
Dichte (ASTM D-792)	$\frac{g}{cm^3}$	2,17	2,15	1,75	2,15
Polarität		unpolar	unpolar	unpolar	unpolar
Oberflächenspannung gesamt/dispers/polar (nach WU Methode)	$\frac{mN}{m}$	22,5 / 20,5 / 2,0		25,2 / 21,1 / 4,1	22,0 / 16,8 / 5,2
Shorehärte D (DIN 53 457)		55 - 72	55 - 60	63 - 75	60 - 65
Kugeldruckhärte 132 / 60 (DIN 53 457)	$\frac{N}{mm^2}$	25 - 30	23 - 29	34 - 40	25 - 30
stat. Reibungskoeffizient (ASTM D-1894)		0,12 - 0,15	0,12 - 0,20	0,20	0,24 - 0,50

Fortsetzung der Tabelle 2.12 auf der folgenden Seite

Fortsetzung der Tabelle 2.12

Eigenschaft (Prüfnorm DIN / ASTM)	Einheit	PTFE	FEP	ETFE	PFA
dyn. Reibungskoeffizient gegen Stahl (trocken) (ASTM D-1894)		0,05 – 0,20	0,30 – 0,50	0,30 – 0,50	0,20 – 0,30
Dispersionsfaktor bei 1 MHz (ASTM D-150)		< 0,0001	< 0,0006	< 0,0001	< 0,007
Dielektrische Festigkeit (ASTM D-149)	$\frac{V}{\mu m}$	18	53	80	79
Strombogenfestigkeit (ASTM D-495)	s	> 300	> 300	> 180	122
Strahlenbeständigkeit	$\frac{J}{kg} \cdot 10^{-4}$	0,02 – 0,05	1,5 - 8	1,8 - 200	0,02 – 0,05
Dielektrizitätszahl bei 50/10 <sup>6</sup> Hz (ASTM D-150)		2,1 / 2,1	2,1 / 2,1	2,6 / 2,6	2,1 / 2,1
Dielekt. Verlustfaktor bei 50/10 <sup>6</sup> Hz (ASTM D-150)	$x 10^{-4}$	0,5/0,7	1,0/2,2	6,0/50	0,9/1,1
spezifischer Durchgangswiderstand (DIN 53 482)	$\Omega \cdot cm$	10 <sup>18</sup>	10 <sup>18</sup>	10 <sup>15</sup>	10 <sup>18</sup>
Oberflächenwiderstand (DIN 53 482)	$\Omega$	10 <sup>17</sup>	10 <sup>16</sup>	5 · 10 <sup>12</sup>	10 <sup>17</sup>
linearer Wärmeaus- dehnungskoeffizient	$\frac{1}{K} \cdot 10^{-5}$	16	8–10	10	12
Wärmeleitfähigkeit bei 23°C (DIN 52 612)	$\frac{W}{m \cdot K}$	0,23	0,20	0,23	0,22
spezifische Wärme bei 23°C	$\frac{kJ}{kg \cdot K}$	1,01	1,17	1,95	1,09
Formbeständigkeit in der Wärme A (18,5) / B (4,6) kP/cm <sup>3</sup> (DIN 53 461)	°C	50–60 / 130–140	51 / 70	71–74 / 104	k.A. / k.A.
Schmelztemperatur (ASTM D-2116)	°C	320 - 340	260 - 290	265 - 278	300 - 310
Massetemperatur beim Spritzgießen	°C	-	330 - 420	280 - 300	350 - 420
Einsatzbereich (Temperatur)	°C	-200 bis +260	-190 bis +200	-190 bis +150	-200 bis +250
Verarbeitungsschwind- maß	%	-	3 – 6	3 - 4	4
Verbrennungsenergie (ASTM D-240)	$\frac{mJ}{kg}$	5,1	5,1	5,3	13,7
Sauerstoffindex (ASTM D-2863)	%	> 95	> 95	30	> 95
Wasseraufnahme bei 23°C (DIN 53 495)	%	< 0,01	< 0,01	< 0,1	0,03
Durchlässigkeit für Wasserdampf (100 μm) (DIN 53 122) (d = Tag)	$\frac{g}{m^2 \cdot d}$	5	1	2	8

Fortsetzung der Tabelle 2.12 auf der folgenden Seite

Fortsetzung der Tabelle 2.12

Eigenschaft (Prüfnorm DIN / ASTM)	Einheit	PTFE	FEP	ETFE	PFA
Durchlässigkeit für Luft/Helium/Kohlendioxid (DIN 53 380), (d= Tag, Δ p in bar) (100 μm)	$\frac{cm^3}{m^2 d \Delta p}$	2.000 / 35.000 / 15.000	600 / 18.000 / 4.700	175 / 3.700 / 1.300	1.150 / 17.000 / 7.000
Durchlässigkeit für Licht (gesamt) (100 μm)	%	85 – 90	97	95	97
E-Modul (Zug) 23°C	$N / mm^2$	350 - 750	350 - 500	900 – 1.000	600 - 700
E-Modul (Biegung) 23°C	$N / mm^2$	600 - 800	660 - 680	1.000 – 1.500	650 - 700

Tab. 2.12 Anhaltswerte für Eigenschaften der Fluorpolymerwerkstoffe PTFE, FEP, ETFE und PFA im Vergleich, Zusammenstellung von Literaturangaben (Achtung: Werte sind abhängig von Probekörpergeometrie und Prüfbedingungen), SAECHTLING 2001 [158] u.a.

Eigenschaft		Einheit	PTFE	FEP	ETFE	PFA
Zugfestigkeit	- 30° C	$\frac{N}{mm^2}$	61	47	81	44
	0° C		50	36	66	41
	23° C		45	27	53	40
	100° C		28	13	28	28
	150° C		21	6	12	20
	200° C		19	4	9	17
Streckspannung	- 30° C	$\frac{N}{mm^2}$	23	24	42	23
	0° C		18	17	38	16
	23° C		10	14	30	14
	100° C		5	5	9	6
	150° C		3	3	6	5
	200° C		2	2	6	4
Bruchdehnung	- 30° C	%	140	300	270	300
	0° C		300	400	260	350
	23° C		430	400	300	400
	100° C		500	400	560	450
	150° C		500	330	500	430
	200° C		480	300	300	450
Weiterreißfestigkeit	- 30° C	$\frac{N}{mm^2}$	20	268	567	159
	0° C		60	279	468	198
	23° C		179	250	440	218
	100° C		131	100	240	-
	150° C		90	61	115	80

Tab. 2.13 Anhaltswerte der Zugfestigkeit, Streckspannung, Bruchdehnung, Weiterreißfestigkeit der Fluorpolymerwerkstoffe PTFE, FEP, ETFE und PFA im Vergleich, SAECHTLING 2001 [158]



### 2.3 Chemischer und struktureller Aufbau

Ethylen Tetrafluorethylen ist ein thermoplastisch verarbeitbarer Werkstoff, d.h. er ist bei Wärmezufuhr formbar. Um aus den Rohstoffen eine Folie herzustellen, sind mehrere thermische Prozesse notwendig. Sie werden in Kap. 3 vorgestellt.

Die chemische Formel von ETFE ist bekannt und in der Literatur zu finden. Da den beiden Monomereinheiten Ethylen und Tetrafluorethylen jedoch in Abhängigkeit von der Granulatsorte Modifier (bis zu 20 Gewichtsprozent [77]) zugefügt werden, die in die Kettenmoleküle eingebaut werden, ergeben sich neue molekulare Strukturen mit veränderten mechanischen, optischen und dielektrischen Eigenschaften. Daten zur Art, Menge und Einbringungsmethode der Modifier sowie zur modifizierten Struktur sind nur dem jeweiligen Hersteller bekannt. Sie werden aus nachvollziehbaren Gründen nicht publiziert. Durch verschiedene Analyseverfahren, z.B. die Infrarotspektroskopie, ließe sich die Zusammensetzung ermitteln. Dazu bestand aber bislang keine Veranlassung.

ETFE gehört zu den teilkristallinen Polymerwerkstoffen, d.h. es ist phasenweise amorph und kristallin aufgebaut. Das Verhalten derartiger Strukturen ist komplex. Die prinzipiellen Verhaltensweisen sind inzwischen weitgehend verstanden und modellhaft beschrieben (s. Abb. 3.5.). Etliche Erkenntnisse über den strukturellen Aufbau diverser teilkristalliner Thermoplaste sind in der Literatur dokumentiert (s. z.B. [111], [51] u.a.), jedoch nicht für ETFE oder für die modifizierten ETFE-Folienprodukte.

Angaben zur Herstellung und Verarbeitung von thermoplastischen Polymeren zu Folien und Angaben zum strukturellen Aufbau von teilkristallinen Thermoplasten sind in verschiedenen Standardwerken der Polymerwerkstoffkunde zu finden, z.B. in:

- 📖 EHRENSTEIN, RIEDEL und TRAWIEL 2003 (Praxis der thermischen Analyse von Kunststoffen) [48]
- 📖 MENGES, HABERSTROH, MICHAELI und SCHMACHTENBERG 2002 (Werkstoffkunde Kunststoffe) [111]
- 📖 SCHWARZ, EBELING und FURTH 2002 (Kunststoffverarbeitung) [180]
- 📖 SCHWARZ und EBELING 2002 (Kunststoffkunde) [179]
- 📖 FRANCK 2000 (Kunststoff-Kompendium) [62]
- 📖 NENTWIG 2000 (Kunststoff-Folien – Herstellung – Eigenschaften – Anwendung) [137]
- 📖 MICHAELI 1999 (Einführung in die Kunststoffverarbeitung) [118]
- 📖 EHRENSTEIN 1999 (Polymer-Werkstoffe) [51]
- 📖 EHRENSTEIN und PONGRATZ 1998 (Thermische Einsatzgrenzen von technischen Kunststoffbauteilen) [47]
- 📖 MICHAELI, BRINKMANN und LESSENICH-HENKYS 1995 (Kunststoff-Bauteile werkstoffgerecht konstruieren) [116]
- 📖 EHRENSTEIN 1992 (Kunststoff-Schadensanalyse - Methoden und Verfahren) [49]
- 📖 EHRENSTEIN und GUNTER 1983 (Konstruieren mit Polymerwerkstoffen) [46]

## **2.4 Einflüsse der Konfektion, der Konstruktion und der Umgebungsbedingungen**

### **2.4.1 Eigenschaftsveränderungen und Schädigungsprozesse**

Die Prüfung der produktionsfrischen Folie erfasst deren Eigenschaften und statistische Verteilungen der Rollenware (des Halbzeuges) nach der Produktion. Bis zum Einbau und auch während der Standzeit können sich jedoch die Eigenschaften der Folie verändern. Für die zu messenden Kennwerte kann eine Veränderung positiv - im Sinne einer Verbesserung - oder negativ - im Sinne einer Verschlechterung - sein.

Eine negative Eigenschaftsänderung muss nicht unbedingt mit einer Schädigung einhergehen. Bei bestimmten Werkstoffen können die täglichen Temperaturschwankungen eine langfristige Schädigung hervorrufen, die nicht reversibel ist und die sich mit der Zeit in Prüfungen bei Raumtemperatur bemerkbar machen kann. Demgegenüber ist die bei Polymerwerkstoffen auftretende Zunahme der Beweglichkeit der Kettenmoleküle bei einer erhöhten Temperatur ohne gleichzeitige Belastung reversibel und stellt keine Schädigung dar. Das Beispiel zeigt, dass zwischen reversiblen Eigenschaftsveränderungen und irreversiblen Schädigungen unterschieden werden sollte. Abminderungsfaktoren (auf Festigkeiten oder Dehngrenzen) sollten grundsätzlich nur Schädigungen erfassen, nicht aber temperatur- oder dehngeschwindigkeitsabhängige Eigenschaftsveränderungen des Polymerwerkstoffes.

In werkstofftechnischer Hinsicht liegt eine Schädigung vor, wenn sich die Festigkeit, die Dehnung (Dehngrenze) oder die Steifigkeit durch physikalische, chemische oder mechanische Spaltung von Hauptkettenbindungen, das Abgleiten von Molekülsegmenten oder die Bildung von Hohlräumen reduziert. Die Ursachen für derartige Schädigungen können physikalischer, chemischer, biologischer oder mechanischer Art sein, z.B. in Form von Depolymerisation, Versprödung, Ermüdung, Aufquellen, Oxidation, Korrosion, Kriechen, Verschleiß oder auch mechanische Beschädigung.

Nach KAUSCH 1979 [94] stellen versteifende Wirkungen keine Schädigungen im bautechnischen Sinn dar, wenn sie auf eine zunehmende Vernetzung, Nachkristallisation oder die Ausrichtung von Kettensegmenten basieren, die letztlich auf strukturelle Reaktionen oder Umlagerungen zurückgeführt werden können.

Im Folgenden werden Werkstoffveränderungen und strukturelle Schädigungen vorgestellt, die nicht reversibel sind - zumindest im baupraktischen Temperaturbereich.

### **2.4.2 Irreversible Werkstoffveränderungen und Schädigungen**

#### **2.4.2.1 Mechanische Verstreckung**

Eine mechanische Verstreckung stellt eine plötzliche Eigenschaftsänderung dar. Sie erfolgt durch die Fixierung eines Spannungszustandes bei bestimmten Temperaturen, bei amorphen Thermoplasten beispielsweise bei der Abkühlung während des Extrusionsprozesses auf 20 bis 40 K über der Glasübergangstemperatur  $T_g$  und bei teilkristallinen Thermoplasten bei 10 bis 20 K unter der Schmelztemperatur der Kristallite  $T_{KT}$  [111]. Hierbei kann die amorphe Phase relaxieren, während die Kristallite ihre Ausrichtung beibehalten. Der Vorgang bewirkt ein Abrutschen und Umlagern von Kristallitblöcken und eine damit verbundene irreversible Anisotropie (s. Abb. 2.16, zum Reckvorgang bei der Folienherstellung siehe auch Kap. 3.4.4).

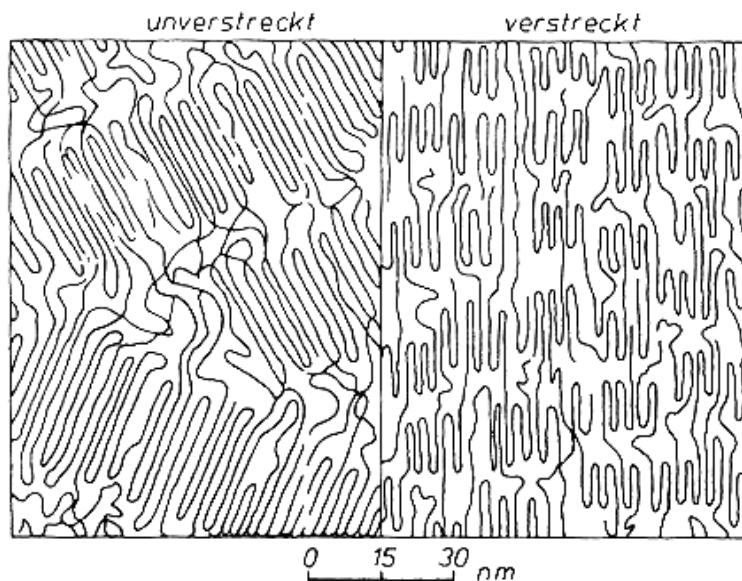


Abb. 2.16

Schematische Darstellung der Verstreckung eines teilkristallinen Thermoplastwerkstoffes (nach Petermann), MENGES, HABERSTROH, MICHAELI und SCHMACHTENBERG 2002 [111]

Prinzipiell ist eine mechanische Verstreckung auch beim Schweißvorgang möglich, wenn beispielsweise die Folie zur Kompensation des Schweißschrumpfes vorgespannt wird. Ein inhomogener Spannungszustand und eine daraus resultierende Verstreckung ist aber auch ohne Vorspannung nicht auszuschließen. Gegebenenfalls tragen andere Schweißverfahren, beispielsweise das Laserstrahlschweißen weniger Wärme in die Folie ein und können somit die Schrumpfung und auch die lokale Verstreckung minimieren. Forschungsergebnisse liegen diesbezüglich noch nicht vor.

Eine mechanische Verstreckung, in Form einer spannungsabhängigen Ausrichtung der Kettenmoleküle, kann auch durch eine (Vor-)beanspruchung auftreten, d.h. prinzipiell auch im Betriebszustand. HENGL und GUST 1989 [217] haben spannungsabhängige Änderungen des Spannungs-Dehnungsverhaltens bei Untersuchungen am thermoplastischen Werkstoff Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) bereits für relativ geringe Dehnungen nachgewiesen.

#### 2.4.2.2 Versprödung

Hier wird die Struktur durch die langzeitige Einwirkung von UV-Strahlung, Wärme oder auch durch strukturverändernde Substanzen mit der Zeit steifer und die Dehngrenze nimmt ab. Hingegen kann die Festigkeit zu- oder abnehmen.

ETFE-Folien verspröden erfahrungsgemäß deutlich weniger als die meisten anderen transparenten Polymerwerkstoffe. Indizien für ihre geringe Versprödung sind die o.g. Langzeituntersuchungen unter Freibewitterung (Arizona Test), die Langzeituntersuchungen unter künstlicher Bewitterung (Bestrahlung und Beregnung), und auch die ausgeführten Projekte, die sich seit über 20 Jahren optisch unverändert, d.h. ohne offensichtliche Eintrübungen, Farbveränderungen etc., bewährt haben.

### 2.4.2.3 Pigmentierungen

Unter Pigmentierung versteht man die Einfärbung der Folie mit temperaturbeständigen Farbpigmenten, beispielsweise Titandioxid (weiß). Vor der Extrusion wird dem naturfarbenen Granulat eine der gewünschten Färbung entsprechende Menge der Pigmente hinzugefügt (bis ca. 10 Gewichtsprozente) [79]. Durch den hohen Anteil der Pigmentierung ist eine Veränderung der mechanischen Eigenschaften der Folie möglich.

### 2.4.2.4 Beschichtungen

Das Beschichten (Bedrucken, Bedampfen etc.) und auch das Verkleben von Kunststoffteilen erfordert eine hohe Benetzbarkeit der Oberfläche. Diese hängt maßgeblich von der Oberflächenenergie des Polymerwerkstoffes ab. Hochenergetische (polare) Oberflächen bieten der Beschichtung oder dem Klebstoff eine bessere Haftung als niederenergetische (unpolare) Oberflächen. Die Benetzbarkeit lässt sich schnell und einfach mit Hilfe eines auf die Oberfläche aufgetragenen Wassertropfens beurteilen. Bildet er in etwa eine Kugelform, ist die Oberfläche niederenergetisch (s. Abb. 2.17 a), verläuft er auf der Oberfläche, ist diese hochenergetisch (s. Abb. 2.17 b).

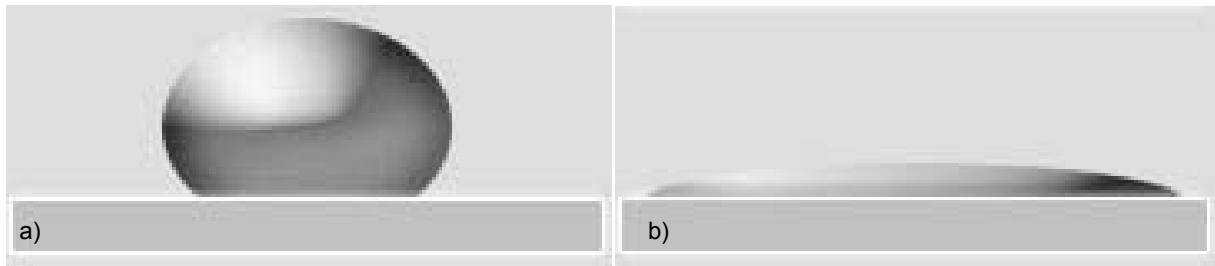
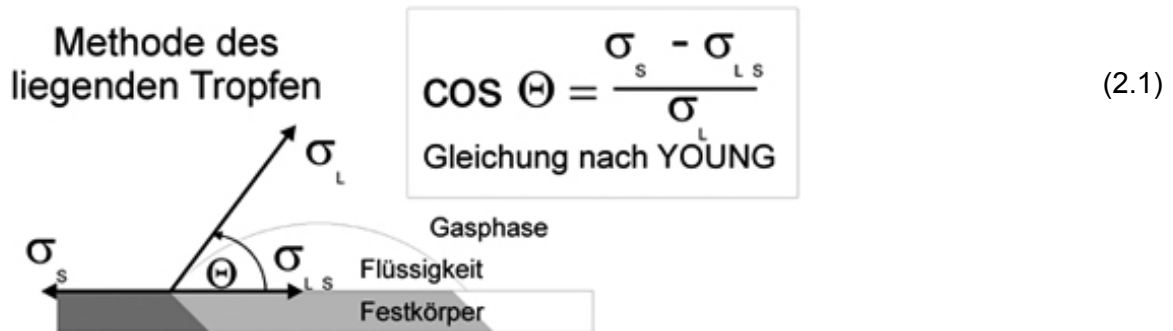


Abb. 2.17 a) niederenergetische Oberfläche (unpolar); b) hochenergetische Oberfläche (polar) [196] 2006

Zur genaueren Betrachtung der Benetzbarkeit verwendet man Testtinte und misst den Kontaktwinkel  $\theta$  des Flüssigkeitstropfens (Messmethoden nach DIN 53 364 oder ASTM D 2578). Im Hinblick auf eine gute Beschicht- bzw. Klebbarkeit sollte er möglichst klein sein (s. Abb. 2.18). Er hängt von der Oberflächenspannung der Flüssigkeit  $\sigma_L$  und der Oberflächenenergie des Festkörpers  $\sigma_S$  ab. Es gilt die YOUNG'sche Gleichung (s. Gl. 2.1). Aus dem Kräftegleichgewicht resultiert die Grenzflächenenergie  $\sigma_{LS}$  zwischen beiden Phasen.

Beim Beschichten gilt im Allgemeinen, dass die Grenzflächenenergie der zu beschichtenden Oberfläche (Festkörper) mindestens so groß sein sollte, wie die Oberflächenspannung der Beschichtung (Flüssigkeit). Die Beschichtung erfolgt möglichst direkt nach der Extrusion.

ETFE ist unpolar. Mit der Corona-Behandlung, der Beflammung und dem Plasmaverfahren stehen drei Verfahren zur Verfügung, um den Anteil polarer Gruppen an der Oberfläche und damit die Oberflächenenergie der Folie zu erhöhen. Derzeit wird standardmäßig die Corona-Behandlung zur Verbesserung der Oberflächenhaftung von ETFE-Folien angewendet.



$\sigma_L$  = Oberflächenspannung der Flüssigkeit

$\sigma_s$  = Freie Oberflächenenergie des Festkörpers

$\sigma_{Ls}$  = Grenzflächenenergie zwischen Flüssigkeit und Festkörper

$\Theta$  = Kontaktwinkel

Abb. 2.18 YOUNG'sche Gleichung; Kontaktwinkel des Testtropfens nach DIN 53 364 oder ASTM D 2578 [196] 2006

Bei der Korona-Behandlung wird eine elektrische Entladung zwischen zwei Polen erzeugt, durch welche die ETFE-Folie geführt wird. Die geladenen Teilchen in diesem Feld können mit den Polymermolekülen der Folie reagieren. Dabei werden u.a. Carbonyl-, Carboxyl-, Ether- oder Hydroxylgruppen gebildet, welche zur Erhöhung der Oberflächenenergie führen.

Es muss bei diesem Verfahren in Kauf genommen werden, dass immer beide Oberflächen verändert werden, obwohl i.d.R. nur eine Seite beschichtet werden soll.

Die Erhöhung der Oberflächenenergie durch die Koronabehandlung ist relativ gering. Darüber hinaus sinkt sie langsam wieder ab.

Die Haftung einer Bedruckung ist erfahrungsgemäß am größten, wenn die Bedruckung unmittelbar auf die Korona-Behandlung und die Korona-Behandlung unmittelbar auf die Extrusion folgen [77].

Bei der Beflammung wird die Folie mit einem Gas-Luftgemisch (z.B. Methan, Butan oder Propan) kurzzeitig stark erhitzt. Mit diesem Verfahren wird eine höhere Oberflächenenergie als bei der Korona-Behandlung erzeugt. Nachteilig sind eine ungleichmäßige Verteilung der Oberflächenenergie, sowie mögliche Schädigungen oder Eigenschaftsveränderungen der Folie.

Beim Atmosphärendruckplasmaverfahren wird durch eine Hochspannungsentladung in Verbindung mit einer Gasströmung ein so genannter Plasmastrahl erzeugt und auf die zu behandelnde Oberfläche der Folie gelenkt. Publiizierte Vergleichswerte des relativ jungen Verfahrens stehen noch aus.

Beschichtungen in Verbindung mit der Korona-Behandlung haben bislang keine signifikanten Änderungen der mechanischen Eigenschaften von ETFE-Folien ergeben. Jedoch wurde vereinzelt eine reduzierte Schweißbarkeit bedruckter Folien festgestellt, die auf die Bedruckung oder auf deren Vorbehandlung zurückzuführen ist. Aufgrund der unterschiedlichen Verfahren ist eine Veränderung der mechanischen Eigenschaften durch den Bedruckungsprozess nicht auszuschließen.

#### **2.4.2.5 Innere mechanische Beschädigungen**

Materialermüdung schädigt den Werkstoff langsam, und zwar durch eine vielfache mechanische Beanspruchung, beispielsweise in Form einer zyklischen Druck-, Zug- oder Biegebeanspruchung. Die weichen ETFE-Folien unterliegen zwar systembedingt häufigen Verformungen, die Beanspruchungsart ist aber ausschließlich Zug, wenn die geringen Druck- und Biegebeanspruchungen an der Folieneinspannung vernachlässigt werden. Erfahrungsgemäß sind die Dehnungen und Winkeländerungen für den duktilen Werkstoff zu klein, um eine signifikante Materialermüdung zu bewirken. Wöhlerkurven an ETFE-Probekörpern liegen bislang nicht vor.

#### **2.4.2.6 Äußere mechanische Beschädigungen**

Eine plötzliche Beschädigung kann durch äußere Einwirkungen während des gesamten Herstellungsprozesses oder auch während der Nutzung erfolgen. Knicke oder Risse, die bei der Fertigung, dem Transport oder der Montage durch unsachgemäße Handhabung geschehen, können die Festigkeit mindern. Die Versuche der University of Bath (s. Kap. 2.2.2.2) zeigen, dass bei zuvor geknickten Proben der Weiterreißwiderstand der Folie nicht gelitten hat. Ob dies für die Festigkeit ebenfalls gilt, wurde bislang nicht systematisch untersucht. Beschädigungen mit Folgen für die Tragfähigkeit oder die Gebrauchstauglichkeit der Folie werden i.d.R. durch Maßnahmen der Qualitätssicherung ausgeschlossen bzw. durch anschließenden Austausch oder Reparatur behoben. Verletzungen der Folie während der Standzeit, beispielsweise durch Vogelpicken, Vandalismus, Hagelschlag, herabfallende Äste o. ä., können bei der Bemessung nicht berücksichtigt werden. Man kann ihnen durch planerisch-konstruktive Vorkehrungen in gewissem Maß vorbeugen, ganz auszuschließen sind sie jedoch nicht. Treten sie auf, werden sie bei erwarteten Folgen für die Tragfähigkeit oder Gebrauchstauglichkeit behoben.

#### **2.4.2.7 Lokale Dimensionsänderungen (Schweißnähte)**

Die produktionsfrische Rollenware der ETFE-Folie ist derzeit maximal 1.550 mm (NOWOFLON®) bzw. 1.600 mm (FLUON®) breit. Größere Membranflächen müssen daher aus mehreren Teilflächen zusammengefügt werden. An der Fugestelle entsteht eine lokale Dimensionsänderung, die einen Steifigkeitssprung der Folie und einen Einfluss auf die Tragfähigkeit haben kann.

Die übliche Fügetechnik für ETFE-Folien ist das Wärmeimpulsschweißen (s. Abb. 2.19). Die zusammenzufügenden Teilflächen werden hier mit einer ca. 10 mm breiten Schweißnaht thermisch verbunden, d.h. verschmolzen. Derzeit gibt es für ETFE-Folien zwei Varianten des Wärmeimpulsschweißens, das diskontinuierliche (*engl.: discontinuous*) Verfahren, auch Balkenschweißverfahren genannt, und das kontinuierliche (*engl.: continuous*) Verfahren, auch Rollenverfahren genannt.

Beim Balkenschweißverfahren werden die Teilflächen stempelartig zwischen mindestens zwei Heizbalken (Heizleisten, s. Abb. 2.19), zusammengepresst. Mit diesem Verfahren lassen sich verfahrensbedingt nur gerade bzw. polygonale Schweißnähte erzeugen. Die Balkenlänge beträgt derzeit bis zu 12 m. Mit diesem sehr schnellen Verfahren lässt sich eine ziemlich konstante Schweißnahtfestigkeit erreichen. An den Überlappungsstellen der Schweißnaht am Balkenende wird die Schweißnaht jedoch zweimal erhitzt, was zu lokalen Festigkeitseinbußen führen kann.

Verfahren	Prinzipdarstellung	Kurzbeschreibung
Heizelementschweißen		a) Die Fügeflächen werden durch Kontakt an heißen Flächen erwärmt. b) Nach Entfernen des Heizelementes werden sie unter Druck gefügt.
Wärmeimpulsschweißen		Die Erwärmung der Schweißnaht geschieht durch das Material hindurch mit elektrisch geheizten Heizleisten. – Nur für Folien geeignet –
Heizdraht-Widerstandsschweißen		In die Fügezone eingelegter Draht wird mit elektrischem Strom oder auch induktiv erwärmt. Draht verbleibt nach dem Schweißen im Schweißgut.
Induktionsschweißen		Metallstaubgefülltes Schweißhilfsmittel wird induktiv im HF-Magnetfeld erwärmt. – EMA-Schweißen –
Strahlungsschweißen		a) Die Fügeflächen werden mit Strahlung (Dunkelstrahler, Hellstrahler, Laser) erwärmt und b) unter Druck zusammengefügt.
Reibschweißen		Erwärmung der Fügeflächen durch Reibung aneinander unter gleichzeitiger Druckeinwirkung. – Rotation, Vibration –
Ultraschallschweißen		Mechanische Ultraschallschwingungen unter statischem Druck führen zu innerer, teils äußerer Reibung und zur Erwärmung.
Hochfrequenzschweißen		Erwärmung im elektrischen Hochspannungswechselfeld ( $f = 27,12 \text{ MHz}$ ) durch dielektrische Verluste

Abb. 2.19 Übersicht der Verfahren zur Verschweißung zweier Kunststoffteile aus demselben thermoplastischen Werkstoff (ohne zusätzliches Schweißmaterial), Werkbild RÖHM, Darmstadt, aus FRANK, 2000 [62]

Beim kontinuierlichen Verfahren wird i.d.R. die auf Zahnstangen verfahrenbare Schweißmaschine entlang des Schweißtisches mit den zusammenzufügenden Folienteilflächen verfahren. Zwischen den Heizbalken und der Folie sorgen Metallbänder oder teflonbeschichtete Glasgewebebänder für die erforderliche Gleitfähigkeit. Der Abdruck eines Teflonbandes ist auf der Schweißnaht durch die eingeprägte Struktur deutlich erkennbar (s. Abb. 2.20). Hingegen erzeugt ein Metallband eine glatte Schweißnaht.

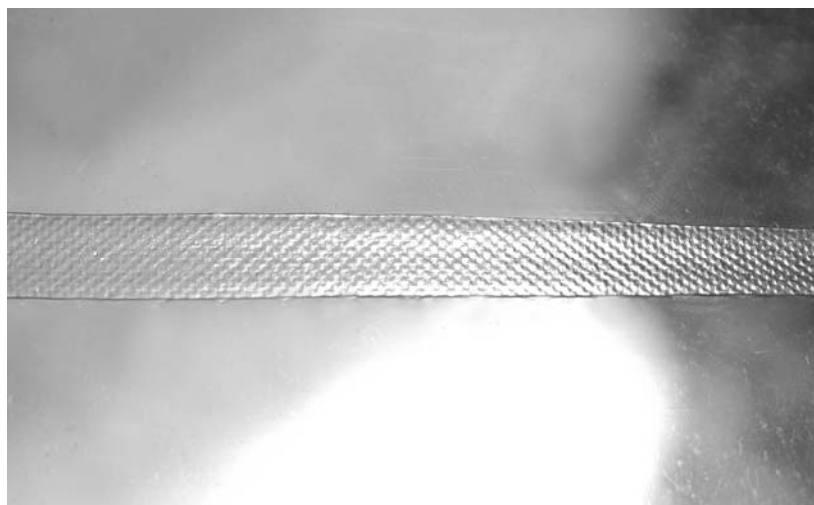


Abb. 2.20

Kontinuierlich erzeugte ETFE-Schweißnaht, Folie Nowofol ET 6235, Schweißnaht COVERTEX, Foto: K. MORITZ

Das kontinuierliche Verfahren mit einem kurzen Heizbalkenpaar (oben/unten) ermöglicht Schweißnähte mit eingeschränkten Kurvenradien und damit die Herstellung komplexer oder ausgerundeter Membranformen unter Minimierung zuschnittsbedingter Zusatzspannungen (s. Kap. 4.6.3). Allerdings können aufgrund des Vorschubs unregelmäßige Nahtkanten mit der Folge möglicher Festigkeitsverluste auftreten.

In Abhängigkeit der zu verschweißenden Foliendicken und der Anzahl der Folienlagen ergeben sich folgende wesentlichen Schweißparameter: Heizbalkentemperatur, Kühlbalkentemperatur, Anpressdruck (ggf. auch Spaltbreite) des Heizbalkens, Vorschubgeschwindigkeit beim kontinuierlichen Verfahren bzw. Haltedauer beim diskontinuierlichen Verfahren. Hierdurch ergeben sich die abhängigen Parameter der Aufheiz- und der Abkühlgeschwindigkeit. Bei korrekt eingestellten Schweißparametern versagt nicht die Nahtverbindung selbst, sondern die Folie an der Nahtkante durch den unvermeidbaren Steifigkeitssprung.

Sowohl beim kontinuierlichen als auch beim diskontinuierlichen Verfahren entstehen homogene Flächnähte, deren Dicke über den Anpressdruck in gewissem Maß eingestellt werden kann. Die maximal erreichbare Schweißnahtdicke wird durch die Summe der zu verbindenden Teilflächen bestimmt. Die homogenen Folienschweißnähte übertragen die Kraft direkt von Teilfläche zu Teilfläche. Dies stellt einen bedeutenden Unterschied zu verschweißten Gewebemembranen dar, bei denen die Kraft von einer Gewebeteilfläche zur anderen ausschließlich über die Beschichtung erfolgt. Folienschweißnähte unterliegen daher theoretisch - im Unterschied zu den beschichteten Geweben - denselben zeitabhängigen Alterungsfaktoren, wie die Folie selbst.

Schweißnahtkreuzungen können zu verminderten Festigkeiten im Kreuzungsbereich führen, weshalb sie nach Möglichkeit vermieden werden. Sie sind grundsätzlich schwer zu schweißen und bedürfen zumeist einer Anpassung der Schweißparameter. An Rändern stoßen die Schweißnähte der Folienteilflächen (Flächennähte) auf die der Randtaschen (Randnähte). Es entsteht dort eine nicht vermeidbare T-förmige Schweißnahtkreuzung.

Die Schweißnaht liefert neben dem unvermeidbaren Schweißschrumpf sowie der möglichen mechanischen Verstreckung zwei weitere Einflussfaktoren auf die Eigenschaften eines ETFE-Folienelementes:



- Die Schweißnaht ist etwa so dick, wie die Summe der zusammengefügt Folienteilstücke. Daher sind Querschnitt und Steifigkeit der Schweißnaht größer als in den angrenzenden Folienteilen. Hierdurch übernimmt die Schweißnaht einen größeren Lastabtrag, der zu einer Reduktion des Spannungsniveaus im schweißnahtnahen Bereich führt. Die erhöhte Schweißnahtsteifigkeit führt zudem zu einem anderen Spannungsverhältnis (Tendenz in Richtung monoaxialer Spannungszustand) als im Feldbereich zwischen den Schweißnähten.
- Die Bruchspannung und die Bruchdehnung einer Folie mit Schweißnaht sind senkrecht zur Schweißnaht geringer, als die einer Folie ohne Schweißnaht (monoaxiale Kurzzeitzugversuche s. Abb. 4.15 ff). Dies ist zum einen auf den Steifigkeitssprung an der Schweißnahtkante, zum anderen aber auch ggf. auf eine festigkeitsmindernde Veränderung der ETFE-Kettenmoleküle durch den Schweißvorgang zurückzuführen.

Bruchspannungen und Bruchdehnungen von Schweißnähten wurden oft monoaxial getestet. Eigene Ergebnisse monoaxialer Kurzzeitzugversuche sind in Kap. 4.3.2 dargestellt. Sofern die Bruchspannung als Basis für den Grenzwert der Tragfähigkeit herangezogen wird, ist die der Folienprobe mit Schweißnaht im Normalfall maßgeblich.

Die lokal erhöhte Schweißnahtsteifigkeit wirkt sich bei der Bemessung analog einer Seilverstärkung günstig aus, was jedoch wegen des erhöhten Aufwandes bei der Eingabe i.d.R. nicht berücksichtigt wird. Ein weiterer Aspekt ergibt sich nicht durch die Schweißnaht selbst, sondern durch ihre Form, also den Zuschnitt. Es ist bekannt, dass der Zuschnitt einen Einfluss auf die Spannungsverteilung in einer Membran hat. LINHARD, WÜCHNER und BLETZINGER haben in ihrem Beitrag *Introducing Cutting Patterns in Form Finding and Structural Analysis* 2005 [109] mit FE-Berechnungen an schubsteifen Folien gezeigt, dass sich für antiklastische Flächen an den Teilflächenrändern erhöhte Spannungen ergeben. Bei synklastischen Flächen (Pneus) verhält es sich umgekehrt, d.h. die Teilflächenränder weisen ein niedrigeres Spannungsniveau auf, als die Mittenbereiche der Teilflächen. Die Differenzen hängen von der GAUSS'schen Krümmung, den Steifigkeiten des Materials und der Belastung ab. Es entstehen also Spannungsdifferenzen zwischen einer Berechnung auf der Basis der Formfindungsgeometrie und einer Berechnung auf der Basis der tatsächlich ausgeführten Zuschnittsgeometrie. Vergleichende Berechnungen sind in Kap. 4.6.3 dargestellt.

#### **2.4.2.8 Randverbindungen**

Die Folien werden an ihren Rändern durch metallische Klemmprofile (Klemmrand (steif) s. Abb. 2.21 a) oder durch in Folientaschen verlaufende Randseile (Hohlraum (weich) s. Abb. 2.21 b) gehalten. Die Randseile bestehen häufig aus nicht rostenden, langfristig korrosionsgeschützten oder ummantelten Stählen, die Klemmprofile aus eloxiertem Aluminium (z.B. <sup>®</sup>HASTELLOX x-alloy). Gelegentlich findet man Gelenkketten, wie beim Projekt Informationszentrum Walchenseekraftwerk, die eine Kombination aus biegesteifen Klemmprofilen mit einer relativ weichen Randkonstruktion bilden (s. Abb. 2.21 c).

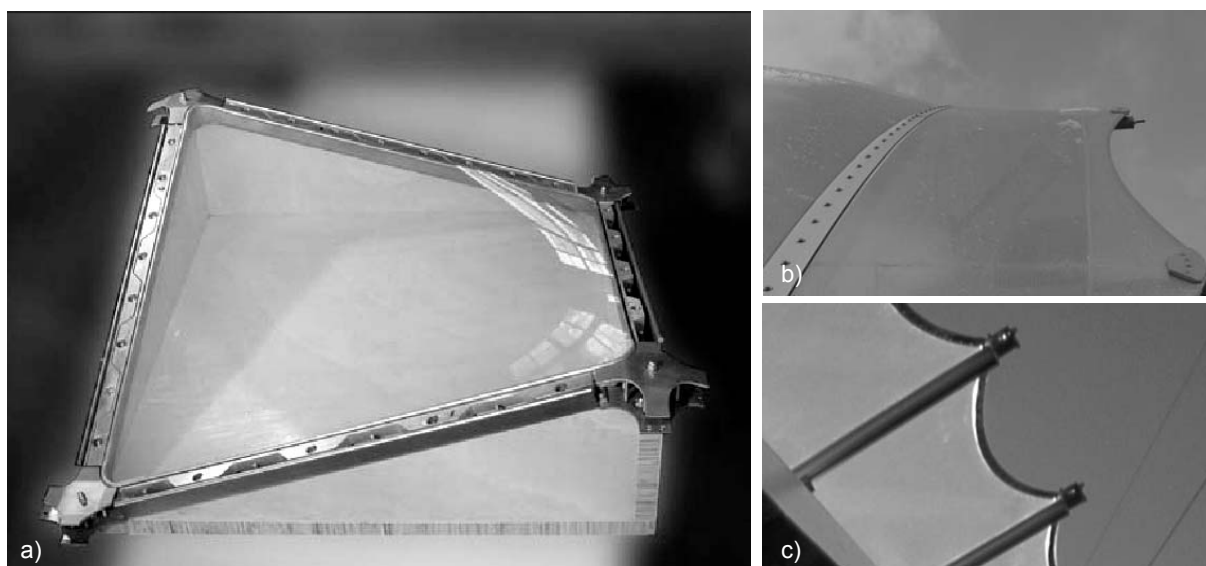


Abb. 2.21 a) Klemmrand (Profilentwicklung COVERTEX für Projektstudie NICHOLAS GRIMSHAW & PARTNERS) [183], b) Hohlsaum (Randseil in Folientasche) (Vordach des Scene Fluglabors in Holzkirchen, Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP)), c) Gelenkkette aus rostfreiem Edelstahl (E.ON-Informationszentrum Walchenseekraftwerk, Kochel am See), Fotos b) und c): K. MORITZ

Der bautechnische Nachweis der Randverbindungen erfolgt zumeist auf der Grundlage monoaxialer Auszugsversuche mit den tatsächlichen Befestigungsmitteln der Klemmprofile. Hiermit können die folgenden Versagensmechanismen erfasst werden:

- Versagen des Klemmprofils durch übermäßige Verformung oder Bruch
- Herausrutschen der Folie mitsamt dem Keder, z.B. bei Maulöffnung infolge übermäßiger Verformung des Klemmprofils oder übermäßiger Verformung des Keders
- Versagen der Seiltasche (beim Hohlsaum mit Seil) bzw. der Kedertasche am Taschenrücken oder an der Schweißnahtkante (beim Klemmprofil mit Keder)

Die Auszugsversuche werden i.d.R. monoaxial durchgeführt. Da der Kraftfluss in der Randtasche in Abhängigkeit von der Konstruktion und der Geometrie häufig anders ist, als bei den Schweißnähten zwischen zwei Teilflächen im Feld, kann die Prüfung von Folien mit Schweißnähten für beide Schweißnahtarten unterschiedliche Festigkeiten liefern. Bei sachgemäßer Konstruktion einer Randverbindung fließt die Folie lange, bevor einer der o.g. Versagensmechanismen eintritt. Zudem versagen die i.d.R. breiten Auszugsproben durch ausgeprägte mehrachsige Spannungsverhältnisse in den Ecken des Probekörpers an der Einspannung (s. Kap. 4.3.4). Dieser Versagensfall hat mit dem Verhalten der in situ umlaufend gehaltenen Systeme oft wenig zu tun. Die praxismgerechte Prüfung der Randverbindungen ist bislang nur etwa bis zum Bemessungslastniveau zufrieden stellend gelöst. Vor Erreichen des Bruchlastniveaus der Folien führen i.d.R. verfahrensbedingte Randstörungen zum vorzeitigen Versagen der Probekörpergeometrien. Um daher die Versagenslast für ein Klemmprofil zu erfassen, werden Auszugsversuche zuweilen mit dünnen Geweben oder Blechstreifen (anstelle der ETFE-Folie) durchgeführt oder Verformungsnachweise auf der Basis von FE-Vergleichsrechnungen geführt.

Unsauber gefertigte oder unbehandelte bzw. unsachgemäß beschichtete Randverbindungen können langfristig auch Strukturveränderungen oder mechanische Beschädigungen der Folie bewirken, und zwar durch:

- Übermäßige Oberflächenrauigkeit oder scharfe Kanten
- Kontaktkorrosion

Beide Punkte werden durch entsprechende Maßnahmen der Qualitätssicherung ausgeschlossen. Indirekt kann die Tragfähigkeit von ETFE-Foliekonstruktionen auch durch folgende Faktoren beeinflusst werden:

- An den Kontaktflächen zwischen Folie und metallischen Bauteilen können durch Wärmeleitung andere Temperaturen herrschen, als im restlichen Folienbereich; Elastomere werden hier als thermische Trennschicht eingesetzt.
- Die Reibung zwischen Klemmprofil und Folie kann in Kombination mit dem Anpressdruck an den Umlenkkanten zu einer tangential zur Klemmlinie auftretenden Verformungsbehinderung und zu räumlichen Spannungszuständen in der Folie führen.

Eine systematische Parameterstudie zu dem Themenkomplex der Konstruktion von ETFE-Foliensystemen existiert bislang nicht. Sie würde sich durch die Vielzahl und die permanente Weiterentwicklung der Herstellersysteme vermutlich schwierig gestalten.

#### 2.4.2.9 Seil(netz)stützungen und seilnetzverstärkte Folien

Grundsätzlich kann der Kontakt mit metallischen Seilen und Seilnetzen einen Einfluss auf die Tragfähigkeit der Folie haben, beispielsweise durch mechanische Beschädigung, Kontaktkorrosion, Wärmeeintrag, Reibung und Dehnungsbehinderung. Parameterstudien zu Einflüssen und Wechselwirkungen sind bislang nicht publiziert.

Der Herstellung eines dauerhaften und definiert schubfesten Seilnetz-Folien-Verbundes, die so genannte seilnetzverstärkte Folie, ist bislang noch nicht gelungen. Einen ersten Ansatz für seilnetzverstärkte Folien liefert das Unternehmen AIRLIGHT Ltd., das seit einigen Jahren mit pneumatisch gestützten, seilnetzummantelten Folienschläuchen experimentiert (s. Abb. 2.22).

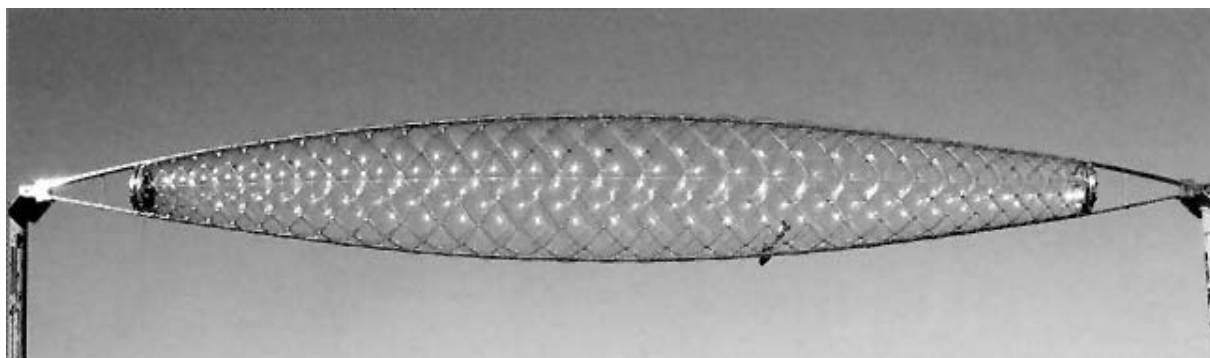


Abb. 2.22 Pneumatisch gestützte, seilnetzummantelte Folienschläuche (Transparent TENS AIRITY® Girder), LUCHSINGER, R.H. und CRETTOLETT, R. 2006 [211]

Ein weiterer diesbezüglicher Ansatz kommt vom Institut für Membran- und Schalentechnologie e.V., OFF et. al. 2003 [85]. Hier wird ein vom Unternehmen BEKAERT® hergestelltes Gurtsystem mit einem ETFE-Folienpneu gekoppelt. Der Gurt besteht aus einer Schar paralleler Seillitzen, die mit einem transparenten Polyurethan- oder Fluorpolymerwerkstoff zu einem Gurt vergossen sind. Durch den pneumatisch erzeugten Anpressdruck des Pneus entsteht eine ausreichende Haftreibung zwischen den beiden Kunststoffen, um einen schubfesten aber lösbaren kraftschlüssigen Kontakt zu erzeugen (s. Abb. 2.23 a bis c).

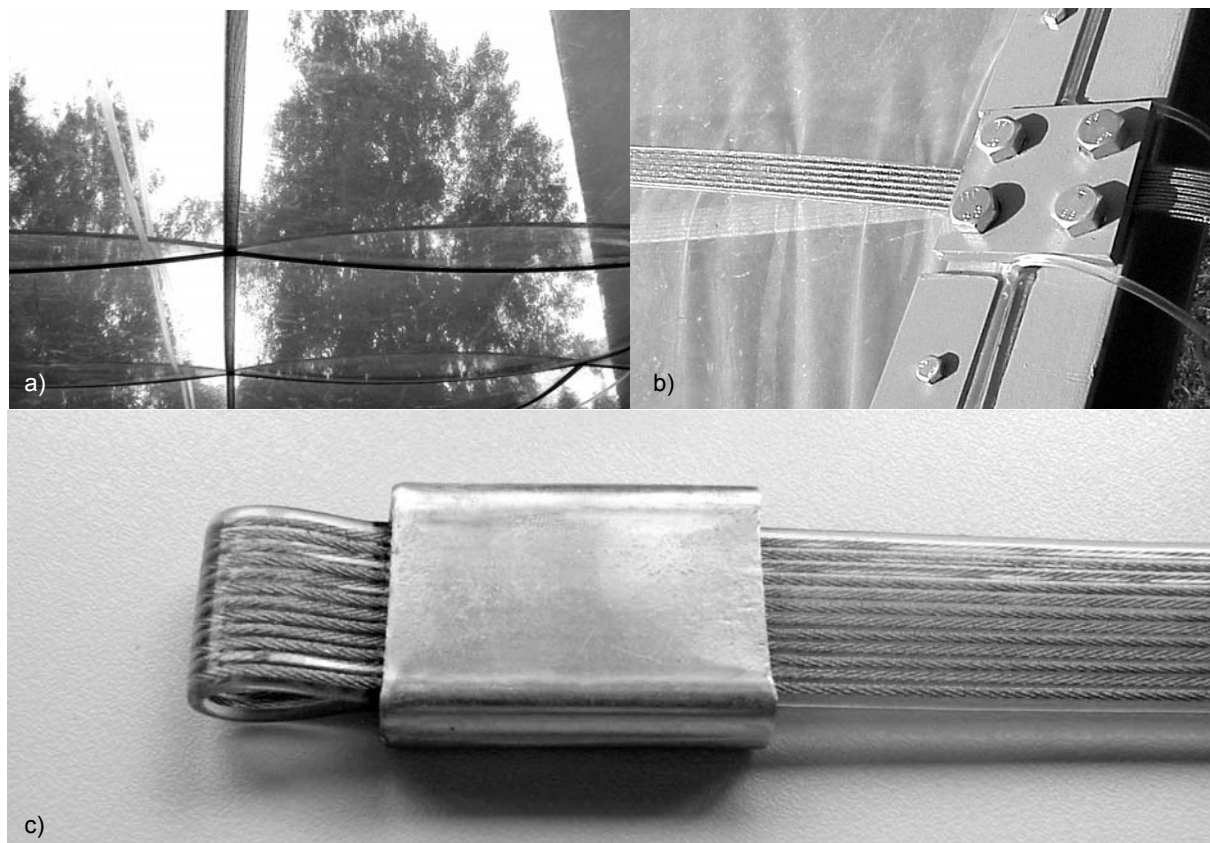


Abb. 2.23 Gurtverstärkter ETFE-Testpneu: a) Untersicht, b) Gurtklemmung, c) BEKAERT® Gurtsystem, OFF, R. 2003 [85], 2004 [142]

Die folgenden Veröffentlichungen geben konkrete Hinweise zur konstruktiven Ausbildung bereits realisierter ETFE-Folienkonstruktionen:

- 📖 LEHNERT, SCHWEEN 2006 (Bauen mit Folienkissen) [107]
- 📖 RUDORF-WITRIN, STIMPFLE, BLÜMEL und PASTERNAK 2006 (Von der CargoLifter-Werfthalle zu Tropical Islands – Konstruktion, Herstellung und Montage der neuen ETFE-Folienkissen-Eindeckung) [157]
- 📖 MORITZ, BRENGELMANN und SCHIEMANN 2005 (Tankstellendächer aus Stahl und Folie) [132]
- 📖 MORITZ 2005 (Die Stadionhülle der Allianz Arena) [126]

- 📖 ZETTLITZER 2005 (Allianz Arena – Planung, Fertigung und Montage der Kissenhülle) [199]
- 📖 LEHNERT 2004 (Vor- und Nachteile von Glas- und Foliensystemen) [106]
- 📖 SCHÖNE 2004 (Florale Transparenz: Das neue Dach über dem Innenhof der IHK in Würzburg) [177]
- 📖 ZETTLITZER 2004 (Pneumatisches Bauen am Beispiel der Allianz Arena München) [200]
- 📖 BARTHEL, BURGER und SAXE 2003 (Dachkonstruktionen mit ETFE-Folie) [9]
- 📖 MORITZ und BARTHEL 2003 (Bauen mit ETFE-Folien) [124]
- 📖 MORITZ 2003 (Transparente Gebäudehüllen aus ETFE-Folie) [128]
- 📖 BARTHEL und BURGER 2002 (ETFE-Folie für eine transluzente Dachkonstruktion eines Konferenz- und Ausstellungsgebäudes) [10]
- 📖 MORITZ und BARTHEL 2002 (Transparente Architektur) [125]
- 📖 ROBINSON, KOLOKOTRONI und TANNO 2001 (ETFE Foil Cushions in Roof Atria) [156]
- 📖 LEHNERT 2000 (Folien für Fassaden und Dächer - drei Beispiele) [105]
- 📖 TANNO 1997 (ETFE Foil Cushions as an alternative to glass for atriums and rooflights) [192]
- 📖 COOK, LIDDELL und GILL 1994 (Cushion Roof System for a Hospital Atrium) [35]

Neben der zuvor bereits genannten Literatur zu Polymerwerkstoffen geben die folgenden Veröffentlichung einen Überblick über das Langzeitverhalten von Kunststoffen, sowie über die diesbezüglichen Schädigungsprozesse und Materialprüfungen:

- 📖 BEGEMANN 1999 (Alterung Technischer Textilien) [16]
- 📖 KREBS, AVONET und LEU 1999 (Langzeitverhalten von Thermoplasten) [102]
- 📖 SARABI 1984 (Das Anstrengungsverhalten von Polymerwerkstoffen infolge ein- und zweiachsigen Kriechens – Ermittlung von Langzeitbemessungskennwerten) [159]
- 📖 KAUSCH 1979 (Schädigungsprozesse in Kunststoffwerkstoffen) [94]
- 📖 JUILLARD und MAZZO 1976 (Extrapolationsverfahren zur Berechnung der zulässigen Langzeitbeanspruchung von Kunststoffen [90]

Angaben zur Beständigkeit von ETFE (-Folien), EPDM (-Kedern) und Aluminium (-Klemmprofilen) gegenüber etlichen chemischen und biologischen Substanzen verschiedener Konzentrationen finden sich in:

- 📖 KASS (BÜRKLE AG) 2003 (Tabelle “Chemische Beständigkeit von Kunststoffen und Metallen“) [93]
- 📖 DuPONT® 2003 (TEFZEL® Fluorpolymer Resin– Chemical Use Temperature Guide) [44]
- 📖 HOECHST® AG 1983 – 1991 (Informationsblätter und Broschüren zum Werkstoff Hostaflon ET 6235) [79]

## 2.5 Bemessung

### 2.5.1 Allgemeines

Die Grundlagen der Bemessung von Konstruktionen im Hochbau sind in Euronormen und in überführten nationalen Normen definiert, z.B. in EN 1990:2002: *Grundlagen der Tragwerksplanung* [N26], sowie DIN 1055-100:2001: *Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung, Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln* [N1]. Hierin sind die derzeit zur Verfügung stehenden Möglichkeiten einer Bemessung erläutert.

Grundsätzlich basiert die Bemessung heute auf den Nachweisen für die Grenzzustände der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit sowie auf Teilsicherheitsbeiwerten auf der Einwirkungs- und auf der Widerstandsseite.

Durch fehlende Normen auf der Widerstandsseite der Membranen und Bauteile aus Kunststoff wird die Nachweisführung bei ETFE-Folienkonstruktionen noch immer projektbezogen festgelegt. Die teils unterschiedlichen Kenntnisstände und Auffassungen der Tragwerksplaner, Materialprüfer, Prüfsingenieure und Behördenvertreter führen zu deutlichen Unterschieden im jeweiligen Bemessungsverfahren und vermutlich auch im tatsächlich erreichten Zuverlässigkeitsniveau.

Für die Bemessung sind nicht nur die Eigenschaften der produktionsfrischen Folie, sondern auch die Eigenschaftsveränderungen der Folie im geplanten Nutzungszeitraum relevant. Diese sind ebenfalls statistisch verteilte Größen, die vom Standort, der Bauart, der Konstruktion, der Nutzung, der Umgebungsbedingungen u.a. abhängen. Sie sind im Fall eines konkreten Projektes nicht im Vorhinein bekannt und müssen zuverlässig aus Versuchen und Erfahrungswerten abgeschätzt werden.

Als Erfahrungswerte dienen beispielsweise die Kenntnisse, wie sich die Folien über die Jahrzehnte in der Praxis bewährt haben. Ab Beginn der Bauweise, also seit etwa 25 Jahren, sind kaum quantitative Angaben über die tatsächliche Veränderung der Festigkeiten, Steifigkeiten oder Dehnungen publiziert. Versagensfälle, die auf derartige Veränderungen oder auf einen Bemessungsfehler zurückzuführen wären, sind nicht bekannt. Dies bedeutet nicht, dass die eingesetzten Folien noch immer die gleiche Steifigkeit, Festigkeit und Geometrie wie am Tag des Einbaus besitzen, oder dass das seinerzeit erreichte Zuverlässigkeitsniveau den heutigen Anforderungen der Normung entspricht.

Die Versuche zur Abschätzung langfristiger Eigenschaftsänderungen bestehen heute zumeist aus 1.000 h - Tests, die mit einer erhöhten Beanspruchung (im Vergleich zu der in situ erwarteten Beanspruchung) nach geregelten Prüf- und Auswerteverfahren durchgeführt werden. In Intervallen durchgeführte Messungen ermöglichen die Auftragung der Ergebniswerte der jeweiligen Eigenschaft über die logarithmische Zeitachse. Entsprechend einschlägiger Literatur erlaubt dieses Verfahren eine Prognose mit einem zeitlichen Extrapolationsfaktor 100. Das entspricht einer geplanten Nutzungsdauer von  $10^5$  Stunden, also etwa 12 Jahren. Für weiterreichende Prognosen wären die Versuche entsprechend zu verlängern. Darüber hinaus werden Langzeittests ohne erhöhte Dosis bzw. Beanspruchung, beispielsweise unter Freibewitterung, zumeist über mindestens 10 Jahre durchgeführt. Streng genommen erlaubt dieses Verfahren keine zeitliche Extrapolation. Tendenzen sind aber i.d.R. auch bei diesem Verfahren erkennbar.

Nach DIN 1055-100 (s. auch EC 1, EN 1990, GruSiBau etc.) wird für "übliche" Hochbauten eine Versagenswahrscheinlichkeit von  $p_f < 1 \cdot 10^{-6} / \text{Jahr}$  definiert. Die damit definierte Überlebenswahrscheinlichkeit muss für eine geplante Nutzungsdauer von 50 Jahren gewährleistet sein. Alle Sicherheitselemente, auch die anzusetzenden Teilsicherheitsbeiwerte auf der Einwirkungs- und auf der Widerstandsseite werden in Abhängigkeit von der geplanten Nutzungsdauer ausgelegt. Abb. 2.24 zeigt den Einfluss der geplanten Nutzungsdauer auf den Teilsicherheitsbeiwert einer Windeinwirkung.

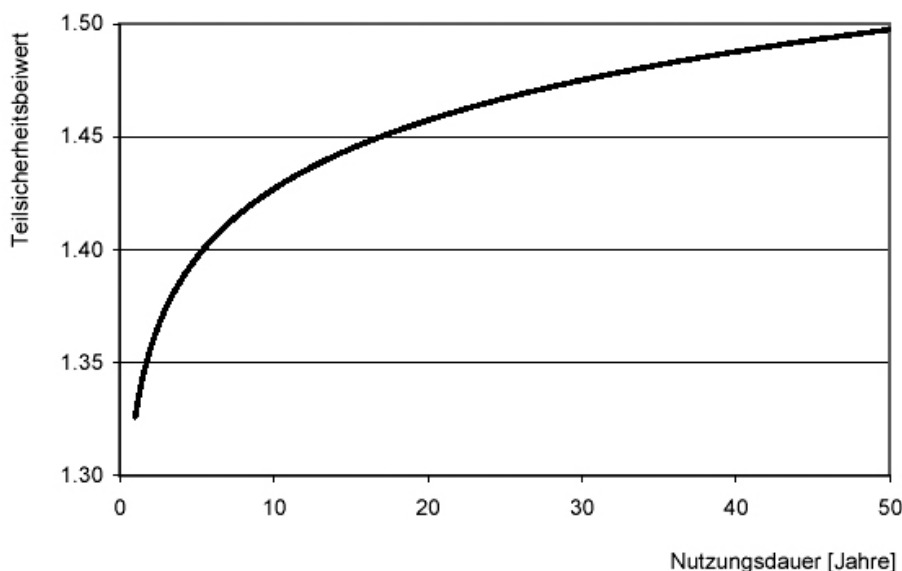


Abb. 2.24

Teilsicherheitsbeiwert einer Windeinwirkung in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer, HORTMANNS und HÜGLE 2004 [82]

Etliche transparente Polymerwerkstoffe im Außenbereich erreichen diese Nutzungsdauer baustoffbedingt nicht. Je nach Qualität (Resistenz) müssen sie häufig vorzeitig ausgetauscht werden. Als Beispiel sei die nach etwa 25 Jahren erneuerte transparente Dacheindeckung des Olympiastadions in München genannt.

Die bislang durchgeführten Langzeittests und die o.g. Praxiserfahrung erlauben für ETFE-Folien derzeit die Prognose einer Mindestnutzungsdauer von etwa 25 Jahren. Ob die Folien eine 50-jährige Nutzungsdauer zulassen, kann derzeit nicht zuverlässig vorausgesagt werden.

### 2.5.2 Bemessungskonzept der zulässigen Spannungen

Bis zu Beginn des 21. Jahrhunderts wurde wohl die überwiegende Zahl der ETFE-Folienkonstruktionen in Deutschland nach dem Konzept der zulässigen Spannungen statisch bemessen. Diese Methode wird in der EN 1990:2002-10 als NORM I -Verfahren (Stufe I) bezeichnet. Mit Übergangsfristen war dieses Verfahren auch im Stahlbau, Stahlbetonbau, Mauerwerksbau und Holzbau lange Zeit anwendbar.

Das Verfahren beruht im Kern auf der Definition zulässiger Beanspruchbarkeiten (Spannungen, Schnittgrößen oder Verformungen) auf der Basis empirisch gewonnener Daten über das Materialverhalten, welche den rechnerisch ermittelten Beanspruchungen unfaktoriert gegenübergestellt werden. Die Sicherheiten werden bei diesem Verfahren nicht getrennt für die Widerstands- und für die Einwirkungsseite bestimmt, sondern sind als Gesamtsicherheit im zulässigen Wert der Beanspruchbarkeit enthalten.

Für das TEXLON<sup>®</sup>-Dachsystem mit Folienkissen des Unternehmens FOILTEC<sup>®</sup> wurde auf der Grundlage dieses Bemessungskonzeptes das allgemeine bauaufsichtliche Prüfzeugnis (ABZ) Z-10.5-91 [2] vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) erteilt. Darin wird die zulässige Spannung infolge Windlasten mit  $\sigma_{zul, Wind} = 22 \text{ N/mm}^2$  angegeben. Sie ist der maximalen Spannung für diesen Lastfall auf der Basis unfaktorisierter Lasten gegenüberzustellen. Das im Prüfzeugnis spezifizierete System besteht aus einem seilunterspannten ETFE-Folienpneu unter Verwendung des Folienmaterials NOWOFOLON<sup>®</sup> ET 6235 des Herstellers NOWOFOL<sup>®</sup>. Man orientierte sich bei der Festlegung der zulässigen Spannung für die Folie an den monoaxial ermittelten Kennwerten der Streckspannung ( $\sigma_{Streck} \cong 25 \text{ N/mm}^2$  (2. Knick der Spannungs-Dehnungs-Kennlinie) und der Bruchspannung ( $\sigma_{Bruch} \cong 52 \text{ N/mm}^2$ ) bei 23°C. Die nach einschlägigen Normen [s. NORM 22 und NORM 23] an schmalen Streifenproben monoaxial durchgeführten Versuche zeigten einerseits sehr hohe Bruchdehnungen der Folie und der Schweißnähte (mehrere hundert Prozent) und andererseits einen ausgeprägten plastischen Bereich mit stetig zunehmender Steigung. Dies bedeutet eine ausgeprägte Versagensvorankündigung sowie eine unterproportionale Spannungszunahme bei Laststeigerung.

Für andere Lasten bzw. für Lastüberlagerungen weist das o.g. Prüfzeugnis keine zulässigen Spannungen aus. Bei länger einwirkenden Lasten, wie z.B. einer Schneelast, hielt man – unabhängig von o.g. ABZ - zur Vermeidung von übergroßen Kriechverformungen i.d.R. geringere Maximalwerte ein, als bei den kurzzeitigen Windlasten. Man orientierte sich hier an dem als Fließgrenze betrachteten 1. Knick der monoaxialen Spannungs-Dehnungslinie ( $\sigma_Y \cong 16 \text{ N/mm}^2$ ,  $T = +23^\circ\text{C}$ ).

Der Bereich zwischen dem ersten und dem zweiten Knick der Spannungs-Dehnungslinie des Kurzzeitversuches wurde als Übergangsbereich aufgefasst, in dem die viskoelastischen Verformungen in Abhängigkeit der Temperatur weitgehend reversibel sind.

Aus monoaxialen Kriechversuchen bei +23°C wurde eine maximale dauerhafte Vorspannung von etwa 5-7 N/mm<sup>2</sup> auch für erhöhte Temperaturen abgeschätzt.

In kritischen Bereichen (z.B. in horizontalen Dachbereichen bei Pneus), wurde und wird das Risiko des Auftretens von Wassersäcken häufig durch konstruktive Maßnahmen minimiert, z.B. durch ein redundantes Luftzuführungssystem, d.h. ein Reservegebläse und eine Notstromversorgung oder auch durch eine Pneuentwässerung. Trotz Redundanz wurde der Lastfall Wassersack i.d.R. rechnerisch untersucht. Bei gegebener Redundanz wird er als außergewöhnliche Bemessungssituation behandelt, da er i.d.R. nur bei Betriebsstörung, z.B. bei Ausfall der Stromzufuhr und der Notstromversorgung, eintreten kann. Die Bemessungslast wird auf der Basis der für den Standort ermittelten Starkniederschlagsmenge (Angaben des Deutschen Wetterdienstes DWD) für einen vorgegebenen Zeitraum ermittelt. Der Zeitraum wird als Karenzzeit für die Behebung der Betriebsstörung sowie zur Lastevakuierung, z.B. durch Tauchpumpen, definiert. Diese Methode bedeutet eine Verknüpfung der Bemessung mit dem Sicherheitskonzept des Betreibers.

Grundsätzlich betrachtet man bei der Bemessung zunächst den maximal ermittelten Spannungswert. Dieser wird für Windlasten erfahrungsgemäß nur in lokal eng begrenzten Bereichen von Eck- oder Randsogspitzen erreicht. Diese Bereiche wurden häufig nach DIN 1055-4:1986 – Lastannahmen für Bauten: Verkehrslasten, Windlasten bei nicht schwingungsanfälligen Bauwerken [N2] ermittelt. Das Nachfolgedokument DIN 1055-4:2005 – Einwirkungen auf Tragwerke: Windlasten [N3] liefert gerade für die Bereiche der Rand- und

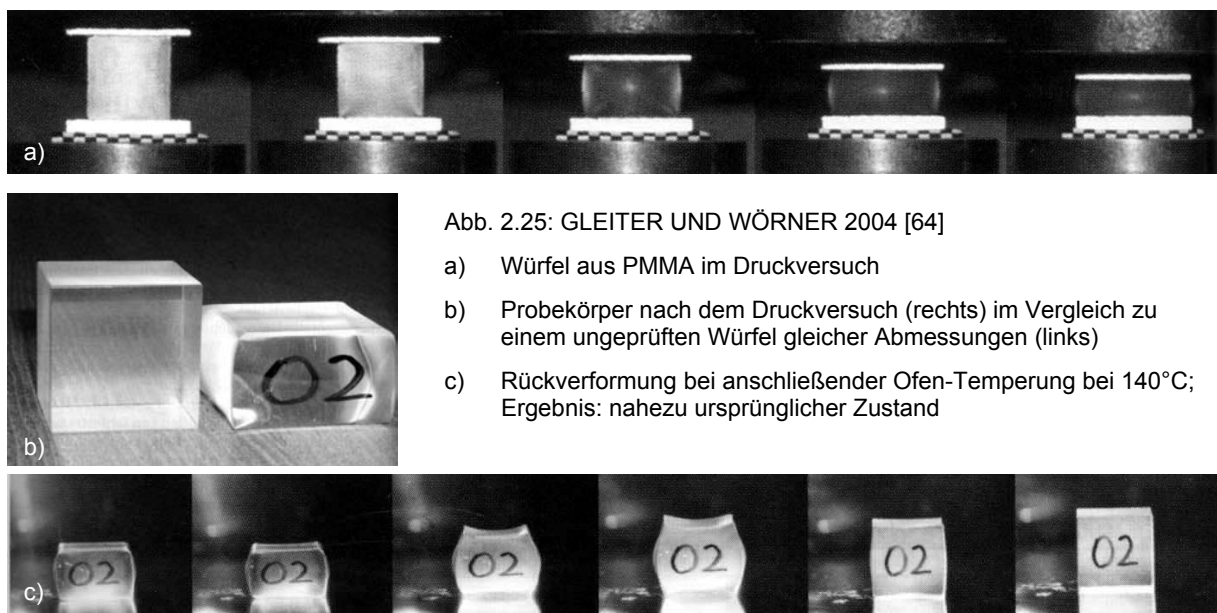


Ecksogspitzen von Flachdächern differenziertere und z.T. auch geringere Werte, so dass man die auf dem Vorgängerdokument basierenden Windlasten als konservativ einschätzen darf. Es ist anzunehmen, dass die für Windlasten zulässige Spannung bei vielen ETFE-Konstruktionen rechnerisch nicht ausgeschöpft und in situ auch nicht erreicht wird. Die realisierbare Spannweite hängt von den projektbezogenen Randbedingungen (Einwirkungen, Krümmungen, Grundrissgeometrie, Neigung, Anzahl der Folienlagen, Nutzung, Sicherheitskonzept etc.) ab. Mit Seilunter- und Seilüberspannungen, bei Ansatz mehrerer tragender Folienlagen oder bei geringen äußeren Lasten (z.B. in Innenhöfen) sind auch größere Spannweiten, als in Kapitel 1.1 genannt, möglich, wie die Projekte Garden of Eden in St. Austell (2000); IABG Ottobrunn (2005) und Tropical Island, Brand (2005) zeigen.

Obwohl i.d.R. nicht bekannt sein dürfte, welchen Einwirkungen eine ETFE-Folienkonstruktion während ihrer Standzeit tatsächlich ausgesetzt war, ist es dennoch ein Indiz für die Zuverlässigkeit bisheriger Bemessungskonzepte, dass von keinem der bis zu 25 Jahre alten Objekte ein Versagensfall des Foliensystems bekannt geworden ist, der auf die Bemessung zurückzuführen wäre. Die meisten realisierten Projekte wurden jedoch in den gemäßigten Klimazonen Mitteleuropas errichtet (s. Kap. 1). In wärmeren Regionen kann die ausgeprägte Temperaturabhängigkeit der ETFE-Folie evtl. zu Einschränkungen in der Anwendbarkeit führen oder andere konstruktive Lösungen erfordern.

Die ausgeführten Projekte zeigen auch, dass der Stich pneumatisch vorgespannter ETFE-Konstruktionen in Abhängigkeit von den jeweiligen Parametern, vor allem Temperatur und Spannung, mit der Zeit etwas zunehmen kann, was auf Kriechvorgänge bei hohen Temperaturen zurückgeführt wird. Mechanisch vorgespannte Konstruktionen verhalten sich in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur weich oder steif, was durch eine temperaturabhängige Relaxation erklärt werden kann, die jedoch nach bisherigen Erfahrungen größtenteils reversibel ist.

Das temperaturabhängige reversible Verhalten thermoplastischer Werkstoffe ist bekannt. Es ist auf die Entropie-Elastizität zurückzuführen, infolge derer die Struktur das Bestreben hat, ihren Ausgangszustand einzunehmen (s. Kap. 3). Ein Versuch am Institut für Werkstoffe und Mechanik der TU Darmstadt (GLEITER und WÖRNER 2004 [64]) veranschaulicht das Phänomen: Hier wurde ein Würfel aus PMMA im Druckversuch anscheinend irreversibel plastisch verformt (s. Abb. 2.25 a und b).



Anschließend wurde der verformte Würfel bei 140°C im Ofen getempert. Das Ergebnis war die nahezu vollständige Rückbildung der ursprünglichen Probekörperabmessungen (s. Abb. 2.25 c).

Über ähnliche Erfahrungen berichteten HENGL und GUST bereits 1989. Sie untersuchten den *“Einfluß von Vorbeanspruchungen auf die mechanischen Eigenschaften polymerer Werkstoffe“* am Beispiel des thermoplastischen Werkstoffes Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) [217].

Mit Kurzzeit-Zugversuchen, Zeitstand-Zugversuchen und Schnellzerreiversuchen zeigten sie anhand eines Vergleiches von vorbeanspruchten und nicht vorbeanspruchten Proben, dass der Thermoplastwerkstoff ABS sein Spannungs-Dehnungsverhalten bereits bei relativ geringen Dehnungen (weit unterhalb der Streckgrenze) unter Dauerlast maßgeblich verändert und dass diese Veränderungen durch geeignete Wärmebehandlung weitgehend reversibel sind.

Demnach zeigten Proben, die zuvor im Kurzzeit-Zugversuch mit einer Dehnung von 10 % vorbeansprucht wurden, einen bereichsweise um 30 % reduzierten Tangentenmodul, bis die Spannungs-Dehnungs-Kurven oberhalb der Streckgrenze schließlich wieder in den Verlauf der nicht vorbeanspruchten Proben übergingen. Aber bereits durch anschließende Lagerung bei Raumtemperatur begannen sich die veränderten Eigenschaften wieder zurückzubilden. Bei höheren Temperaturen wurde dieser Ausheileneffekt noch verstärkt. Auf das fünffache der Streckgrenze vorgedehnte Proben erreichten nach anschließender Temperung (20 h bei 85°C bzw. 12 h bei 93°C) bis zu einer Dehnung von 1 % wieder nahezu die gleichen mechanischen Eigenschaften, wie die nicht vorbeanspruchten Proben.

Nach HENGL und GUST [217] verhalten sich prinzipiell auch Spannungs-Dehnungs-Kurven anderer vorbeanspruchter Polymerwerkstoffe derart, wobei es ihrer Ansicht nach unerheblich sei, ob sie amorph, teilkristallin oder mit Füllstoffen versehen sind.

### 2.5.3 Bemessungskonzept für Tragluftbauten (DIN 4134)

Die Norm DIN 4134 - Tragluftbauten; Berechnung, Ausführung und Betrieb [N6] wurde 1983 eingeführt. Sie beinhaltet ein Bemessungskonzept für Tragluflthallen mit pneumatisch gestützter Membran, die gleichzeitig die Hülle (Sekundärtragwerk) und das Primärtragwerk bildet. Derartige Konstruktionen wurden seinerzeit vornehmlich aus PVC-beschichtetem Polyestergewebe (PVC/PES-Gewebe) gefertigt.

Mit der Definition unterschiedlicher Teilsicherheitsbeiwerte für verschiedene Einwirkungen beinhaltet die Norm bereits Sicherheitselemente eines probabilistischen Bemessungskonzeptes\*. Sie enthält Angaben zu den anzusetzenden Lastannahmen - speziell zu Wind- und Schneelasten - in Abhängigkeit verschiedener Grundrissgeometrien und Stich-Radius-Geometrien - sowie Angaben zur Auslegung des Luftmanagements und des Halleninnendruckes. Der Begriff "Nenninnendruck" für den rechnerischen Halleninnendruck hat seinen Ursprung in dieser Norm.

Die Bemessung erfolgt hier auf der Ebene der Schnittgrößen (Kraft pro Meter [kN/m]). Es sind die folgenden drei Nachweise für die Hülle und ihre Verbindungen zu führen:

$$A \quad \text{"Wintersturm"}: \quad 1,0 \cdot n_g + 1,1 \cdot n_p + 1,6 \cdot n_w \leq \text{zul } n_0 \quad (2.2)$$

$$B \quad \text{"Sommergewitter"}: \quad 1,0 \cdot n_g + 1,1 \cdot n_p + 0,7 \cdot n_w \leq \text{zul } n_g \quad (2.3)$$

$$C \quad \text{"Dauerbeanspruchung"}: \quad 1,0 \cdot n_g + 1,3 \cdot n_p \leq \text{zul } n_t \quad (2.4)$$

Hierin bedeuten:

#### zulässige Festigkeiten

$\text{zul } n_0$  ist die zulässige Kurzzeitfestigkeit bei  $T = +20^\circ \text{ C}$  [kN/m]

$\text{zul } n_g$  ist die zulässige Kurzzeitfestigkeit bei  $T = +70^\circ \text{ C}$  [kN/m]

$\text{zul } n_t$  ist die zulässige Zeitstandfestigkeit bei  $T = +20^\circ \text{ C}$  [kN/m]

#### maximale rechnerische Beanspruchungen unter Gebrauchslasten

$n_g$  ist die maximale Membrankraft aus Eigenlasten [kN/m]

$n_p$  ist die maximale Membrankraft aus Überdruck [kN/m]

$n_w$  ist die maximale Membrankraft aus Windlasten [kN/m]

---

\* Probabilistisch nennt man ein Bemessungskonzept, bei dem die mit statistischen Modellen mit definierten Aussagewahrscheinlichkeiten eintretenden Versagenszustände quantitativ beurteilt werden. Hierbei werden zunächst die einzelnen Wahrscheinlichkeiten auf der Einwirkungsseite und auf der Widerstandsseite separat ermittelt und anschließend zur Beurteilung der Gesamtversagenswahrscheinlichkeit (Überlebenswahrscheinlichkeit) miteinander verknüpft. Als semiprobabilistisch wird ein Bemessungskonzept bezeichnet, wenn nicht alle Sicherheitselemente separat bzw. mit statistischen Methoden ermittelt wurden. (siehe DIN 1055-100 [N1], DIN EN 1990 [N26] und DIN EN 1991 (EC 1) [N27] Teile 1 bis 4)

Es werden in der DIN 4134 die folgenden bemessungsrelevanten Hinweise gegeben:

*Der Nachweis A gilt für die Bemessung bei extremer Windlast in den Herbst- und Winterstürmen bei der zugehörigen Temperatur.*

*Der Nachweis B erfasst die Bemessung bei extremer Windlast im Sommer und der dann nach vorheriger starker Sonneneinstrahlung noch erhöhten Temperatur der Hülle.*

*Der Nachweis C soll die durch Dauerbeanspruchung herabgesetzte Tragfähigkeit der Hülle erfassen.*

*Abweichend von DIN 1055-5:1975, Abs. 3.4.2, ist bei mechanischer Schneeräumung in Hüllbereichen mit weniger als 70° Neigung gegen die Horizontale als Schneelast  $s = 0,25$  kN je  $m^2$  Grundrissprojektion anzunehmen.*

*Mit einem Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_w = 1,2$  für die Kombination "Sommergewitter und Wärmeeinwirkung auf die Hülle aus Temperatur  $T=70^\circ$  C" sowie mit  $n_w$  (Sommergewitter) =  $0,6 n_w$  (Windlast nach DIN 1055 Teil 4, Anm.: 1977) ergibt sich:*

$$\gamma_w \cdot 0,6 \cdot n_w = 1,2 \cdot 0,6 \cdot n_w \cong 0,7 \cdot n_w \quad (\text{Windlast nach DIN 1055 Teil 4}) \quad (2.5)$$

*Soweit für Hüllenbaustoffe sowie ihre Verbindungen und Anschlüsse allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen erteilt wurden, sind die dort angegebenen zulässigen Festigkeiten der Berechnung zugrunde zu legen.*

Membranwerkstoffe und deren Verbindungen zählen in Deutschland zu den nicht geregelten Baustoffen/Bauarten, die mit wenigen Ausnahmen keine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung haben und daher einer Zustimmung im Einzelfall bedürfen. Im Rahmen dieses bauordnungsrechtlichen Verfahrens sind Versuche am tatsächlich eingesetzten Membranmaterial (Chargen) und an den Teilflächen- und Randverbindungen durch eine vom DIBt für Membranen zugelassene Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle vorgesehen, aus welchen auch die zulässigen Festigkeiten hervorgehen. Diese Versuche wurden bislang an monoaxialen Streifenproben bestimmt, und ggf. durch biaxiale Versuche ergänzt. Differenzen, die sich aus der Bestimmung der zulässigen Festigkeiten aus monoaxialen und biaxialen Versuchen ergaben, wurden in diesem Verfahren über einen Abminderungsfaktor auf die zulässige Festigkeit berücksichtigt, wenn – und das ist der Normalfall – in der ausgeführten Membranfläche mehrachsige ebene Beanspruchungen auftreten.

Die DIN 4134 [N6] wurde zu einem Zeitpunkt eingeführt, als die Verwendung der ETFE-Folienpneus im Bauwesen gerade erst begann. Die Pneubauweise war jedoch grundsätzlich schon bekannt (z.B. Plaza Pavillon, Osaka 1970, s. Abb. 1.12). Daher nahmen die Verfasser in den Erläuterungen zu Abschnitt 2 der Norm speziell zu dieser Bauweise Stellung: *"Wird die Hülle nicht durch die Luft des Innenraumes, sondern durch Stützkonstruktionen getragen, auch wenn diese aus luftgefüllten Bauteilen wie Schläuchen oder Wülsten bestehen, handelt es sich um keinen Tragluftbau im Sinne dieser Norm. Dies gilt auch für Gebäude mit Überdachungen aus selbst tragenden Luftkissenkonstruktionen."*

Diese Abgrenzung ist sinnvoll, da sich die Pneu- oder Luftkissenkonstruktionen in vielen grundlegenden Merkmalen von Traglufthallen unterscheiden (Größe, Form, Randverbindungen, Betrieb, Materialien etc.). Die für die Abgrenzung entscheidende Differenz der beiden Bauarten ist aber, dass Traglufthallen als Primärtragwerk systembedingt bei Ausfall des Stützdruckes in sich zusammenfallen. Hingegen sind Tragwerke mit integrierten Luftkissenkonstruktionen durch das Vorhandensein eines standsicheren Primärsystems (aus Stahl, Holz, Beton etc.) bei Ausfall des Stützdruckes noch immer stabil, wodurch keine unmittelbare Gefährdung von Personen oder Sachen gegeben ist. Die Tragluftbautennorm ist also nach den darin genannten Erläuterungen nicht auf ETFE-Folienpneus anzuwenden. Sie liefert aber wichtige Hinweise auf die heute im Membranbau angewendete Systematik der Abminderungsfaktoren zur Berücksichtigung festigkeitsmindernder Einflüsse auf die Grenzwerte der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit.

#### 2.5.4 Bemessungskonzept auf der Basis von Abminderungsfaktoren (MINTE)

Das maßgeblich am Institut für Kunststoffverarbeitung der RWTH Aachen in den siebziger und achtziger Jahren entwickelte Konzept der Abminderungsfaktoren basiert auf empirisch gewonnenen Daten aus Materialversuchen an unterschiedlichen Geweben. Bei der Vorgehensweise und auch der zahlenmäßigen Bestimmung der Abminderungsfaktoren bezieht man sich heute noch auf die im Membranbau als Grundlagenwerk zu bezeichnende Dissertation von MINTE aus dem Jahr 1981: *“Das mechanische Verhalten von Verbindungen beschichteter Chemiefasergewebe“* [122]. Diese Arbeit ist an o.g. Institut der RWTH Aachen entstanden. Sie beinhaltet Ergebnisse aus umfangreichen Kurz- und Langzeitversuchen an Standard-Membranwerkstoffen aus PVC-beschichtetem Polyestergewebe (PVC/PES) und aus PTFE-beschichtetem Glasfasergewebe (PTFE/Glas), sowie an typischen Teilflächen- und Randverbindungen. MINTE stellt hierin ein Bemessungskonzept vor, das auf den drei Nachweisen der Tragluftbautennorm (s. Gl. 2.2 bis Gl. 2.4) basiert.

In diese drei Nachweise arbeitete er fünf Abminderungsfaktoren  $A_0$  bis  $A_4$  und den Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma$  auf der Materialseite ein. Es sei angemerkt, dass die genannten fünf Abminderungsfaktoren nach derzeitigem Kenntnisstand die maßgeblichen festigkeitsmindernden Einflüsse auf die technischen Gewebe hinreichend genau berücksichtigen. Es ist aber keineswegs ausgeschlossen, dass neue Erkenntnisse zu weiteren Abminderungsfaktoren führen, oder dass für andere Membranmaterialien (z.B. für ETFE-Folien) weniger, mehr oder andere Einflüsse bemessungsrelevant sind.

Auf der Basis der Gleichungen 2.2 bis 2.4 ergeben sich nach MINTE die folgenden drei Nachweise unter Berücksichtigung der Abminderungsfaktoren und des Teilsicherheitsbeiwertes  $\gamma$  :

$$A^* \quad \text{Wintersturm:} \quad 1,0 \cdot n_g + 1,1 \cdot n_p + 1,6 \cdot n_w \leq \text{zul } n_0 = \frac{X_{N23}}{\gamma \cdot A_0 \cdot A_2} \quad (2.6)$$

$$B^* \quad \text{Sommergewitter:} \quad 1,0 \cdot n_g + 1,1 \cdot n_p + 0,7 \cdot n_w \leq \text{zul } n_9 = \frac{X_{N23}}{\gamma \cdot A_0 \cdot A_2 \cdot A_3} \quad (2.7)$$

$$C^* \quad \text{Dauerbeanspruchung:} \quad 1,0 \cdot n_g + 1,3 \cdot n_p \leq \text{zul } n_t = \frac{X_{N23}}{A_0 \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot A_3} \quad (2.8)$$

Hierin sind:

$\gamma$  Materialeitiger Teilsicherheitsbeiwert; nach MINTE [122] (mit Bezug auf HOSSER [83]) gelten folgende Zahlenwerte für Gewebe und deren Verbindungen:

$$\gamma_{\text{Gewebe}} = 1,4 \quad (2.9)$$

$$\gamma_{\text{Verbindungen}} = 1,5 \quad (2.10)$$

$X_{N23}$  Nennfestigkeit bei 23° C

$$X_{N23} = n_{23} \cdot (1 - 1,65 \cdot \max v_n) \quad (2.11)$$

Hierin sind:

$n_{23}$  = Mittelwert der monoaxial gemessenen Kurzzeitbruchlast bei 23°C.

1,65 = Fraktillfaktor  $k_s$  für t-verteilte 5%-Fraktile der Grundgesamtheit [152]

$$\max v_n = \text{maximaler Stichprobenvariationskoeffizient: } \max v_n = \max \frac{S_{n_{23}}}{n_{23}} \quad (2.12)$$

$S_{n_{23}}$  = Standardabweichung der Kurzzeitbruchlast bei 23°C

**$A_0$  Abminderungsfaktor zur Erfassung des festigkeitsmindernden Einflusses mehrachsiger (biaxialer) Spannungszustände gegenüber einachsiger Beanspruchung (z.B. im Versuch)**

$$A_0 = \frac{n_{23}}{n_{23, \text{biaxial}}} \quad (2.13)$$

Mit:

$n_{23, \text{biaxial}}$  = Mittelwert der biaxial gemessenen Kurzzeitbruchlast bei 23°C

Die Ermittlung der Kurzzeitzugfestigkeit unter biaxialer Belastung wurde bei Geweben an zylindrischen Mantelproben durchgeführt (s. Abb. 2.26), die in Achsrichtung (x) mechanisch und in Ringrichtung (y) pneumatisch belastet wurden ( $\sigma_x \cong 2 \cdot \sigma_y$ ).

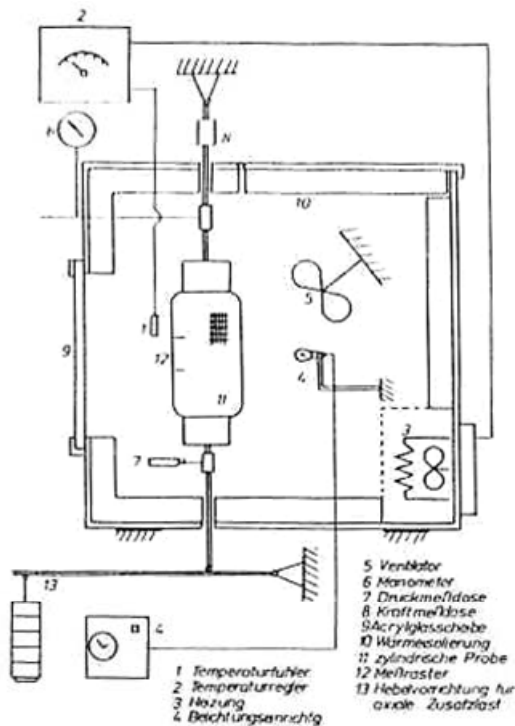


Abb. 2.26

Messvorrichtung zur Bestimmung der biaxialen Zugfestigkeit von Membranwerkstoffen an zylinderförmigen Mantelproben (auch Schlauch- oder Zylinderproben genannt), MINTE 1981 [122] (siehe auch Meffert 1978 [212])

**A<sub>1</sub> Abminderungsfaktor zur Erfassung des festigkeitsmindernden Einflusses langzeitiger Lasteinwirkung (Zeitraum 10<sup>5</sup> h)**

$$A_1 = \frac{1,1 \cdot n_{z,23}}{n_{z,23}} \quad (2.14)$$

$n_{z,23}$  = auf 10<sup>5</sup> h extrapolierte Zeitstandsbruchlast bei 23°C

Der Faktor 1,1 stellt einen Extrapolationszuschlag dar, der eingesetzt wird, weil im Zeitraum zwischen 10<sup>3</sup> h und 10<sup>5</sup> h nur relativ wenige Versuchserfahrungen vorliegen [122].

**A<sub>2</sub> Abminderungsfaktor für festigkeitsmindernde Umgebungseinflüsse (Medien, Strahlung etc.)**

$$A_2 = \frac{n_{23, \text{Neumaterial}}}{n_{23, \text{Altmaterial}}} \quad (2.15)$$

Ohne Auswertung von Versuchen an Altmaterial, also Material, das nach entsprechend langer Standzeit ausgebaut wurde, kann nach MINTE [122] für Gewebe und Verbindungen  $A_2 = 1,2$  (bei Verbindungen mit nach außen offenen Nähnähten:  $A_2 = 1,4$ ) abgeschätzt werden.

Im Normalfall steht kein übereinstimmendes Altmaterial für Testzwecke zur Verfügung. Zur Abschätzung des Alterungseinflusses können auch Kurzzeitzugversuche durchgeführt werden. Die Proben werden zuvor über einen längeren Zeitraum (mind. 1.000 h) freibewittert (n. DIN 53 386 [N12]), mit Xenonbogenlicht (n. DIN EN ISO 4892-2 [N20]) oder mit UV-Strahlung (n. DIN EN ISO 4892-3 [N21]) bestrahlt (s. auch DIN EN ISO 4892-1 - Kunststoffe - Künstliches Bestrahlen oder Bewittern in Geräten - Teil 1: Allgemeine Anleitung [N19]).

**A<sub>3</sub> Abminderungsfaktor für erhöhte Temperaturen**

$$A_3 = \frac{n_{23}}{n_{70}} \quad (2.16)$$

$n_{70}$  = Mittelwert der monoaxial gemessenen Kurzzeitbruchlast bei 70°C

Die Berücksichtigung langzeitiger Lasteinwirkung und erhöhter Temperaturen wird nach MINTE [122] auf folgender Basis ermittelt:

$$A_1 \cdot A_3 = \frac{n_{23}}{n_{z,70}} \quad (2.17)$$

$n_{z,70}$  = auf 10<sup>5</sup> h extrapolierte Zeitstandsbruchlast bei 70°C

**A<sub>4</sub> Abminderungsfaktor für Fertigungsungenauigkeiten**

Bei Ansatz des 5%-Fraktilwertes anstelle des Mittelwertes wird üblicherweise angenommen:

$$A_{4(5\%-Fraktile)} = 1,0 \quad (2.18)$$

Durch den Ansatz der Nennfestigkeit  $X_{n,23}$  geht die 5%-Fraktile in die Gleichungen 2.6 bis 2.8 ein. Deshalb wird der Abminderungsfaktor  $A_4$  in den Gleichungen nicht angesetzt.

Die beiden ersten Bemessungsgleichungen nach DIN 4134 (Gl. 2.1 und 2.2) sollen auf der Basis von zulässigen Festigkeiten bei den für den jeweiligen Lastfall ungünstigsten Temperaturen durchgeführt werden, d.h. unter erhöhten Temperaturen (Sommergewitter) und ggf. unter reduzierten Temperaturen (Wintersturm). MINTE [122] führt sämtliche Nachweise (Gl. 2.5 bis 2.7) bei einer konstanten Temperatur (23° C) durch, wobei er für die Lastfälle Sommergewitter und Dauerbeanspruchung den Abminderungsfaktor  $A_3$  berücksichtigt, der sich aus dem Verhältnis der Festigkeiten bei 23° C und 70° C ergibt.

Der Abminderungsfaktor  $A_3$  bezieht sich nach MINTE [122] darauf, dass zum Zeitpunkt hoher Windbelastungen (Sommergewitter) oder bei Dauerbeanspruchung (Vorspannung) die Membran einer erhöhten Temperatur ausgesetzt ist. Bei Geweben wird eine maximale Temperatur von +70°C angenommen. Durch dauerhafte Temperaturerhöhung und Temperaturschwankungen bewirkte Festigkeitsverluste hat MINTE mit dem Abminderungsfaktor  $A_3$  hingegen nicht gemeint, sonst wäre er auch in Gleichung 2.6 (Wintersturm) enthalten.

Bei den Abminderungsfaktoren handelt es sich nicht um Sicherheiten, sondern um die Berücksichtigung systematischer Einflüsse auf die verwendeten Bemessungsgrößen, die nicht in die verwendeten Berechnungsmodelle eingeflossen sind. Die Methode, festigkeitsmindernde Einflüsse empirisch zu ermitteln, und durch Abminderungsfaktoren zu berücksichtigen, findet derzeit nicht nur bei Traglufthallen Anwendung (s. z.B. BÜV 2002 [33]). Sie stellt eine anerkannte Methode dar, die auch in den derzeit gültigen Grundlagen der Tragwerksplanung in Form der Modifikationsfaktoren  $k_{\text{mod}}$  implementiert ist (s. EN 1990:2002 [N26] und DIN 1055-100:2001 [N1]).



Da die Wirkmechanismen (Temperaturerhöhung, Umgebungsbedingungen und langzeitige Lasteinwirkung) bei MINTE allein über konstante Abminderungsfaktoren auf der Widerstandsseite berücksichtigt werden und sich die Bemessung konsequent auf die Temperatur  $T = +23^{\circ}\text{C}$  bezieht, ist das Verfahren nicht (vollständig) probabilistisch (s. Kap. 2.5.3).

Der aktuelle Stand des Bemessungskonzeptes der Abminderungsfaktoren wird durch das vom Bau-Überwachungsverein (BÜV) erarbeitete Regelverfahren bei der Bemessung tragender Kunststoffteile dokumentiert.

## 2.5.5 Bemessungskonzepte für Bauteile aus Kunststoff (BÜV)

Auf die Abhängigkeiten zwischen Einwirkungs- und Widerstandsseite geht der Arbeitskreis "Tragende Kunststoffbauteile" (TKB) des Bau-Überwachungsvereins (BÜV) in seinem Diskussionsentwurf aus dem Jahr 2002 - *Tragende Kunststoffbauteile im Bauwesen – Entwurf, Bemessung und Konstruktion* [33] ein. Hierin werden Bemessungskonzepte vorgestellt, die auf den Normen zu den Grundlagen der Tragwerksplanung nach EN 1990:2002 [N26] bzw. DIN 1055-100:2001 [N1] (damals DIN V ENV 1991:1995 ) beruhen und die prinzipiell auch auf ETFE-Folienkonstruktionen anwendbar sind. Der Diskussionsentwurf unterscheidet zwischen Verfahren auf der Basis der Schadensakkumulation (mit und ohne eine Ersatzbeanspruchung) und einem Regelverfahren. Die Verfahren werden im Folgenden sinngemäß vorgestellt:

### 2.5.5.1 Regelverfahren

Die Tragfähigkeitsnachweise des Regelverfahrens sollen für jeden Zeitpunkt der planmäßigen Nutzungsdauer sicherstellen, dass die rechnerisch erwarteten Spannungen (unter Berücksichtigung ihrer Einwirkungszeit) mit genügender Wahrscheinlichkeit den Grenzwert der Tragfähigkeit, der durch die Zeitstandlinie (Zeitstandsbruchlinie) definiert ist, nicht überschreiten [33]. Das Verfahren beinhaltet sowohl Kurzzeit- als auch Zeitstandsfestigkeitsnachweise. Vereinfachend erfolgt die Berücksichtigung der Einflüsse auf die Bemessungskennwerte durch Abminderungsfaktoren.

Der charakteristische Wert des Widerstandes ergibt sich darin zu:

$$R_k = \frac{R_{k\,0,05}}{A_{\text{mod}}} \quad (2.19)$$

mit  $R_{k\,0,05}$  5%-Fraktilwert der Kurzzeitbruchfestigkeit

Das Verfahren sieht den Modifikationsfaktor  $A_{\text{mod}}$  zur Berücksichtigung der Umgebungsbedingungen vor:

$$A_{\text{mod}} = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \quad (2.20)$$

mit:

- $A_1$  Abminderungsfaktor infolge Einwirkungsdauer
- $A_2$  Abminderungsfaktor infolge Medieneinfluss, wie UV-Strahlung, Feuchtigkeit etc.
- $A_3$  Abminderungsfaktor infolge einer erhöhten Umgebungstemperatur

Im Anhang A des Entwurfes (Tab. A 1 bis A 3) sind für wenige unverstärkte Polymerwerkstoffe Abminderungsfaktoren getrennt nach Festigkeit ( $A_{1,2,3}^f$ ), E-Modul ( $A_{1,2,3}^E$ ) und Verformungen (Dehngrenzen,  $A_{1,2,3}^D$ ) angegeben. Die Abminderungsfaktoren  $A_4$  (Fertigungsungenauigkeiten, s. Gl. 2.18) und  $A_0$  (monoaxial/biaxial, s. Gl. 2.13) sieht der Regelentwurf des BÜV nicht vor. Der Abminderungsfaktor  $A_4$  ist hier nicht aufgeführt, weil er zu eins gesetzt wird, wenn der 5%-Fraktilwert als charakteristischer Wert der jeweiligen Kenngröße angesetzt wird (s. Gl. 2.18). Der Abminderungsfaktor  $A_0$  kann für die Festigkeit lediglich dann entfallen, wenn in einem mehrachsigen ebenen Spannungszustand mindestens dieselbe Festigkeit erreicht wird, wie bei monoaxialer Beanspruchung. Der Einfluss der Schubverzerrungen auf die Verformungen, Schnittgrößen und Spannungen kann zwar nach BÜV 2002 [33] bei faserverstärkten Kunststoffen und Thermoplasten in der Berechnung im Allgemeinen vernachlässigt werden. Für ETFE-Folien gilt dies nach derzeitigem Kenntnisstand nicht. Die Gültigkeit einer bestimmten Festigkeitshypothese für die Bruchgrenze von ETFE-Folien konnte jedoch noch nicht gezeigt werden. Bei dem Vergleich von Monoaxial- und Biaxialversuchen ist nach Kap. 4 darauf zu achten, dass die Messungen eine möglichst konstante und vor allem dieselbe Dehngeschwindigkeit bis zum Bruch einhalten und bei der Messung die wahren Dehnungen und Spannungen herangezogen werden. Dies wurde bislang bei der Prüfung nicht berücksichtigt. Darüber hinaus können die bislang angewendeten ebenen Biaxialtests versuchsbedingt nicht bis zum Bruch gefahren werden. Berstversuche an Folien- und Schweißnahtproben können hierzu Ergebnisse liefern.

Der Diskussionsentwurf des BÜV sieht einen zusätzlichen Modifikationsfaktor  $A_S$  vor, der eine verminderte Festigkeit einer Folie mit Schweißnaht in Relation zur Festigkeit des Grundmaterials (einer Folie ohne Schweißnaht) berücksichtigt.

Mit dem widerstandsseitigen Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_m$  ergibt sich der Bemessungswert (Designwert) des Widerstandes  $R_d$  zu:

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_m} \quad (2.21)$$

Der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_m$  ist prinzipiell abhängig von den Herstellungsbedingungen. Der BÜV empfiehlt folgende Teilsicherheitsbeiwerte für auf Zug beanspruchte Thermoplaste (s. Tab. 2.14).

	$\gamma_m$ im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS)	$\gamma_m$ im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS)
<b>Grundkombinationen</b>	1,5	1,0
<b>außergewöhnliche Bemessungssituationen</b>	1,25	-
<b>mit Berücksichtigung geometrischer Imperfektionen</b>	-	1,1

Tab. 2.14 Vom BÜV empfohlene widerstandsseitige Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_M$  für auf Zug beanspruchte Thermoplaste [33]

Der Bemessungswert des Widerstandes wird dem Bemessungswert der Einwirkungen  $S_d$  gegenübergestellt:

$$S_d \leq R_d \quad (2.22)$$

### 2.5.5.2 Anwendung des Regelverfahrens auf ETFE-Folien

Da das nichtlineare Materialverhalten der ETFE-Folien bislang nicht vollständig bekannt ist, werden die Abminderungsfaktoren derzeit auf Grundlage der bestehenden Erkenntnisse abgeschätzt.

- A<sub>0</sub>** Der Abminderungsfaktor  $A_0$  soll festigkeitsmindernde Einflüsse biaxialer (mehrachsig) ebener Spannungszustände auf die monoaxial ermittelten Festigkeiten, d.h. auf die Zugfestigkeit und auf die Streckspannung, bei  $T = + 23^\circ\text{C}$  berücksichtigen.

Da ebene biaxiale Versuche für ETFE-Folien versuchsbedingt nicht bis zum Bruch im mehrachsig beanspruchten Messfeld mit definiertem Spannungsverhältnis gefahren werden können, stützt man sich derzeit in Bezug auf die Abminderung der Zugfestigkeit auf wenige Berstversuche an zylinderförmigen Mantelproben, kreisrunden Laborproben und an Großkissen. Beispielsweise liefert der in Kapitel 4.6 ausgewertete Berstversuch an einem 1:1 Musterpneu eine rechnerische Berstspannung in der Größenordnung der monoaxialen Schweißnahtfestigkeit. Weitere Berstversuche bestätigen, dass die Zugfestigkeit vieler Schweißnähte im mehrachsigen Spannungszustand geringer ist, als die des Grundmaterials. Ein Abminderungsfaktor auf die monoaxiale Zugfestigkeit der Schweißnaht (SN)  $A_{0,fu,k,SN} = 1,2$  wird bei einem Verhältnis von  $f_{uk, Schweißnaht, 0,05} / f_{uk, Folie, 0,05} \cong 1,6$  (Index 0,05 = 5% Fraktilwerte) ausreichend sein, um auch die erforderliche Abminderung des Grundmaterials der Folie abzudecken. Es sei angemerkt, dass an Schweißnähten, bedingt durch ihre höhere Steifigkeit, bei vielen Geometrien ein inhomogenes Spannungsverhältnis in den beiden Hauptspannungsrichtungen wirkt, was sich positiv auf die Zugfestigkeit auswirkt. Inhomogene Spannungszustände führen nicht so schnell zu einer Dickenreduktion, wie ein homogener Spannungszustand.

Definiert man die monoaxiale Streckspannung (2. Knickpunkt im Spannungs-Dehnungsdiagramm bei  $T = 23^\circ\text{C}$ , s. Abb. 4.9) als charakteristischen Grenzwert im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit, muss man sie im mehrachsigen ebenen Spannungszustand ebenfalls abmindern. Bei mehrachsiger Beanspruchung ist die Streckgrenze nicht ausgeprägt. Bei Ansatz der Festigkeitshypothese nach VON MISES (s. Abb. 4.60) korrespondiert hingegen der monoaxiale Fließeintritt (1. Knickpunkt im Spannungs-Dehnungsdiagramm, s. Abb. 4.9) mit dem mehrachsigen Fließeintritt. Der Abminderungsfaktor kann mit maximal  $A_{0,fy,k} = 1,4$  abgeschätzt werden.

- A<sub>1</sub>** Der Abminderungsfaktor  $A_1$  soll festigkeitsmindernde Einflüsse auf die monoaxial ermittelten Festigkeiten bei  $T = + 23^\circ\text{C}$  infolge Langzeit- und Dauerlasten berücksichtigen.

Bei einem Vorspannungsniveau bis zur Kriechgrenze (s. Abb. D 14 in Anhang D) werden keine langfristigen Veränderungen der Zugfestigkeit und der Streckgrenze zu erwarten sein. Um beispielsweise Kriecheinflüsse und damit verbundene Dickenreduktionen zu vermeiden, können Abminderungsfaktoren für Langzeitlasten (engl. long term loads (LTL), z.B. Schnee) mit  $A_{1,fy,k(LTL)} = A_{1,fu,k(LTL)} = 1,3$  und für Dauerlasten (engl. permanent loads (PL), z.B. Vorspannung) mit  $A_{1,fy,k(PL)} = A_{1,fu,k(PL)} = 1,8$  abgeschätzt werden. Für Kurzzeitlasten (engl.: short term loads (STL), z.B. Wind) gilt  $A_{1,fy,k(STL)} = A_{1,fu,k(STL)} = 1,0$ .

- A<sub>2</sub>** Der Abminderungsfaktor  $A_2$  soll festigkeitsmindernde Einflüsse der Umgebung, wie UV-Strahlung, Feuchtigkeit und Medien, auf die monoaxial ermittelten Festigkeiten bei  $T = +23^\circ\text{C}$  berücksichtigen. Er ist prinzipiell von den am Standort erwarteten Bedingungen und von der geplanten Nutzungsdauer abhängig.

ETFE-Folien gelten gegenüber Freibewitterung sowie gegenüber üblichen Konzentrationen chemischer und biologischer Substanzen in der Luft als inert. Orientiert man sich an Langzeitstudien, wie z.B. dem "Arizona-Test" (s. Kap. 2.2.2.4), können nach derzeitigem Kenntnisstand für die Streckspannung  $A_{2, fy, k} = 1,0$  und für die Bruchspannung  $A_{2, fu, k} = 1,1$  für eine Standzeit von 10 Jahren als ausreichend angesehen werden. Seit 25 Jahren intakte Bauwerke zeigen, dass auch eine wesentlich längere Nutzungsdauer möglich ist (s. Kap. 1, Abb.1.18).

- A<sub>3</sub>** Der Abminderungsfaktor  $A_3$  soll festigkeitsmindernde Einflüsse durch Temperaturschwankungen auf die monoaxial ermittelten Festigkeiten bei  $T = +23^\circ\text{C}$  berücksichtigen. Das Diagramm in Abb. 2.2 lässt im Temperaturbereich zwischen  $0^\circ\text{C}$  und  $100^\circ\text{C}$  eine lineare Abnahme der monoaxialen Festigkeiten (Bruchspannung  $\sigma_B$  und Spannung bei 10 %-Dehnung  $\sigma_{\varepsilon=10\%}$ ) um etwa  $0,4 \text{ N/mm}^2$  pro  $1^\circ\text{C}$  Erwärmung erwarten.

Legt man dieses Diagramm für die Bestimmung des festigkeitsmindernden Einflusses infolge Temperatur auf die Zugfestigkeit und auf die Streckspannung zugrunde, so ergeben sich in beiden Fällen nahezu gleiche Funktionen der Abminderungsfaktoren  $A_{3, fu, k} \cong A_{3, fy, k}$  über die Temperatur (s. Abb. 2.27 a). Sie lassen sich mit einem Polynom dritter Ordnung gut approximieren.

Für die Zugfestigkeit gilt hier die lineare Gleichung  $\sigma(T)[\text{N/mm}^2] \cong a \cdot T[^\circ\text{C}] + b$  mit  $a, b = \text{const.}$  sowie  $A_3(T) = \sigma(T_{ref}) / \sigma(T) \geq 1,0$  mit  $T_{ref} = +23^\circ\text{C}$  und  $T \geq T_{ref}$ . Für  $T = +23^\circ\text{C}$  ergibt sich  $A_3(T) = 1,0$ . Für eine maximale Bemessungstemperatur  $\max T = +40^\circ\text{C}$  der Folie wäre ein konstanter Abminderungsfaktor für die Streckspannung und die Zugfestigkeit  $A_{3, fy, k} = A_{3, fu, k} = 1,2$  ausreichend (s. Abb. 2.27 a). Abb. 2.27 b ermöglicht das Ablesen des Abminderungsfaktors für eine gegebene Temperaturdifferenz zur Referenztemperatur  $T_{ref} = +23^\circ\text{C}$ .

Der Abminderungsfaktor  $A_3$  bezieht sich auf die tatsächliche Folientemperatur. Diese wird von den drei Wärmetransportmechanismen Wärmestrahlung, Wärmeleitung und Konvektion, sowie vom Absorptionsvermögen der Folie bestimmt. Die Systembedingungen spielen diesbezüglich eine wesentliche Rolle (Standort, Ausrichtung der Folie zur Sonne, Raumvolumen, Pnevolumen, Raumlüftung, Bedruckung, Einfärbung, Verschmutzungsgrad, Anzahl der Lagen, Luftwechselraten, integrierte Sonnenschutzlamellen, unmittelbar angrenzende Bauteile, Leuchten oder Speichermassen etc.).

Es sei angemerkt, dass der Abminderungsfaktor  $A_3$  nach Minte auf die Festigkeitsminderung infolge erhöhter Temperatur bei gleichzeitig wirkender Belastung abzielt. Irreversible Festigkeitsminderungen beinhaltet er hingegen nicht, sonst hätte der Abminderungsfaktor auch im Lastfall Wintersturm angesetzt werden müssen (vgl. Gleichung 2.6). Letztgenannte Schädigungen wären nach dem Verfahren von Minte ggf. durch den Abminderungsfaktor  $A_2$  (Medieneinflüsse) abzudecken.

Die von ANSELL (University of Bath) bei  $T = +23^\circ\text{C}$  durchgeführten monoaxialen Kurzzeitzugversuche an zuvor bei  $105^\circ\text{C}$  gekochten ETFE-Proben lassen allerdings keine nennenswerten irreversiblen Festigkeitsverluste durch hohe Temperaturen erwarten (s. Kap. 2.2.2.2).

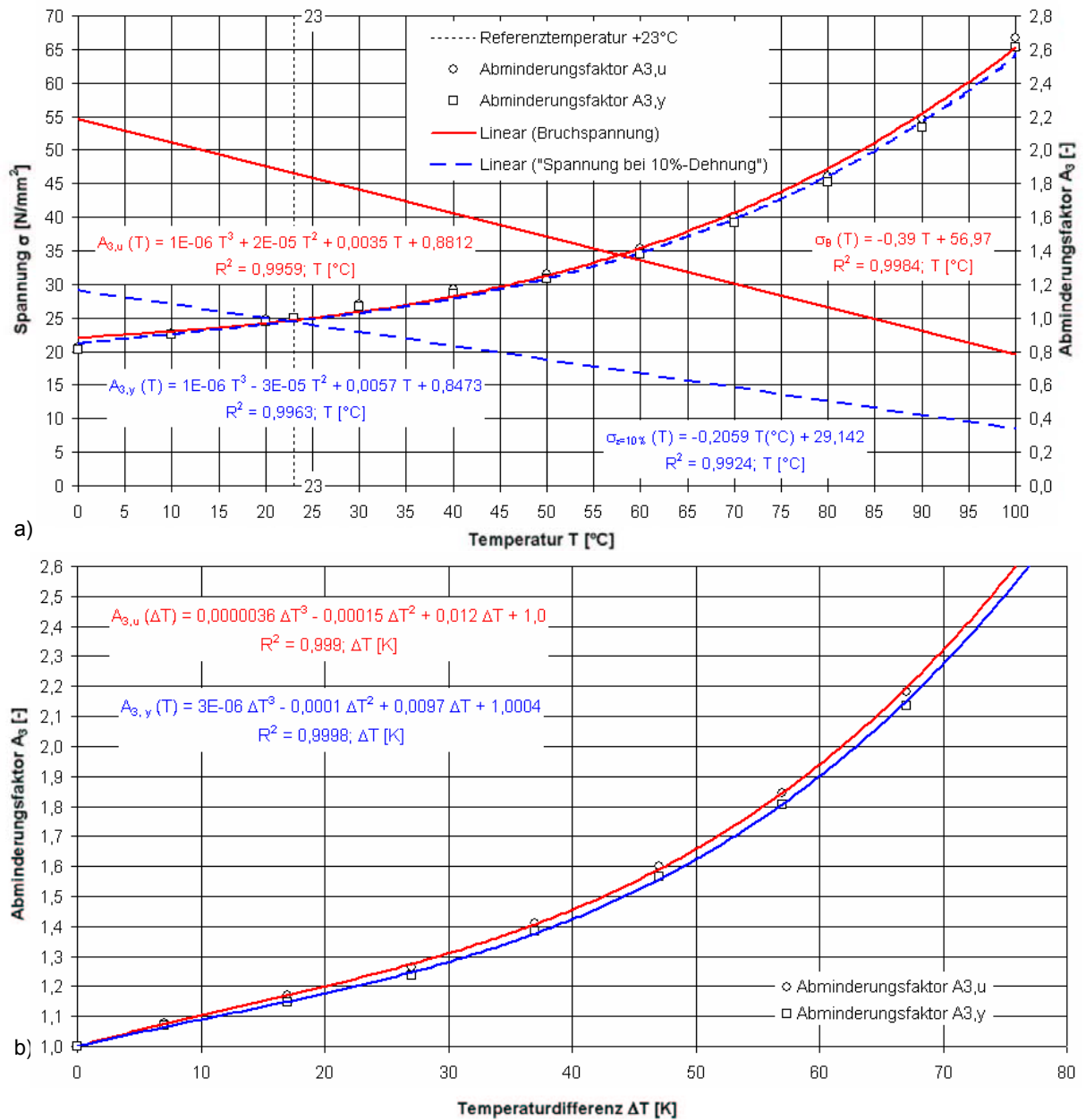


Abb. 2.27 a) Bruchspannung  $\sigma_B(T)$  (Zugfestigkeit) und Spannung bei 10 % Dehnung  $\sigma_{\varepsilon=10\%}(T)$  (nahe der Fließgrenze) abgeleitet aus Abb. 2.2. (Beide Funktionen sind etwa linear im Bereich zwischen 0°C und + 100°C); abgeleitete Abminderungsfaktor  $A_{3,u}(T)$  und  $A_{3,y}(T)$  in Abhängigkeit von der Temperatur (0°C bis + 100°C);  
 b) Abminderungsfaktor  $A_{3,u}(\Delta T)$  und  $A_{3,y}(\Delta T)$  in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz  $\Delta T$  [Kelvin], bezogen auf die Referenztemperatur  $T_{ref} = +23^\circ C$ ; abgeleitet aus Abb. 2.2, ETFE-Folie HOSTAFLOX® ET 6235

**A<sub>4</sub>** Der Abminderungsfaktor  $A_4$  berücksichtigt festigkeitsmindernde Fertigungsungenauigkeiten, die nicht bereits bei der statistischen Auswertung der Werkstoffprüfungen in die Bemessung eingeflossen sind. Nach einschlägiger Literatur darf der Faktor bei Ansatz der 5%-Fraktile zu  $A_4 = 1,0$  gesetzt werden. Dies setzt aber voraus, dass geeignete Maßnahmen der Eigen- und Fremdüberwachung Ausreißer bei der Produktion nicht erwarten lassen.

Auf der Basis der o.g. Ausführungen lassen sich die folgenden Abminderungsfaktoren für festigkeitsmindernde Einflüsse der monoaxialen Zugfestigkeit der Schweißnaht und der Streckgrenze (5%-Fraktilwerte) bei +23°C zusammenstellen (s. Tab. 2.15).

	<b>Festigkeitsmindernder Einfluss</b>	<b>im Grenzzustand der Tragfähigkeit</b> ( $f_{u, k, SN, 0,05}$ )	<b>im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit</b> ( $f_{y, k, 0,05}$ )
A <sub>0</sub>	mehrachsiger ebener Spannungszustand	1,2	1,4
A <sub>1</sub>	kurzzeitige Einwirkungen / langzeitige Einwirkung / permanente Einwirkung	1,0 / 1,3 / 1,8	
A <sub>2</sub>	Umgebungsbedingungen	1,1	1,0
A <sub>3</sub>	erhöhte Temperatur (+ 40°C)	1,2	
A <sub>4</sub>	Fertigungsungenauigkeiten	1,0	

Tab. 2.15 Abschätzung erforderlicher Abminderungsfaktoren von ETFE-Folien im Grenzzustand der Tragfähigkeit (Zugfestigkeit der Schweißnaht SN:  $f_{u, k, SN, 0,05}$ ) und im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (Streckspannung Folie und Schweißnaht:  $f_{y, k, SN, 0,05}$ ) (5%-Fraktilwerte)

### 2.5.5.3 Definitionen der Grenzzustände

Die Bemessung nach DIN 1055-100 [N1], EN 1990 [N26], BÜV [33] etc. sieht neben dem Nachweis der Dauerhaftigkeit zwei grundsätzlich nachzuweisende Grenzzustände vor:

- den Grenzzustand der Tragfähigkeit (*engl.*: Ultimate Limit State - ULS)
- den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (*engl.*: Serviceability Limit State – SLS)

Zu den Versagensarten im Grenzzustand der Tragfähigkeit zählen [33]:

- 1) der Verlust des statischen Gleichgewichts
- 2) der Bruchzustand von Tragwerksteilen und Querschnitten
- 3) kritische Dehnungszustände
- 4) Materialermüdung
- 5) Stabilitätsversagen

ETFE-Folien im Membranbau sind in erster Linie auf ein Versagen durch Bruch (Zug) zu untersuchen (s. Pkt. 2). Für diese Versagensart ist der 5%-Fraktilwert (s. Anhang C10) der Zugfestigkeit (der Schweißnaht SN) als charakteristischer Wert im Grenzzustand der Tragfähigkeit zugrunde zu legen.

Es wäre jedoch bedenklich, wenn die Zugfestigkeit so hoch läge, dass trotz ausreichender Sicherheiten vielfache bzw. hohe Überschreitungen der Fließgrenze zu erwarten wären, die letztlich zu einer Schädigung und zu einer signifikanten Erhöhung der Versagenswahrscheinlichkeit für den Bruchzustand nach Pkt. 2 führen könnten. Daher ist zusätzlich der Nachweis der Einhaltung einer kritischen irreversiblen Dehnung im Grenzzustand der Tragfähigkeit zu empfehlen, wenn er nicht durch den Gebrauchstauglichkeitsnachweis abgedeckt ist.

Wie hoch die kritische Dehnung ist, hängt u.a. von der Bauart ab. Eine irreversible Dehnung wäre beispielsweise für Pneus dann kritisch, wenn entweder die Festigkeit oder die Materialdicke über ein bestimmtes Maß reduziert würden. Es bietet sich daher an, für die Bruchspannung ebenfalls einen Abminderungsfaktor infolge Dauerbeanspruchung anzusetzen. Bei einer mechanisch vorgespannten Dachhaut wäre eine irreversible Dehnung auch dann kritisch, wenn sie einen Durchhang unter Last ermöglicht, der ein mittelbares Tragwerksversagen durch Wasser- oder Schneeansammlungen nach sich ziehen könnte.

Ob die Bruchgrenze im Grenzzustand der Tragfähigkeit und die Streckgrenze im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit als charakteristische Werte anzusetzen sind, ist eine zentrale Frage der Bemessung und demzufolge kritisch zu hinterfragen und zu untersuchen.

Ein Tragwerksversagen im Sinne der DIN 1055-100 – *Grundlagen der Tragwerksplanung, Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln* [N1] (s. auch EN 1990 [N26]) läge beispielsweise bei Pneus bei einer moderaten Überschreitung der Streckgrenze noch nicht automatisch vor.

Werkstoffwissenschaftler verstehen zwar die Streckgrenze als Dehngrenze, die nicht überschritten werden sollte, sie sehen aber im Fall eines Nachweises über definierte Dehngrenzen die Möglichkeit, diesbezüglich mit geringen (globalen) Sicherheiten ( $\gamma_g = 1,0 \text{ bis } 1,5$ ) zu arbeiten, falls die Versagenswahrscheinlichkeit entsprechend gering ist (s. Menges et. al. 2002 [111]).

Dem ist hinzuzufügen, dass Polymerwerkstoffe häufig im Maschinenbau, der Anlagentechnik sowie der Luft- und Raumfahrttechnik eingesetzt werden, wo sie im Vergleich zum Membranbau deutlich höheren Anforderungen an die Dimensions- und Strukturtreue unterliegen können. Für ein probabilistisches Bemessungskonzept nach DIN 1055-100 wären natürlich die möglichen Folgen eines Versagens der ETFE-Folie zu berücksichtigen.

Die Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit sind definitionsgemäß durch die Nutzungsbedingungen definiert. Hierzu gehören auch und insbesondere Verformungsbeschränkungen. Bei ETFE-Folienpneus bestehen zuweilen projektbezogene Beschränkungen des Stiches, wenn der Kontakt zu scharfkantigen Bauteilen oder Einbauten vermieden werden muss. Der Diskussionsentwurf des BÜV [33] schlägt für Tragwerke ohne Anforderungen aus den Nutzungsbedingungen eine maximale Durchbiegung von 1/50 der Spannweite vor:

$$u_{d,\max} = l / 50 \quad (2.25)$$

Bei einem Pneu mit 4 m Spannweite entspräche dies einer Durchbiegung von 20 mm. Der Bezug dieses Grenzwertes auf ETFE-Folienkonstruktionen wäre in Anbetracht der im Vorfeld bekannten und allseits akzeptierten großen Verformungen unter Last unangebracht.

### Steifigkeiten

Der E-Modul darf in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit (Durchbiegungsnachweis) normgerecht als Mittelwert angesetzt werden. In den Grenzzuständen der Tragfähigkeit (Bruchnachweis) sollte der ungünstigere Fraktilwert (mit 75 %-Aussagewahrscheinlichkeit) verwendet werden (s. Ausführungen in [N1], [N26], [33] etc.).

### Beispielrechnung eines Pneus aus ETFE-Folien

#### Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS)

Die durch Versuche bei  $T_{ref} = +23^{\circ}\text{C}$  und  $T = +3^{\circ}\text{C}$  ermittelten monoaxialen Zugfestigkeiten  $f_{u,k,0,05}$  (Index 0,05 = 5%-Fraktilwert) einer ETFE-Folie ohne und mit Schweißnaht seien:

$$f_{u,k,F,0,05,+23^{\circ}\text{C}} = 47 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{bei } +3^{\circ}\text{C}: f_{u,k,F,0,05,+3^{\circ}\text{C}} = 50 \text{ N/mm}^2)$$

$$f_{u,k,SN,0,05,+23^{\circ}\text{C}} = 30 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{bei } +3^{\circ}\text{C}: f_{u,k,SN,0,05,+3^{\circ}\text{C}} = 33 \text{ N/mm}^2)$$

Damit wäre der Abminderungsfaktor  $A_S$  zur Berücksichtigung der verminderten Festigkeit an der Schweißnahtkante bei  $T = +23^{\circ}\text{C}$ :

$$A_S = \frac{f_{u,k,F,0,05,+23^{\circ}\text{C}}}{f_{u,k,SN,0,05,+23^{\circ}\text{C}}} = \frac{47 \text{ N/mm}^2}{30 \text{ N/mm}^2} = 1,57 \quad (2.23)$$

Angesetzter Teilsicherheitsbeiwert im Grenzzustand der Tragfähigkeit:  $\gamma_{m,fuk} = 1,1$

#### Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS)

Die durch Versuche bei  $T_{ref} = +23^{\circ}\text{C}$  ermittelte monoaxiale Streckgrenze  $f_{y,k,0,05}$  (Index 0,05 = 5%-Fraktilwert) einer ETFE-Folie betrage:

$$f_{y,k,Schweißnaht,0,05} = 21 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{bei } +3^{\circ}\text{C}: f_{y,k,F,0,05,+3^{\circ}\text{C}} = 25 \text{ N/mm}^2)$$

Angesetzter Teilsicherheitsbeiwert im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit:  $\gamma_{m,fyk} = 1,0$

#### Einwirkungen und zugehörige Temperaturen

max. Windsoglast $W_s$ :	max T = $+23^{\circ}\text{C}$ , Kurzzeitlast, obere Lage OL
max. Schneelast S (offenes Gebäude)	max T = $+3^{\circ}\text{C}$ , Langzeitlast, innere Lage IL
Nenninnendruck im Pneu $P_{nom}$	max T = $+40^{\circ}\text{C}$ , Dauerlast, obere u. innere Lage OL, IL

#### Bemessungswerte des Widerstandes der Folie mit Schweißnaht im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS):

$$R_{d,SN,ULS,W_s} = \frac{f_{u,k,F,0,05,+23^{\circ}\text{C}}}{\gamma_m \cdot A_0 \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_S} = \frac{47}{1,1 \cdot 1,2 \cdot 1,0 \cdot 1,1 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,57} = 20,62 \text{ N/mm}^2 \quad (2.24 \text{ a})$$

$$R_{d,SN,ULS,S} = \frac{f_{u,k,F,0,05,+3^{\circ}\text{C}}}{\gamma_m \cdot A_0 \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_S} = \frac{50}{1,1 \cdot 1,2 \cdot 1,3 \cdot 1,1 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,57} = 16,87 \text{ N/mm}^2 \quad (2.24 \text{ b})$$

$$R_{d,SN,ULS,P_{nom}} = \frac{f_{u,k,F,0,05,+23^{\circ}\text{C}}}{\gamma_m \cdot A_0 \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_S} = \frac{47}{1,1 \cdot 1,2 \cdot 1,8 \cdot 1,1 \cdot 1,2 \cdot 1,0 \cdot 1,57} = 9,54 \text{ N/mm}^2 \quad (2.24 \text{ c})$$

Die berechneten Widerstände  $R_d$  sind den mit Teilsicherheitsbeiwerten  $\gamma_L$  faktorisierten Einwirkungen gegenüberzustellen. Es gilt:  $R_d \geq F_d = \gamma_L \cdot F_k$ .



**Bemessungswerte des Widerstandes der Folie mit Schweißnaht im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS):**

$$R_{d, SN, SLS, Ws} = \frac{f_{y,k,F, 0,05,+23^{\circ}C}}{\gamma_m \cdot A_0 \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_S} = \frac{21}{1,0 \cdot 1,4 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0} = 15,00 \text{ N/mm}^2 \quad (2.24 \text{ d})$$

$$R_{d, SN, SLS, S} = \frac{f_{y,k,F, 0,05,+3^{\circ}C}}{\gamma_m \cdot A_0 \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_S} = \frac{25}{1,0 \cdot 1,4 \cdot 1,3 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0} = 13,73 \text{ N/mm}^2 \quad (2.24 \text{ e})$$

$$R_{d, SN, SLS, Pnom} = \frac{f_{y,k,F, 0,05,+23^{\circ}C}}{\gamma_m \cdot A_0 \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_S} = \frac{21}{1,0 \cdot 1,4 \cdot 1,8 \cdot 1,0 \cdot 1,2 \cdot 1,0} = 6,94 \text{ N/mm}^2 \quad (2.24 \text{ f})$$

Die jeweils berechneten Widerstände  $R_d$  sind den mit Teilsicherheitsbeiwerten  $\gamma_L = 1,0$  faktorisierten Einwirkungen gegenüberzustellen. Es gilt:  $R_d \geq F_d = \gamma_L \cdot F_k = 1,0 \cdot F_k$ .

Anstelle des Abminderungsfaktors  $A_3$  kann auch jeweils die temperaturabhängige Festigkeit in die Gleichungen eingesetzt werden. Darüber hinaus sind die Spannungsberechnungen in Abhängigkeit der lastfallbezogenen Temperatur mit unterschiedlichen Foliensteifigkeiten durchzuführen.

Das Berechnungsbeispiel wirft die wichtige Frage auf, welche maximale Temperatur in der Folie bei einer gleichzeitig wirkenden maximalen Einwirkung, z.B. bei einer Windböe, herrschen kann. Die Beantwortung dieser Frage ist sowohl von den örtlichen Gegebenheiten, als auch von der Konstruktion, abhängig. Zudem kann die bei Windsog maßgeblich belastete obere (äußere) Folienlage OL eines Pneus durchaus eine andere Temperatur aufweisen, als die bei Winddruck und ggf. bei Schnee belastete innere (untere) Folienlage IL.

Es wurde noch nicht eingehend untersucht, welche Temperatur im eingeschlossenen Luftvolumen eines Pneus herrscht und welche maximale Temperatur die Folie unter bestimmten Bedingungen annehmen kann. Eine Orientierungshilfe für die Herleitung von Bauteiltemperaturen bei gegebenen Außenlufttemperaturen bietet die DIN 1055 Teil 7 - allerdings nur für bestimmte, darin beschriebene, dickwandige Bauteile. Für ein- und mehrlagige Konstruktionen aus dünnen transparenten Kunststofffolien sind die angegebenen Werte wenig hilfreich, da hier eine andere Gewichtung der drei Wärmetransportmechanismen (Wärmeleitung, Wärmestrahlung und Konvektion) sowie eine andere Absorptionsfähigkeit vorliegt. Das Speichervermögen der dünnen Folien ist extrem gering, so dass sie sehr schnell die Temperatur der Umgebung (Lufttemperatur) annehmen. Auch lässt sich in der Praxis beobachten, dass selbst geringe Luftbewegungen ein strahlungsbedingtes Aufheizen der angeströmten Folie verhindern. Untersuchungen zum thermischen Verhalten von ETFE-Folienkonstruktionen wären demnach nicht nur für bauphysikalische Fragestellungen interessant, sondern auch im Hinblick auf ihre Tragfähigkeit.

Basierend auf DIN 4134:1983-02 [N6] werden Gewebemembranen für Traglufthallen bei einer angenommenen Maximaltemperatur von  $+70^{\circ}C$  untersucht. Für diese Temperatur erhalte man in obiger Beispielrechnung einen Abminderungsfaktor von etwa  $A_3 = 1,6$ .

Entsprechend BARNES; FORSTER und DENCHER (Design Guide for Tensile Surface Structures, 2004, Page 182 f [61]) muss jedoch nach dem Konzept von MINTE die Temperatur  $T = +70^{\circ}C$  im Lastfall Sommergewitter nur dann für Membranen und ihre Verbindungen mit der Windlast überlagert werden, wenn die Membran keiner Kühlung durch den Wind ausgesetzt ist. Es ist daher wichtig, durch konstruktive Maßnahmen (z.B. Lüftung) eine übermäßige Aufheizung der nicht vom Wind angeströmten inneren Folienlage eines Pneus auszuschließen, wenn diese im Sommer, beispielsweise durch Winddruck von außen, stark belastet wird.

#### 2.5.5.4 Grenzen des Regelverfahrens

ETFE-Folien haben im Unterschied zu Geweben eine deutlich stärker ausgeprägte Abhängigkeit der Bruchgrenze, der Fließgrenze und auch der Steifigkeit von der Temperatur. Mit der Steifigkeit sind auch die aus den Einwirkungen resultierenden Spannungen temperaturabhängig, und mit der Fließ- und der Bruchgrenze auch die Basisgrößen für die Bemessung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit.

An ausgeführten Objekten kann beobachtet werden, dass sich die ETFE-Folien auch unter starken sommerlichen Windböen kaum verformen. Die für maximale Böenlasten berechneten Dehnungen lassen jedoch sichtbare Verformungen erwarten. Dies führt zu der Schlussfolgerung, dass die Foliensteifigkeit nicht nur von der Temperatur, sondern auch von der Dehngeschwindigkeit abhängt. Es ist zu erwarten, dass die Foliensteifigkeit, die Fließspannung und die Bruchspannung mit zunehmender Dehngeschwindigkeit ansteigen, die Bruchdehnung hingegen abfällt. Im Hinblick auf die für ETFE-Folien rechnerisch ansetzbaren Grenzzustände (Spannungen) wäre dies positiv zu bewerten, da die Fließspannung und die Bruchspannung ggf. höher liegen, als bislang (auch bei hohen Temperaturen) angenommen. Bei Schneelasten sind zwar die Dehngeschwindigkeiten gering, aber die Temperaturen sind es ebenfalls.

In der Praxis gilt das Verhalten der ETFE-Folie als gutmütig, ohne dass die genauen mechanischen Zusammenhänge bekannt gewesen wären. Der bislang nicht berücksichtigte Einfluss der Dehngeschwindigkeit auf die Fließ- und die Bruchgrenze liefert eine teilweise Erklärung für diese Einschätzung. Es ist hierbei aber zu beachten, dass eine hohe Dehngeschwindigkeit auch zu einer erhöhten Steifigkeit und damit zu geringeren Verformungen und zu größeren Auflagerreaktionen führt. Ob die aus den maximalen Windgeschwindigkeiten resultierenden Dehngeschwindigkeiten der ETFE-Folie auch auf der Widerstandsseite quasistatisch behandelbar sind, bedarf weiterer Untersuchungen, die über die vorliegende Arbeit hinausgehen.

Von HORTMANN et. al. 2004 [81] wurden für das Projekt AWD-Arena Hannover dynamische Strömungssimulationsrechnungen und Modelluntersuchungen durchgeführt, die wichtige Hinweise auf das dynamische Verhalten der eingesetzten einlagigen und seilunterstützten Folienmembran liefern. Die Ergebnisse zeigen, dass bei dieser Konstruktion auch bei vollständigem Verlust der Vorspannung keine kritischen windangeregten Schwingungen zu erwarten sind.

Die auf quasistatischen Windlasten basierende Pneubemessung berücksichtigt dynamische Einflüsse mittels Erhöhungsfaktoren nur auf der Einwirkungsseite. Die Auswirkungen auf der Widerstandsseite sind noch weitgehend unbekannt. An ausgeführten Objekten kann beobachtet werden, dass ein schnelles ruckartiges Schlagen von Pneus unter Windböen durch eine vorherige Erhöhung des Pneuinndruckes vermieden werden kann. Man erhöht also die statische Last, um die Systemsteifigkeit zu vergrößern, damit dynamische Einwirkungen vermieden werden. Systematische Untersuchungen des dynamischen Verhaltens pneumatisch gestützter ETFE-Folienpneus wurden bislang nicht publiziert.

Selbst wenn man für die Einflüsse der Temperatur, der Dehngeschwindigkeit und der vielfältigen Spannungszustände auf die Steifigkeit, Fließspannung, Fließdehnung, Bruchspannung und Bruchdehnung je einen Abminderungsfaktor (oder unzulässigerweise einen Erhöhungsfaktor) berücksichtigte, wären die Wechselwirkungen kaum noch zu erfassen. Das Verfahren der Abminderungsfaktoren würde das Gegenteil von dem bewirken, wofür es eigentlich gedacht ist – zur Vereinfachung.

Da sowohl die Spannungsgrößen als auch die sich aus Spitzenlasten und Kriechvorgängen zusammensetzenden irreversiblen Dehnungen von der Beanspruchungsgeschichte abhängen, sind die Nachweise der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit prinzipiell am Ende des Bemessungszeitraumes maßgeblich. Um die charakteristischen Werte der irreversiblen Dehnungen am Ende der geplanten Nutzungsdauer im Vorhinein abschätzen zu können, bedarf es der Einführung von Ersatzlasten.

### 2.5.5.5 Bemessungsverfahren mit Ersatzbeanspruchung

Das zweite vom BÜV [33] vorgestellte Verfahren beinhaltet die Gegenüberstellung einer Zeitstandlinie und einer Ersatzeinwirkung, deren Berechnung nach Grundsätzen der Schadensakkumulation erfolgt.

Die Zeitstandlinie ist möglichst unter Berücksichtigung der Umgebungsbedingungen (Medien- und Temperatureinfluss) in Zeitstandsbruchversuchen zu bestimmen. Wird sie über die geplante Nutzungsdauer extrapoliert, gibt der Endwert den Widerstand an, den der Probekörper am Ende des Bemessungszeitraumes hat.

Die Ersatzeinwirkung setzt sich aus den erwarteten Einwirkungen für das Bauteil zusammen. So entsteht für verschiedene Wind- und Schneelastniveaus, Vorspannungen etc. jeweils ein Zeit-Spannungsblock. Die Belastungsfolge (das Einwirkungskollektiv) kann als Einwirkungs-Zeit-Verlauf entsprechend Abb. 2.28 dargestellt werden. Nach BÜV [33] können die abzuschätzenden Lasten (Größe und Dauer) DIN 1055 entnommen werden (durchschnittliche Dauer von Wind- und Schneelasten s. Tab. 2.16 und 2.17) und über den Bemessungszeitraum summiert werden.

Die Ersatzeinwirkung wird mit Hilfe der Schadensakkumulationsregel (Gl. 2.27) aus den einzelnen Einwirkungen berechnet. Das Verfahren kann nach [33] mit dem Regelverfahren kombiniert werden, indem Abminderungsfaktoren für Einflüsse angesetzt werden, die nicht versuchstechnisch berücksichtigt wurden.

Schneelastanteil in % von $s_k$	Durchschnittliche Einwirkungsdauer pro Jahr	
	für $H \leq 575m$ (GOK über NN)	
25	lang	70 Tage
50	mittel	35 Tage
100	kurz	9 Tage

Tab. 2.16 Durchschnittliche Einwirkungsdauer von Schneelasten pro Jahr [33]

Windlastanteil in % von $q_{ref}$	Durchschnittliche Einwirkungsdauer pro Jahr	
	15	lang
65	mittel	6 Monate
100	kurz	3 Monate

Tab. 2.17 Durchschnittliche Einwirkungsdauer von Windlasten pro Jahr [33]

In Abb. 2.28 sind die folgenden Größen dargestellt:

- $S_e$  Ersatzbeanspruchung auf der Ebene des Bruchzustandes
- $S_i$  Größe der i-ten Einwirkung
- $t_i$  Einwirkungszeit der i-ten Einwirkung
- $t_R$  Bemessungszeitraum

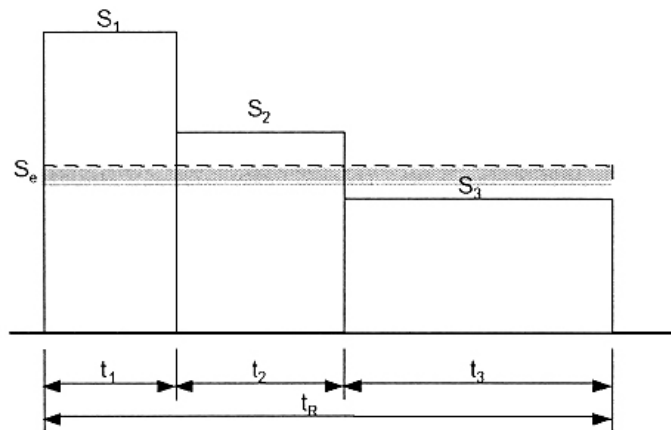


Abb. 2.28 Einwirkungskollektiv im Bemessungszeitraum  $t_R$  [33]

Abb. 2.29 zeigt die Zeitstandsbeanspruchbarkeit als Lebensdauerlinie im log-log-Diagramm. Die untere Grenze des Streubandes markiert die Linie der charakteristischen Werte des Widerstandes, die i.d.R. durch die 5%-Fraktile definiert werden.

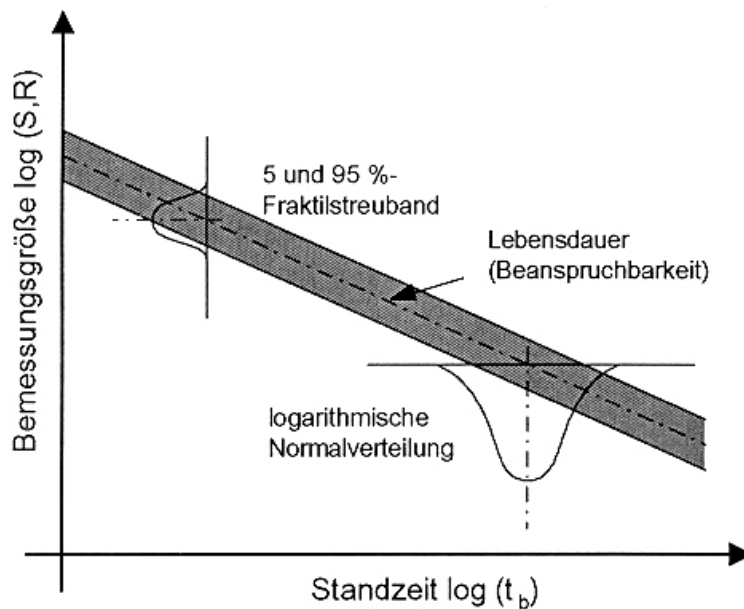


Abb. 2.29 Zeitstandsbeanspruchbarkeit als Lebensdauerlinie im log-log-Diagramm [33]

Die Ermittlung der Ersatzbeanspruchung erfolgt nach [33] bei nicht ruhenden Lasten nach der MINER-Regel und bei ruhenden Lasten nach der ROBINSON-THAIRA-Regel. Die Bemessungsgleichung ergibt sich in beiden Fällen wie folgt:

$$\sum_{i=1}^n \frac{t_{E,i}(S_{E,i})}{t_{b,i}(S_{E,i})} \leq 1 \quad (2.26)$$

Hierin sind:

- $S_{E,i}$  i-te Beanspruchung infolge äußerer Einwirkungen
- $t_{E,i}(S_{E,i})$  Einwirkungsdauer auf dem Beanspruchungsniveau  $S_{E,i}$
- $t_{b,i}$  ertragbare Zeit auf dem Beanspruchungsniveau  $S_{E,i}$

Die einzelnen Schädigungen ( $S_{E,i}, t_{E,i}$ ) können in eine schadensgleiche und über den Bemessungszeitraum  $t_R$  konstante Ersatzbeanspruchung  $S_e$  umgerechnet werden:

$$S_e = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (\gamma_{E,i} \cdot S_{E,i})^m \cdot t_{E,i} \cdot S_{E,i}}{t_R} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (2.27)$$

Hierin sind:

- $S_e$  Ersatzbeanspruchung auf der Ebene des Bruchzustandes
- $S_{E,i}$  i-te Beanspruchung infolge äußerer Einwirkungen
- $t_{E,i}(S_{E,i})$  Einwirkungsdauer auf dem Beanspruchungsniveau  $S_{E,i}$
- $t_R$  Bemessungszeitraum
- $\gamma_{E,i}$  Teilsicherheitsbeiwert der i-ten Einwirkung
- $m$  Neigung der Zeitstandsgeraden im doppelt logarithmischen Maßstab

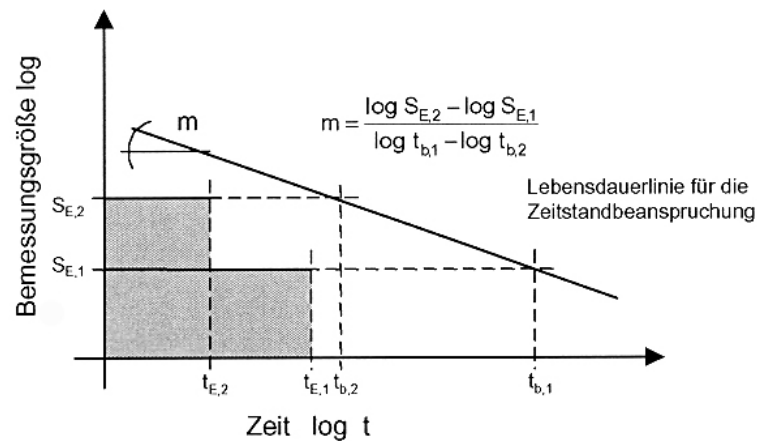


Abb. 2.30 Darstellung zweier Einwirkungen und Ermittlung der Neigung der Zeitstandlinie im Bemessungsgrößen-Zeit-Diagramm (log-log) [33]

Die Schadensakkumulationsregel in Gl. 2.27 geht davon aus, dass die berechnete Ersatzbeanspruchung  $S_e$  zu derselben Schädigung des Bauteils führt, wie die Einzelschädigungen.

Die Ersatzbeanspruchung wird am Ende des Bemessungszeitraumes dem Bemessungswert des Widerstandes der Zeitstandlinie gegenübergestellt (s. Abb. 2.31).

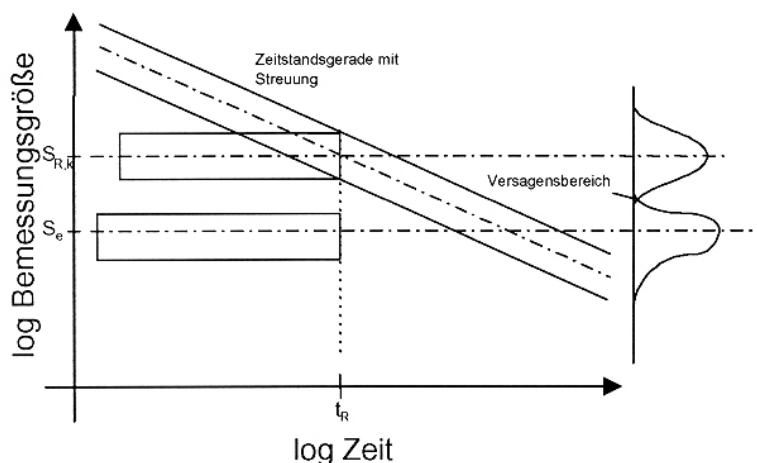


Abb. 2.31 Bemessung am Ende des Bemessungszeitraumes [33]

Der Tragfähigkeitsnachweis ergibt sich zu:

$$\gamma_M \cdot A_{\text{mod}}^* \cdot \frac{S_e}{S_{R,k}} \leq 1 \quad (2.28)$$

Hierin sind:

- $S_e$  Ersatzbeanspruchung für den Bruchzustand (Bemessungswert)
- $\gamma_M$  Teilsicherheitsbeiwert des Widerstandes
- $S_{R,k}$  charakteristischer Widerstand am Ende des Bemessungszeitraumes
- $A_{\text{mod}}^*$  werkstoffspezifischer Modifikationswert zur Berücksichtigung von Einflüssen, die im Experiment nicht berücksichtigt wurden

Der Tragfähigkeitsnachweis kann nach [33] insbesondere bei einer gekrümmten Widerstandslinie auch über einen Nachweis der Einzelbeanspruchungen anstelle der Ersatzbeanspruchung geführt werden. Diesbezüglich wird im Diskussionsentwurf des BÜV der Hinweis zur DVS 2205 – 1 gegeben. Darüber hinaus stellt er ein weiteres Bemessungsverfahren vor, das auf der Schadenakkumulation basiert.

Im Diskussionsentwurf des BÜV [33] sind Beispielrechnungen für tragende Bauteile aus Kunststoff aufgelistet, die vom BÜV auf Anfrage zur Verfügung gestellt werden. Erfahrungen mit der Bemessung von ETFE-Folien liegen demnach nicht vor. Vermutlich wurden die beiden Bemessungsverfahren der Ersatzbeanspruchung und der Schadensakkumulation bislang auch nicht auf ETFE-Folien angewendet. Kunststofffolien fallen jedoch in den Anwendungsbereich der Empfehlung. Wie der BÜV aber ausdrücklich betont, stellt die Empfehlung keine Norm dar.

Die Empfehlung unterstreicht die Wichtigkeit der Qualitätssicherung bei der Planung, Herstellung und Wartung von tragenden Bauteilen aus Kunststoff. Dies setzt eine entsprechende Qualifikation und Sorgfalt der Tragwerksplaner, Prüfengeieure, Ausführenden und Überwachenden voraus.

Bei nicht geregelten Baustoffen/Bauarten sind die aus den Werkstoffuntersuchungen gewonnenen Ergebnisse hinsichtlich der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit für die geplante Konstruktion von diesbezüglich qualifizierten Materialgutachtern zu bewerten.

## 2.5.6 Bemessungskonzept mit Temperaturstufen

Für die mechanisch vorgespannte ETFE-Folien über der Tribüne der AWD Arena in Hannover wurde von MORITZ und LINKE, 2004 [133], erstmals eine Bemessung durchgeführt, bei welcher der Temperatureinfluss auf die Grenzwerte der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit, und auch auf die Steifigkeit berücksichtigt wurde. Um den Temperatureinfluss auf der Einwirkungsseite zu erfassen, war die statistische Auswertung meteorologischer Daten für den Standort in Bezug auf die Windeinwirkungen und die diesen zeitlich zugeordneten Bauteiltemperaturen erforderlich. Als Bauteiltemperatur wurde die jeweilige Lufttemperatur auf der Widerstands- und auf der Einwirkungsseite angesetzt, was mangels wissenschaftlicher Untersuchungen bzgl. der Temperaturanteile der Wärmestrahlung und der Wärmeleitung als Näherungsverfahren angesehen werden muss (s. Kap. 2.5.5.2). Tab. 2.18 zeigt die vom Deutschen Wetterdienst in der dem Standort nächstgelegenen Messstation (Flughafen Hannover Langenhagen) in den letzten 33 Jahren vor der Errichtung (1971 bis 2003) gemessenen meteorologischen Daten.

Temperaturklasse [°C]	Anzahl der Jahre mit maximaler Windgeschwindigkeit	Maximum der gemessenen Böengeschwindigkeit [m/s]
größer +35	0	10,3
+31 bis +35	1	23,2
+27 bis +31	2	27,3
+23 bis +27	2	29,1
+19 bis +23	0	25,2
+15 bis +19	4	28,6
+11 bis +15	13	39,6
+7 bis +11	11	41,2
+3 bis +7	0	29,3
-1 bis +3	0	22,1
-5 bis -1	0	20,1
-9 bis -5	0	19,0
-13 bis -9	0	16,5
kleiner -13	0	13,4
<b>max. bei +7 bis +11°C</b>	<b>Σ 33</b>	<b>max. 41,2 [m/s]</b>

Tab. 2.18 Maximum der Böengeschwindigkeiten und Anzahl der Jahre mit maximalen Windgeschwindigkeiten für die jeweiligen Temperaturklassen, Messdaten des Deutschen Wetterdienstes DWD für den Standort Hannover im Zeitraum 1971 bis 2003 (33 Jahre), nach HORTMANN und HÜGLE 2004 [82]

Die Winddaten wurden den ebenfalls gemessenen Tageshöchsttemperaturen der Luft zugeordnet - jeweils in Temperaturklassen mit der Schrittweite  $\Delta T = 4 K$ . Die Temperatur wurde in 2 m Höhe, die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe, über GOK gemessen.

Außerhalb des dargestellten Temperaturbereiches (-13 bis +35°C) traten keine nennenswerten Windgeschwindigkeiten auf. Für die Bemessung wurden die meteorologischen Basisdaten nach Methoden der Extremwertstatistik unter Berücksichtigung der Bauwerksdaten ausgewertet und entsprechend DIN 1055-100:2001 [N1] die Kombinationsbeiwerte für die Überlagerung von Wind- und Temperatureinwirkungen berechnet (s. Hortmanns und HÜGLE 2004 [82]). Die Bemessung erfolgte für die vier Temperaturstufen -25°C, 0°C, +23° C und + 35° C (s. MORITZ und LINKE 2004 [133]). Den vier Stufen wurden auf der Widerstandsseite jeweils andere Steifigkeiten sowie andere Werte für die Grenzzustände der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit zugrunde gelegt. Auf der Einwirkungsseite veränderten sich die maximalen Windgeschwindigkeiten und deren Auftretenswahrscheinlichkeiten (Kombinationsbeiwerte) von Stufe zu Stufe. Für die beiden Temperaturstufen - 25°C und 0°C wurden gleiche Schneelasten angesetzt.

Da es sich um eine ebene, nahezu horizontale, mechanisch vorgespannte Folie handelte, wurden neben der Bruchfestigkeit auch die maximal zulässigen irreversiblen Verformungen als ein weiterer Grenzzustand der Tragfähigkeit definiert. Ein zu großer "Durchhang" der Folie könnte ohne konstruktive Vorkehrungen (Absenkung des Traufrandes) bei einem derartigen System langfristig die Möglichkeit einer stetigen Wasseransammlung mit sich bringen, was ein mittelbares Tragwerksversagen nach sich ziehen könnte. Hieraus wird ersichtlich, dass die Grenzzustände der Tragfähigkeit von der Anwendung (ebener Dachbereich), der Bauart (mechanisch vorgespannt) und dem jeweils untersuchten Versagenskriterium (Grenzwert irreversibler Verformungen) abhängen.

Abb. 2.32 zeigt das Bemessungsdiagramm, welches aus den Berechnungen für die vier Temperaturstufen resultiert. Es stellt die maximalen Folienschnittkräfte den Widerständen in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit gegenüber.

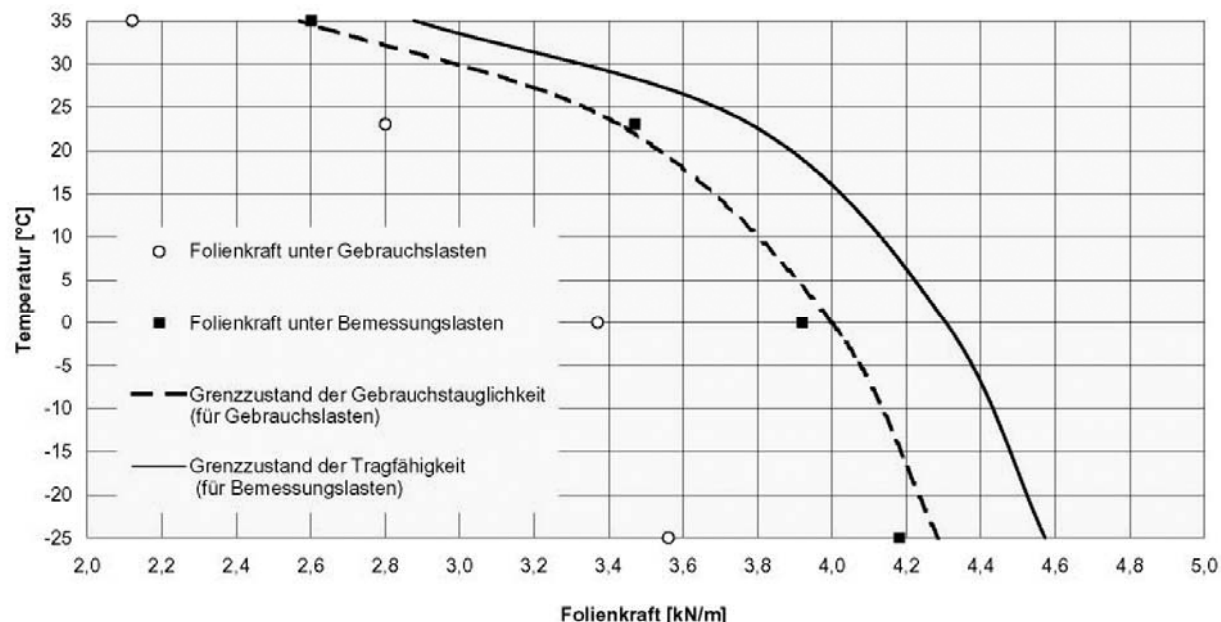


Abb. 2.32 Temperaturabhängiges Bemessungsdiagramm der ETFE-Folie für das Projekt AWD-Arena in Hannover unter Ansatz der Lufttemperaturen; MORITZ und LINKE 2004 [133]



### 2.5.7 Bemessungskonzept über Grenzdehnungen

MENGES, HABERSTROH, MICHAELI und SCHMACHTENBERG 2002 stellen in [111] verschiedene Nachweisverfahren für homogene und gefüllte Kunststoffe unter ruhender und nicht schwingender Zugbeanspruchung vor. Eines dieser Verfahren wird über eine Grenzdehnung  $\varepsilon_{F\infty}$  geführt, und nicht wie gewohnt über die Spannung (s. Kap. 7.3 in [111]). Diese Methode basiert auf den Beobachtungen von MENGES, dass alle Kunststoffe bei Erreichen eines bestimmten Dehnungs-Schwellwertes Fließzonen bilden. Demnach beginnt bei teilkristallinen, ungefüllten, weichen Thermoplasten, wie ETFE, die Fließzonenbildung im Monoaxialversuch bei  $\varepsilon < 2,0 \%$ , was auch in dieser Arbeit bestätigt wird. Grundlage der Bemessung über die Grenzdehnung sind auf der Einwirkungsseite die kumulierten Dehnungen über die geplante Nutzungsdauer.

Weitere Hinweise auf die Bemessung von Bauteilen aus Kunststoff finden sich in folgenden Quellen (geordnet nach Erscheinen):

- 📖 MORITZ und LINKE 2004 (AWD Arena in Hannover, Standsicherheitsnachweis für das ETFE-Foliendach) [133]
- 📖 FORSTER und MOLLAERT et. al. 2004 (European Design Guide for Tensile Surface Structures) [61]
- 📖 MENGES, HABERSTROH, MICHAELI und SCHMACHTENBERG 2002 (Werkstoffkunde Kunststoffe) [111]
- 📖 WÖRNER, GLEITER 2002 (Bemessung tragender Kunststoffbauteile) [198]
- 📖 BÜV 2002 (Tragende Kunststoffbauteile im Bauwesen – Entwurf, Bemessung und Konstruktion) [33]
- 📖 EINSFELD 1998 (Bemessung von Tragwerken aus Kunststoff) [52]
- 📖 OBERBACH, SCHMACHTENBERG 1995 (Konstruktionsgerechte Kennwerte – Voraussetzung für werkstoffgerechte Konstruktion von Präzisionsteilen aus Kunststoff) [229]
- 📖 MINTE 1981 (Das mechanische Verhalten von Verbindungen beschichteter Chemiefasergewebe) [122]
- 📖 HILGENBERG 1974 (Beitrag zur Bemessung von Baukonstruktionen aus Kunststoff unter besonderer Berücksichtigung der Windbelastung) [76]

### 2.6 Zusammenfassung

Die allgemeinen theoretischen Grundlagen der Kontinuumsmechanik werden in einschlägigen Fachbüchern beschrieben. Die Tensoren der Spannungen, Dehnungen und Steifigkeiten sind für den räumlichen, ebenen und einachsigen Fall dargestellt. Je nach mechanischem Verhalten stellt die Festigkeitslehre Werkstoffgesetze für lineare/nichtlineare, isotrope/orthotrope/anisotrope, sowie homogene/inhomogene Werkstoffe zur Verfügung. Mit idealisierten Modellen lassen sich diverse Spannungs-Dehnungsbeziehungen beschreiben.

ETFE-Folien gelten als homogen und bis zur Fließgrenze als näherungsweise isotrop. Sie gehören zu den viskoelastischen Werkstoffen, d.h. ihre Dehnungen weisen elastische, viskoelastische und viskose Anteile auf. Die Beschreibung des linear elastischen Dehnungsbereiches (zeitunabhängig) als auch des linear viskoelastischen Dehnungsbereiches (zeitabhängig) kann näherungsweise mit dem HOOKE'schen Gesetz erfolgen (s. Anhang D).

Zur Beschreibung des nichtlinear viskoelastischen Verhaltens werden i.A. generalisierte Modelle, so genannte Deformationsmodelle, verwendet. Diese wurden bislang nicht auf ETFE-Folien angewendet.

Die Abhängigkeit der Zugfestigkeit, Bruchdehnung und Spannung bei 10 % Dehnung von der Temperatur wurde von einem Hersteller bereits Anfang der neunziger Jahre anhand monoaxialer Kurzzeitzugversuche gezeigt. Der Temperatureinfluss auf die Kennwerte der Folie unter mehrachsigen ebenen Spannungszuständen wurde jedoch noch nicht dargestellt.

Bislang wurde irrtümlicherweise angenommen, dass die Dehngeschwindigkeit auf die Ergebnisse (quasi)statischer Kurzzeitzugversuche keinen Einfluss hat. Daher ist die Herleitung von Gesetzmäßigkeiten aus Versuchen, die bei Dehngeschwindigkeiten in unterschiedlichen Größenordnungen gefahren wurden, nicht exakt möglich, solange dieser Umstand nicht berücksichtigt wird. Daher kann auch der Vergleich von Versuchen, die bei gleichen Traversengeschwindigkeiten aber an Probekörpern mit unterschiedlichen Geometrien (und somit unterschiedlichen Dehngeschwindigkeiten) durchgeführt werden, ggf. zu schwer deutbaren Ergebnissen führen. Eine Fließ- oder Bruchbedingung, sowie eine Vergleichsspannung, wurden ebenfalls bislang nicht hergeleitet, da die einzelnen, sich überlagernden Einflüsse der Zeit (Dehngeschwindigkeit), der Temperatur und des Spannungszustandes nicht bekannt waren bzw. bislang nicht unabhängig voneinander untersucht wurden.

Der Zeiteinfluss wird der Literatur zufolge nur bei der Festigkeitshypothese der gespeicherten Gestaltänderungsenergie (von REINER und WEISSENBERG) berücksichtigt. Ob diese Hypothese auf Fließ- und Bruchgrenzen von ETFE-Folien anwendbar ist, wurde noch nicht untersucht. Für die Fließgrenze wurden bislang die Schubspannungshypothese (SH) nach TRESKA und die Hypothese der Gestaltänderungsenergie (GEH) nach HUBER-MISES-HENCKY diskutiert (Anm.: für duktile Kunststoffe wird i.d.R. die GEH verwendet). Beide Hypothesen können jedoch nicht Einflüsse aus Zeit und Temperatur berücksichtigen.

Eine Voraussetzung zur Definition des Fließeintrittes ist das Fließkriterium. Die in Kurzzeitzugversuchen ermittelten Spannungs-Dehnungskurven von ETFE-Folien zeigen - je nach Versuchsbedingungen (Temperatur, Dehngeschwindigkeit und Spannungszustand) - häufig keine ausgeprägte Streckgrenze. Teilweise haben sie auch mehrere charakteristische Punkte, die auf strukturelle Veränderungen hinweisen. Zudem kann die Fließgrenze mit unterschiedlichen Methoden ermittelt werden, was einen Vergleich von Testergebnissen erschwert.

Der Herstellungsprozess der thermoplastischen ETFE-Folien wird von den Herstellern aus nachvollziehbaren Gründen nicht publiziert. Strukturen teilkristalliner Thermoplaste wurden an verschiedenen Polymeren beobachtet und in der Literatur beschrieben, aber nicht am Werkstoff ETFE-Copolymer oder an den modifizierten ETFE-Copolymer-Folien.

Da systematische Untersuchungen des nichtlinearen mechanischen Verhaltens von ETFE-Folien, insbesondere der Einflüsse von Temperatur, Dehngeschwindigkeit und Spannungsverhältnis, bislang nur in sehr begrenztem Maße vorliegen, beruht die Bemessung i.d.R. auf Nachweisen bei +23°C (Basis: monoaxiale Kurzzeitzugversuche). Zur Berücksichtigung ungünstiger Einflüsse auf die Festigkeiten, Dehngrenzen und ggf. Steifigkeiten werden Abminderungsfaktoren angesetzt. Einflüsse der Konfektion, der Konstruktion und der Umwelt werden auf der Basis von Langzeituntersuchungen an Probekörpern unter simulierten (erhöhten) oder unter realen (nicht erhöhten) Einwirkungen abgeschätzt. Man stützt sich bei der Abschätzung der Lebenserwartung und der langzeitigen Einflüsse der Witterung u.a. auf den zehnjährigen Freibewitterungstest in Phönix, Arizona, aus dem Jahr 1989. Bei der Abschätzung des Temperatureinflusses stützt man sich auf vorliegende Herstellerangaben zum Temperatureinfluss auf die monoaxial gemessenen Materialkennwerte nach Abb. 2.2.

### 3 Chemischer und struktureller Aufbau, Herstellung, Verarbeitung

#### 3.1 Fluorpolymerwerkstoffe

##### 3.1.1 Entwicklung

Das Ethylen/Tetrafluorethylen-Copolymer (E/TFE oder vereinfacht **ETFE**) gehört zur Gruppe der Fluorpolymere, deren bedeutendster Vertreter das Polytetrafluorethylen (**PTFE**) ist. PTFE wurde bekannt unter dem Warennamen TEFLON<sup>®</sup>. Sowohl ETFE als auch PTFE beinhalten die aus Kohlenstoff und Fluor gebildete Monomereinheit Tetrafluorethylen (**TFE**, C<sub>2</sub>F<sub>4</sub>), die als Gas erstmals 1933 synthetisiert wurde.

Die Polymerisation des Tetrafluorethylen (TFE) zu Polytetrafluorethylen (PTFE) erfolgte rein zufällig im Jahr 1938. Im Labor der Firma DuPONT<sup>®</sup> (USA) wurde bei der Lagerung großer Mengen TFE in einem unter Druck stehenden Stahlzylinder eine Polymerreaktion ausgelöst, bei der ein wachsartiges weißes Pulver entstand – PTFE. 1946 erschien PTFE zunächst als Versuchsprodukt auf dem amerikanischen Markt, die Großproduktion erfolgte ab 1948 (KOCH 1981 [98]).

Im Jahr 1960 wurde das Polyfluorethylen/Propylen-Copolymer (**FEP**) auf dem Markt eingeführt. Es folgte im Jahr 1970 das Ethylen/Tetrafluorethylen-Copolymer (**ETFE**) unter dem Handelsnamen TEFZEL<sup>®</sup> und schließlich im Jahr 1972 das Tetrafluorethylen/Perfluoralcylvinylethen(Perfluoralkoxy)-Copolymer (**PFA**) (NIERATSCHKER 2003 [139]).

Neben den o.g. Vertretern werden heute noch weitere, wirtschaftlich bedeutende, Fluorpolymerwerkstoffe hergestellt:

- Polychlortrifluorethylen (**PCTFE**)
- Polyvinylidenfluorid (**PVDF**)
- Polyvinylfluorid (**PVF**)
- Tetrafluorethylen/Bistrifluormethyl-Difluor-Dioxolan (**PTFEAF**)
- Ethylen/Chlortrifluorethylen-Copolymer (**ECTFE**)
- Tetrafluorethylen/Hexafluorpropylen-Copolymer (**TFEP**)
- Tetrafluorethylen Hexafluorpropylen / Vinylidenfluorid-Copolymer (TFE/HFP/VDF) (**THV**)

Fluorpolymerwerkstoffe werden aufgrund ihrer, in vielerlei Hinsicht, günstigen Eigenschaften auch als Hochleistungs-Kunststoffe bezeichnet. Sie haben niedrige Reibungskoeffizienten, eine geringe Benetzungsfähigkeit und Kohäsion, eine hohe Wärmefestigkeit, gute dielektrische Eigenschaften, hohe Chemikalien- und Witterungsbeständigkeiten und eine prinzipielle Recyclingfähigkeit in Verbindung mit einer langen Lebensdauer und einer gesundheitlichen Unbedenklichkeit in ihrer festen Form. Darüber hinaus sind sie transparent, transluzent und opak herstellbar.

### 3.1.2 Anwendungen

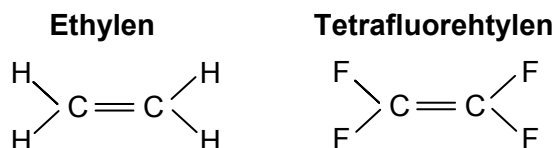
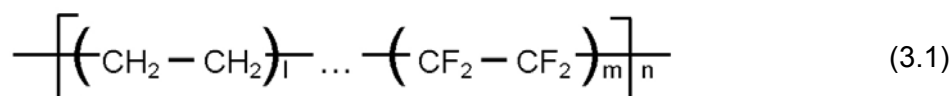
Dadurch, dass der Polymerisationsprozess im Labor aufwändig ist, beschränken sich die Einsatzspektren im allgemeinen auf Bereiche, in denen nur kleine Mengen der relativ teuren Werkstoffe benötigt werden, beispielsweise für Beschichtungen von Behältern, Dichtungen und Drähten, für Kabelisolierungen, Folienschläuche und Flachfolien. Sie werden beispielsweise in folgenden Bereichen eingesetzt:

- Luft- und Raumfahrttechnik
- Maschinen- und Fahrzeugbau
- Elektrotechnik und Halbleiterbau
- Solartechnik
- Medizintechnik
- Lebensmitteltechnik
- chemischer Apparatebau
- Bauwesen

## 3.2 Chemischer Aufbau

### 3.2.1 Überblick und Begriffsdefinitionen

ETFE ist ein durch Co-Polymerisation synthetisch hergestellter Kunststoff. Dieser besteht aus den beiden Monomereinheiten Ethylen\* (E) und Tetrafluorethylen\* (TFE). Die Monomeren werden aus den drei chemischen Elementen Fluor (F), Kohlenstoff (C) und Wasserstoff (H) gebildet. Die chemische Formel von ETFE ist in Gl. 3.1, die Bindungsenergien und Bindungsabstände in Tab. 3.1 und das Modell eines Makromolekülabschnittes in Abb. 3.1 dargestellt.



\* Ab dem Erscheinen der Nomenklatur von August Wilhelm VON HOFMANN im Jahr 1866 wurde Ethylen (auch Äthylen) als Ethen (auch Äthen) bezeichnet. Die Nomenklatur von HOFMANN war schließlich auch die Basis für die Nomenklatur der International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC)[84]. Im Bauwesen behauptet sich nach wie vor die chemisch nicht ganz korrekte Bezeichnung Ethylen (engl. ethylene). Sie wird auch in dieser Arbeit benutzt.

	Bindungsenergie [kJ/mol]	Bindungsabstand [nm]
<b>C = C</b>	427	0,135
<b>C – H</b>	370	0,109
<b>C – F</b>	460	0,131

Tab. 3.1 Bindungsenergien und Bindungsabstände der kovalent gebundenen Atome C, H und F (EHRENSTEIN 1999 [118])

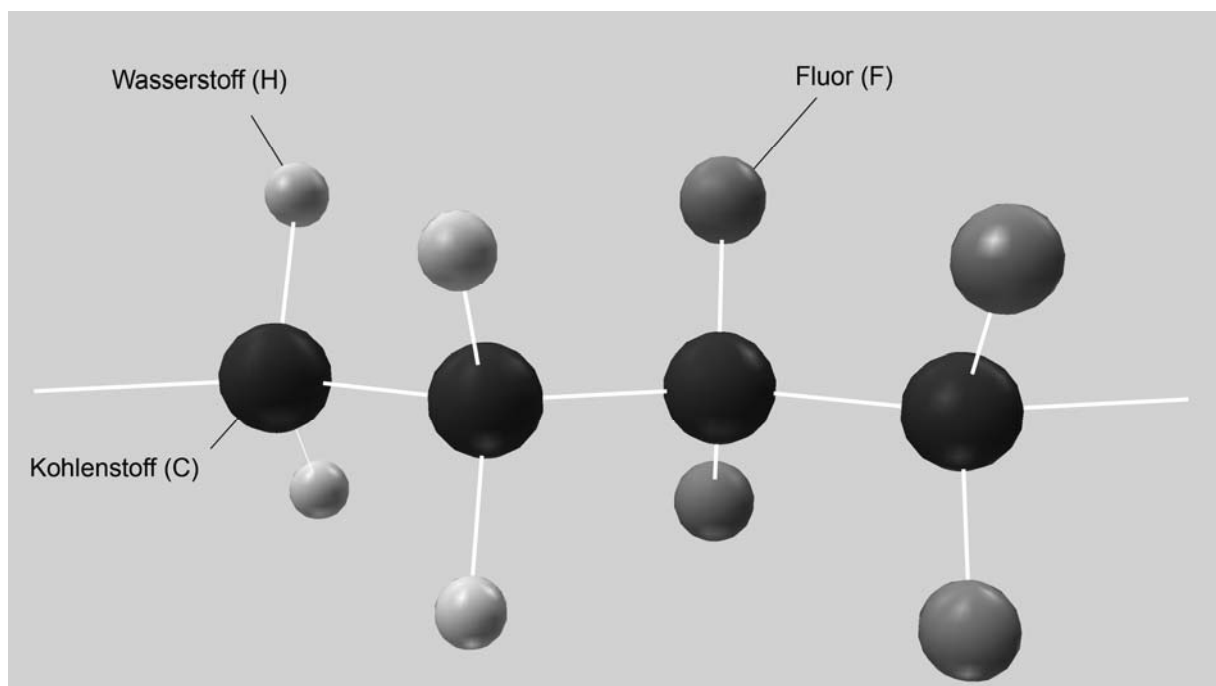


Abb. 3.1 Modell eines ETFE-Makromolekül-Segmentes mit chemischem Aufbau der Monomereinheiten Ethylen (Ethen)  $C_2H_4$  und Tetrafluorethylen (Tetrafluorethen)  $C_2F_4$ , HOSTAFロン ET<sup>®</sup>, nach HOECHST<sup>®</sup> [79]

In Makromolekülen sind einzelne Atome (hier: C, H und F) durch feste chemische Bindungen miteinander verbunden. Auch mehrere Makromoleküle können durch chemische Verbindungen miteinander vernetzt sein. Die chemischen Verbindungen zwischen den Atomen eines oder mehrerer Makromoleküle werden als Hauptvalenzbindungen (kovalente Bindungen) bezeichnet. Darüber hinaus existieren sekundäre Bindungen zwischen den Molekülen, die geringere Kräfte bewirken. Sie beruhen auf elektrostatischen Effekten, wie der VAN DER WAALS-Kraft, der Induktionskraft (DEBYE-Kraft), der Dispersionskraft (LONDON-Kraft) und den Wasserstoffbrücken. Diese sekundären Bindungsarten werden als Nebervalenzbindungen bezeichnet.

Einen Werkstoff, dessen Grundbestandteile synthetisch oder halbsynthetisch erzeugte Polymere mit organischen Gruppen sind, bezeichnet man als Kunststoff. Umgangssprachlich wird Kunststoff oft als Plastik oder Plaste bezeichnet, selbst wenn sich das Material nicht plastisch sondern elastisch verhält. Daher wird in der Wissenschaft der Begriff Kunststoff bevorzugt. Kunststoffe werden beispielsweise zu Formteilen, Halbzeugen, Fasern oder Folien weiterverarbeitet.

Ein Polymer (altgriech.: poly = viel; meros = Teil) ist eine chemische Verbindung, die aus langen Molekülketten oder verzweigten Molekülen (Makromolekülen) besteht, welche aus gleichen oder gleichartigen Einheiten, den so genannten Monomeren, bestehen.

Ein Fluorpolymer besitzt makromolekulare chemische Verbindungen aus Fluor und Kohlenstoff. Fluorpolymerwerkstoffe sind teilkristallin, schmelzbar und somit thermoplastisch verarbeitbar.

Monomeren (engl.: monomers, griech.: mono = ein, einzel; meros = Teil) sind niedermolekulare, reaktionsfähige Moleküle, die sich zu molekularen Ketten oder Netzen, zu unverzweigten oder verzweigten Polymeren, zusammenschließen können. Der Chemiker versteht hierunter Moleküle mit einer reaktionsfähigen Doppelbindung.

Synthetische Kunststoffe werden aus Monomeren erzeugt. Halbsynthetische Kunststoffe entstehen durch die Verarbeitung natürlicher Polymere (zum Beispiel Zellulose zu Zelluloid).

Das Verfahren der synthetischen Herstellung von Polymeren heißt Polymerisation (s. Kap. 3.4.2). Man unterscheidet zwischen Homo-Polymerisation, bei der nur eine Monomerart eingesetzt wird, und Copolymerisation, bei der zwei oder mehrere verschiedene Monomeren zur Reaktion gebracht werden. Die Produkte der Polymerisation nennt man Polymerisate.

Die aus zwei Arten von Monomeren zusammengesetzten Copolymere können je nach Anordnung der Monomeren in der Makromolekülkette in die folgenden vier Klassen unterteilt werden:

- statistisches Copolymer mit zufälliger Anordnung der Monomeren (z.B. AABAAABBAB...)
- alternierendes Copolymer mit regelmäßiger Anordnung der Monomeren (z.B. ABABAB...)
- Blockcopolymer, mit längeren Blöcken der Monomeren (z.B. AAABBBAAA...)
- Pfropfcopolymere, bei denen Blöcke eines Monomeren auf das Gerüst (Rückgrat) eines anderen Monomeren aufgepfropft sind.

Das aus etwa 25 % Ethylen und 75 % Tetrafluorethylen bestehende, nicht modifizierte, ETFE-Copolymerisat ist nahezu alternierend aufgebaut (molares Verhältnis etwa 1,2 zu 1,0, FRANCK 2000 [62]). Hingegen beinhalten die modifizierten ETFE-Folienprodukte bis zu 20-Gewichtsprozent weitere Bestandteile [77], so genannte Modifier, die zu anderen Monomer-Anteilen und somit zu einem veränderten Molekülkettenaufbau mit Verzweigungen oder Seitenketten führen können. Der molare Anteil der Monomereinheit Tetrafluorethylen (TFE) im monomeren Gemisch liegt nach [79] für die modifizierte ETFE-Folie <sup>®</sup>HOSTAFILON ET 6235 im Bereich zwischen etwa 22 % bis 68 %. Hieraus resultiert im entstehenden Copolymer ein molarer Anteil von etwa 47 % bis 53 % TFE (s. Abb. 3.2).

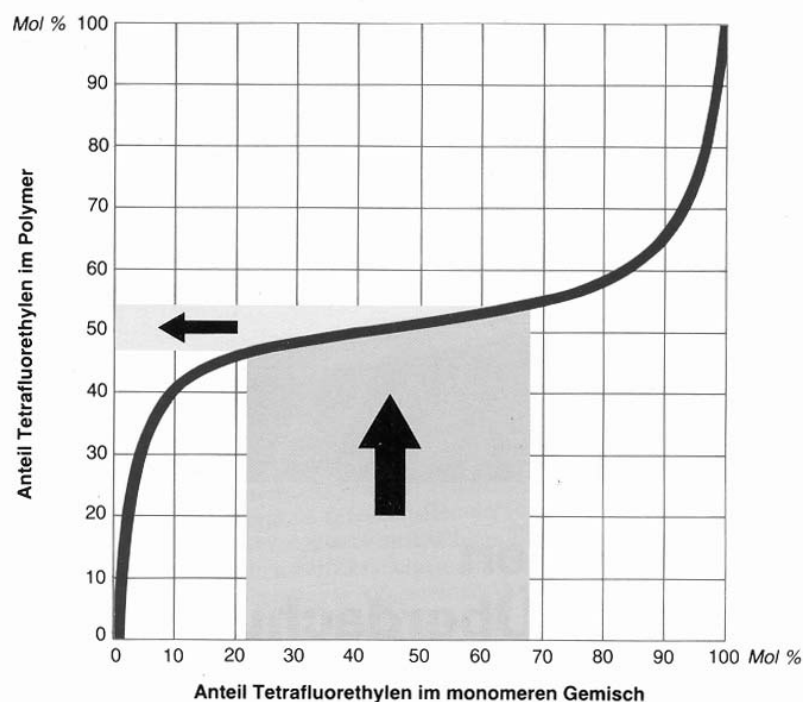


Abb. 3.2 Anteil des Tetrafluorethylens TFE im monomeren Gemisch und im Copolymer (weitere Bestandteile: Ethylen und Modifier), Angaben in Mol %; HOSTAFロン ET<sup>®</sup>, HOECHST<sup>®</sup> [79]

Die mittlere Molmasse der modifizierten ETFE-Folie NOWOFLON<sup>®</sup> ET 6235 (transparent (natur),  $d = 50 \mu\text{m}$ ) beträgt nach BÖHME 2005 [208] 128,04 g/mol. Man beachte, dass es nach MENGES et. al. 2002 [111] diverse Methoden zur Bestimmung der mittleren Molekülmasse gibt, mit z.T. deutlichen Unterschieden im Ergebnis.

### 3.2.2 Monomereinheiten (Ethylen, Tetrafluorethylen)

Entsprechend Gleichung 3.1 besteht das ETFE-Copolymer aus den beiden Monomeren Ethylen ( $C_2H_4$ ) und Tetrafluorethylen (TFE =  $C_2F_4$ ).

Ethylen (engl.: ethylene) ist ein farbloses, süßlich riechendes Gas. Es ist das einfachste Alken (ungesättigter Kohlenwasserstoff mit einer Kohlenstoffdoppelbindung). Ethylen ist in der chemischen Industrie Ausgangsstoff für die Synthese von über 30 Prozent aller Petrochemikalien. Es ist Bestandteil etlicher Kunststoffe.

Ursprünglich wurde Ethylen durch Dehydratisierung von Ethanol oder durch Isolierung aus Kokereigas gewonnen. Diese Verfahren werden trotz großer Nachteile noch immer in einigen Ländern Südamerikas, Asiens und Afrikas angewendet. Stand der Technik ist jedoch, es durch Cracken von Erdgas, Erdöl, Ethan, oder höheren Kohlenwasserstoffen zu gewinnen oder es aus Gasfraktionen, die bei der Erdöl-Destillation anfallen, zu isolieren. Die Ausbeute bei diesen Verfahren ist wesentlich höher. Bei vielen petrochemischen Prozessen fällt Ethylen in großen Mengen an, es ist daher billig. Es kann mit Hilfe von Bromwasser nachgewiesen werden, da das bräunliche Bromwasser durch das Ethylen entfärbt wird.

Tetrafluorethylen (engl.: tetrafluorethylene) ist chemisch äußerst inert, d.h. es ist widerstandsfähig gegenüber allen bekannten Lösungsmitteln. Ursache hierfür ist die Abschirmung der C=C-Bindung (Doppelbindung) durch die Fluoratome. Die Bindung zwischen Fluor und Kohlenstoff (C-F-Bindung) ist die stärkste Einfachbindung, die Kohlenstoff eingehen kann. Mit abnehmendem TFE-Gehalt werden beispielsweise die chemische Beständigkeit, die Schmelztemperatur und die Einsatztemperatur geringer und die chemische Bindungsfähigkeit und die dielektrische Konstante größer (LEDWOCH 2003 [104]).

### **3.2.3 Elemente (Fluor, Kohlenstoff, Wasserstoff)**

Wasserstoff (engl.: hydrogen) ist das 1. Element im Periodensystem (I Hauptgruppe: Alkalimetalle). Es ist das häufigste chemische Element des Universums, jedoch nicht in der Erdkruste. Dort kommt es mit einem Masseanteil von 0,9 % vor. Es ist Bestandteil des Wassers, der meisten organischen Verbindungen und sämtlicher lebender Organismen. Es ist das leichteste der chemischen Elemente. Unter irdischen Bedingungen liegt Wasserstoff in der dimerisierten Form - als molekularer Wasserstoff H<sub>2</sub> - vor, einem farb- und geruchlosen Gas.

Kohlenstoff (engl.: carbon) ist das 6. Element im Periodensystem (IV Hauptgruppe: Kohlenstoff-Silizium-Gruppe). In der Erdhülle kommen die Kohlenstoffatome mit einem Anteil von 0,087 % sowohl in gediegener Form, also als reines chemisches Element, als auch chemisch gebunden vor. Es besitzt die Fähigkeit zur Bildung von komplexen Molekülen und weist von allen chemischen Elementen die größte Vielfalt an chemischen Verbindungen auf. Kohlenstoffverbindungen bilden die molekulare Grundlage allen irdischen Lebens.

Fluor (engl.: fluorine) ist das 9. chemische Element im Periodensystem (VII Hauptgruppe: Halogene). Mit einem Massenanteil von 0,028 % steht Fluor an 17. Stelle der Elementhäufigkeit in der Erdhülle. In gediegener Form kommt es in der Natur nicht vor. Die für die Technik wichtigste Fluorverbindung stellt der Fluorapatit (Fluorapatit, CaF<sub>2</sub>) dar. Fluorapatit kommt weltweit fast überall vor. Die Hauptproduktionsländer sind China, Mongolei, Russland, Mexiko, Südafrika und Frankreich. In Deutschland ist beispielsweise der Wölsendorfer Fluorapatit bekannt.



### 3.3 Struktureller Aufbau

#### 3.3.1 Polymerarten (Thermoplaste, Duroplaste, Elastomere)

Eine Möglichkeit, die Vielzahl der Kunststoffe (Polymerwerkstoffe) zu klassifizieren, besteht in ihrem unterschiedlichen Verhalten bei Temperaturänderung. Diesbezüglich lassen sich drei Gruppen unterscheiden: Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere. Die Unterschiede des thermischen Verhaltens resultieren aus unterschiedlichen Strukturen und Verbindungen der Polymere. In Abb. 3.3 sind die unterschiedlichen Möglichkeiten schematisch dargestellt.

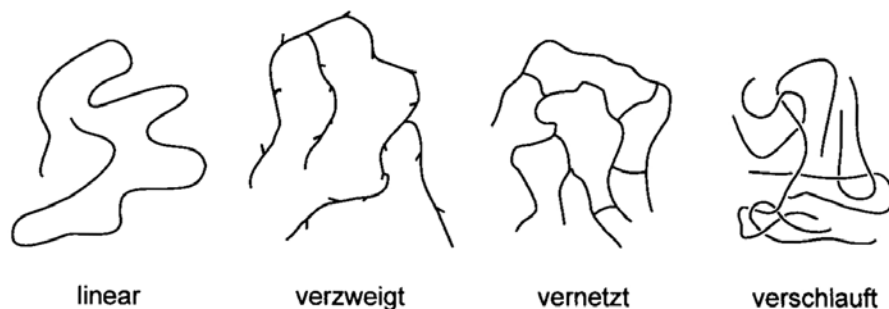


Abb. 3.3 Schematische Darstellung der makromolekularen Strukturen linear und verzweigt, sowie der Verbindungsmöglichkeiten vernetzt und verschlauft, EHRENSTEIN 1999 [51]

Elastomere (z.B. Kautschuk) sind kettenförmige Makromoleküle, die durch wenige chemische Brücken zu einem weitmaschigen Raummolekül vernetzt sind.

Duroplaste (z.B. Harze) sind kettenförmige Makromoleküle, die durch viele chemische Brücken zu einem engmaschigen Raummolekül vernetzt sind.

Aufgrund der Vernetzung schmelzen Elastomere und Duroplaste nicht. Sie zersetzen sich bei entsprechender Temperatur.

Thermoplaste (z.B. Fluorpolymere (PTFE, FEP, ETFE, PFA, etc.)) bestehen aus langen linearen oder verzweigten Molekülketten, die von zwischenmolekularen Kräften zusammengehalten werden. Die Ketten sind nicht vernetzt, sondern in bestimmten Bereichen (Phasen) verschlauft. Thermoplastische Kunststoffe sind aufgrund der Beweglichkeit ihrer Molekülketten schmelzbar, schweißbar, quellbar und löslich (MICHAELI 1999 [118]).

#### 3.3.2 Amorphe und teilkristalline Thermoplaste

Die linearen oder verzweigten Makromoleküle der Thermoplaste können unterschiedlich gelagert sein. Sind sie verknäuelte, beispielsweise wie ein Filz oder Wattebausch, bilden sie eine amorphe (regellose) Phase. Sind sie streckenweise parallel ausgerichtet, bilden sie eine kristalline Phase. Da die Dichte eines einzelnen Makromoleküls nur etwa ein Hundertstel der Dichte eines amorphen Thermoplasts beträgt, müssen sich die Makromoleküle vielfach durchdringen (EHRENSTEIN 1999 [51]).

Weist ein Thermoplast sowohl eine amorphe als auch eine kristalline Phase\* auf, nennt man ihn teilkristallin (s. Abb. 3.4). Da niemals alle Makromoleküle parallel ausgerichtet sein können, gibt es keinen vollständig kristallinen Thermoplastwerkstoff. Der Kristallisationsgrad, auch Kristallinitätsgrad genannt, gibt den gewichtsmäßigen Anteil kristalliner Strukturen an. Er ergibt sich aus dem chemischen Aufbau der Makromoleküle, den thermischen Verarbeitungsprozessen und einer ggf. erfolgten Wärme-Nachbehandlung. Nach MENGES et. al. 2002 [111] haben teilkristalline Thermoplaste einen Kristallisationsgrad zwischen 30 % und 70 %. Für ETFE-Folie (NOWOFLON® ET 6235, transparent, d= 50 µm) wird er von BÖHME 2005 [208] mit 32,64 % angegeben.

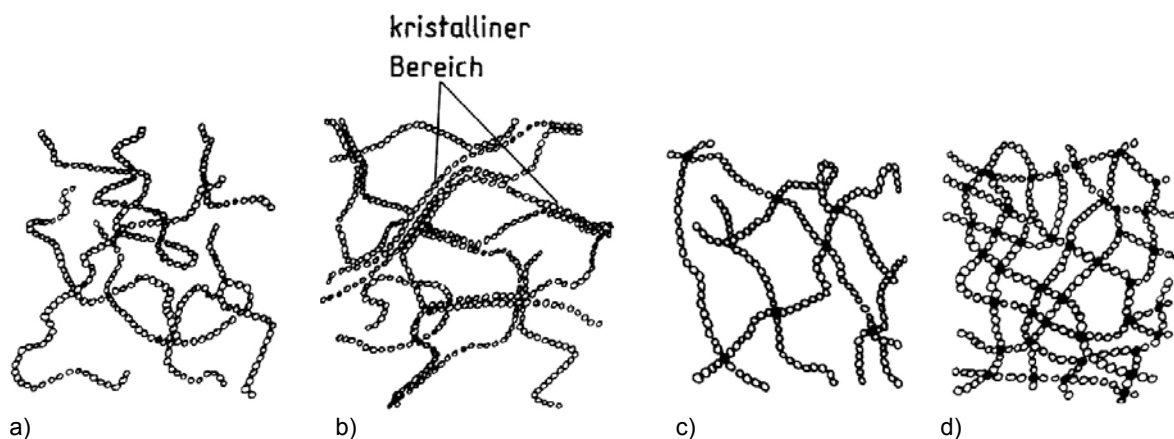


Abb. 3.4 Polymerstrukturen: a) amorpher Thermoplast, b) teilkristalliner Thermoplast (mit amorphem und kristallinen Phasen), c) Elastomer, d) Duroplast; MICHAELI 1999 [118]

Der Kristallisationsgrad kann mittels Röntgenanalyse, Infrarotspektroskopie oder Kernresonanzspektroskopie (SAECHTLING 2001 [158]) sowie durch die Bestimmung der technischen Schmelzwärme (FRANCK 2000 [62]) festgestellt werden. Zwischen der Dichte und dem Kristallisationsgrad besteht ein direkter Zusammenhang, so dass bei Vorliegen einer Eichkurve von der Dichte auf den Kristallisationsgrad geschlossen werden kann (SAECHTLING 2001 [158]).

Obwohl ein teilkristalliner Thermoplast aus einer amorphen und einer kristallinen Phase besteht, ist er homogen, da er, makroskopisch betrachtet, an jeder Stelle die gleichen Eigenschaften aufweist. Abb. 3.5 (a) zeigt die verbreitete und hilfreiche Modellvorstellung, dass die geordneten, also kristallinen, Bereiche in einer Matrix aus ungeordneten, also amorphen, Molekülketten eingebettet sind (Fransenmizellen-Modell). Nach MENGES et. al. 2002 [111]) entspricht diese Vorstellung aber nicht der beobachteten Realität vieler Polymere. Vielmehr entstehen bei der Erstarrung aus der Schmelze kristalline Überstrukturen, so genannte Sphärolithe, die aus den einzelnen Kristall-Lamellen (Kristallite) bestehen. Die Kristallite sind so klein, dass sie nicht im Lichtmikroskop, sondern nur im Elektronenmikroskop zu erkennen sind. Hingegen sind die Überstrukturen der Sphärolithe (s. Abb. 3.5 b) mit polarisiertem Licht auch lichtmikroskopisch zu erkennen.

\* Eine Stoffmenge mit homogenen physikalischen und chemischen Eigenschaften wird als Phase bezeichnet. (EHRENSTEIN 1999 [51])

Der Kristallisationsgrad hat einen wesentlichen Einfluss auf die Eigenschaften des Kunststoffes. Da in der amorphen Phase keine Fernordnungen\* in der Größenordnung der Lichtwellenlängen ( $0,40\ \mu\text{m}$  bis  $0,75\ \mu\text{m}$ ) vorhanden sind, gibt es auch keine Änderung des Brechungsindex und somit keine diffuse Streuung. Ein amorpher Thermoplast ist daher transparent. Hingegen ist die kristalline Phase nicht transparent, sondern opak, höchstens transluzent. Die teilkristalline (naturfarbene) ETFE-Folie ist zwar transparent, also durchsichtig, aber aufgrund der kristallinen Phase leicht getrübt.

Die kristalline Phase ist weitaus zäher und wärmebeständiger als die relativ spröde und sich bei hohen Temperaturen zersetzende amorphe Phase. Teilkristalline Thermoplaste schwinden stärker als amorphe Thermoplaste (MENGES et. al. 2002 [111]).

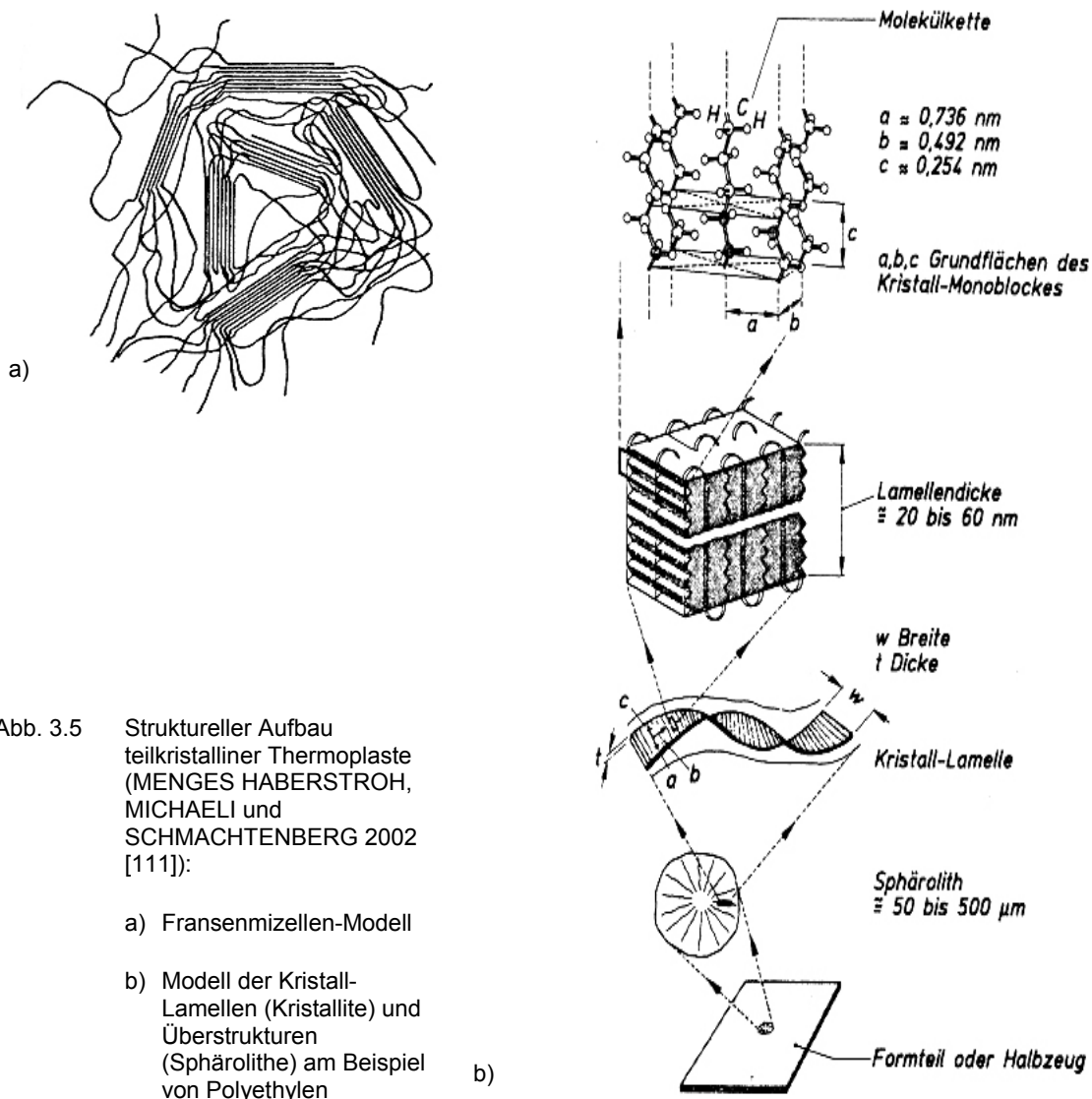


Abb. 3.5 Struktureller Aufbau teilkristalliner Thermoplaste (MENGES HABERSTROH, MICHAELI und SCHMACHTENBERG 2002 [111]):

a) Fransenmizellen-Modell

b) Modell der Kristall-Lamellen (Kristallite) und Überstrukturen (Sphärolithe) am Beispiel von Polyethylen

\* Eine über die nächsten Nachbarn hinausgehende Ordnung der Makromoleküle bezüglich des Abstandes, der Anordnung oder der Orientierung wird als Fernordnung bezeichnet. Der Begriff Nahordnung bezeichnet derartige Ordnungszustände, wenn sie sich nur auf die unmittelbaren Nachbarn erstrecken. (EHRENSTEIN 1999 [51])

### 3.3.3 Zustandsbereiche (Aggregatzustände)

Bei Kunststoffen unterscheidet man die drei folgenden, von der Temperatur und der Beanspruchung abhängigen Zustandsbereiche, auch Aggregatzustände genannt (s. Abb. 3.6):

- Energieelastischer Zustand (fester Zustand oder Glaszustand)
- Entropieelastischer Zustand (gummielastischer oder quasi-gummielastischer Zustand)
- Fließzustand (Schmelzezustand)

Im energieelastischen Zustand sind Kunststoffe fest. Sie verhalten sich spröde (glasähnlich) und ihr E-Modul ist relativ groß. Verformungen beruhen weitgehend auf Änderungen der intermolekularen Atomabstände oder der Valenzwinkel. Drehungen der Kohlenstoffbindungen (C-C-Bindungen), Abgleiten von Verschlaufungen oder Gestaltänderungen sind im energieelastischen Zustand praktisch unmöglich (EHRENSTEIN 1999 [51]).

Im entropieelastischen Zustand sind Kunststoffe weich. Sie verhalten sich zäh (gummiähnlich) und ihr E-Modul ist klein.

Da die kristalline Phase nicht erweicht, sondern lediglich (bei höherer Temperatur) schmilzt, ergibt sich bei teilkristallinen Thermoplasten nach der Erweichung der amorphen Phase ein Nebeneinander der kristallinen Phase im energieelastischen und der amorphen Phase im entropieelastischen Zustand.

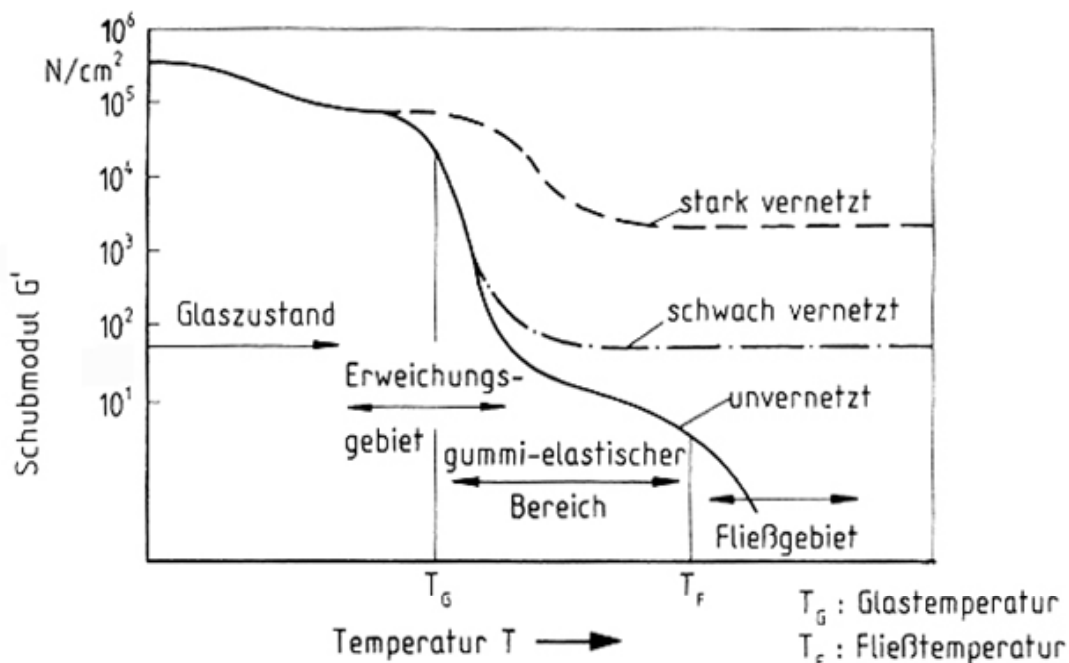


Abb. 3.6 Prinzipieller Verlauf des Speichermoduls  $G'$  (Realteil des Schubmoduls, FRANCK 2000 [62]) in Abhängigkeit von der Temperatur für Duroplaste (stark vernetzt), Elastomere (schwach vernetzt) und Thermoplaste (unvernetzt), MICHAELI 1999 [118]

Die Entropieelastizität beruht auf dem Bestreben der Moleküle, ihre statistisch wahrscheinlichste Form einzunehmen, nämlich die verknäuelte Form. Jede durch eine äußere Beanspruchung erzwungene gestrecktere Form der Moleküle bedeutet eine geringere Entropie und damit einen weniger wahrscheinlichen Zustand. Die Verringerung der Entropie bewirkt eine Kraft, welche darauf hin wirkt, den Kunststoff wieder in seine ursprüngliche Form zurückzuführen (s. Abb. 2.25).

Der Übergang von einem zum nächsten Aggregatzustand erfolgt nicht schlagartig sondern über einen größeren Temperatur- bzw. Beanspruchungsbereich. Der Glasübergangsbereich kennzeichnet den Übergang vom weitgehend energie- in den weitgehend entropieelastischen Zustand bzw. umgekehrt. Je nachdem, ob der Kunststoff beispielsweise erhitzt oder abgekühlt wird, spricht man auch vom Erweichungs- oder Einfrierbereich bzw. -gebiet. Der Übergang vom entropieelastischen Bereich in den Fließ- oder Schmelzezustand wird durch den Kristallitschmelzbereich, bei Abkühlung (Erstarrung) aus der Schmelze, als Kristallisationsbereich bezeichnet (s. Abb. 3.6). Die beiden Übergangsbereiche (bei Erwärmung bzw. bei Abkühlung) müssen nicht identisch sein (MENGES et. al. 2002 [111]).

### 3.3.4 Bestimmung der Glasübergangstemperatur

Die Glasübergangstemperatur kann thermodynamisch mit der **Differential Scanning Calorimetry (DSC)** (s. Kap. 3.3.5) oder thermisch-mechanisch, mit der **Dynamisch-Thermisch-Mechanischen Analyse (DMA)** ermittelt werden (s. auch Kap. 2.2.2.2). Eine DMA-Methode ist der Torsionsschwingversuch, bei dem zwei grundlegende Verfahren unterschieden werden: das Verfahren mit freier, gedämpfter Schwingung nach ISO 6721-2 und das Verfahren mit erzwungener Schwingung nach ISO 6721-7. In beiden Fällen wird eine Kunststoffprobe einer Scherdeformation (Torsionsauslenkung) bei konstanter Frequenz ausgesetzt und die jeweils periodische Materialantwort gemessen. Es ergeben sich daraus der Speichermodul  $G'$  (auch Realteil, engl.: tensile storage modulus), der Verlustmodul  $G''$  (auch Imaginärteil, engl.: loss modulus) und der mechanische Verlustfaktor  $\tan \delta$  (engl.: dissipation factor) (s. Abb. 3.7).

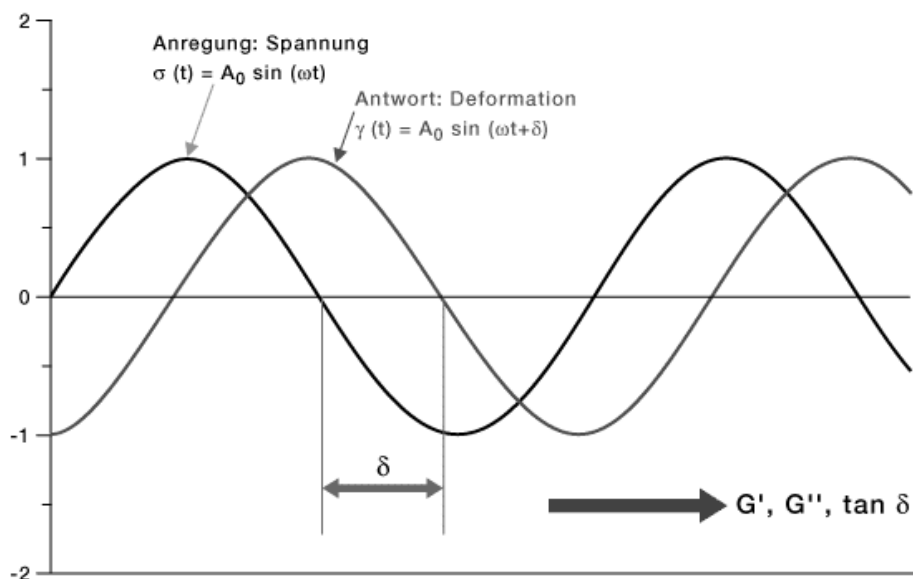


Abb. 3.7 Torsionsschwingversuch: Messung der Phasenverschiebung zwischen Spannungsanregung und Dehnungsantwort, Ergebnisse: Speichermodul  $G'$ , Verlustmodul  $G''$  und mechanischer Verlustfaktor  $\tan \delta$ ; BAYER® 2006 [14]

Wird die Probe langsam erwärmt, ergibt der Verlauf des Speichermoduls  $G'$ , aufgetragen über die Temperatur  $T$ , eine für jeden Kunststoff charakteristische Kurve. Aus ihr können unterschiedliche Aggregatzustände, Erweichungsgebiete, Glasübergangstemperaturen, Kristallitschmelztemperaturen sowie sekundäre Relaxationsgebiete (Nebenerweichungsgebiete) abgeleitet werden. Das Verhältnis der beiden Moduln  $G'' / G'$  ist ein Maß für den Verlust an Wärmeenergie (Dissipationsenergie) während der Phasenverschiebung. Es wird als Dämpfung oder als mechanischer Verlustfaktor  $\tan \delta$  bezeichnet:

$$\tan \delta = G'' / G' \quad (3.2)$$

Speichermodul  $G'$  und Verlustmodul  $G''$  ergeben zusammen den so genannten komplexen Modul  $G^*$ :

$$G^* = G' + i G'' \text{ [vektoriell: } |G^*| = \sqrt{(G'^2 + G''^2)} \quad (3.3)$$

Im Fall eines HOOKE'schen Festkörpers, bei dem die gesamte Energie als mechanische Arbeit im System gespeichert ist, ist der Imaginärteil  $G'' = 0$ . Es gilt:  $G^* = G' = G$  (Schubmodul). Im Fall einer rein viskosen NEWTON'schen Flüssigkeit ist der Realteil  $G' = 0$ . Es gilt:  $G^* = i \cdot G''$ . Die DMA kann beispielsweise auch als Zugversuch durchgeführt werden. Abb. 3.8 zeigt für DYNEON<sup>®</sup> ET 6235 (früher: HOSTAFLON<sup>®</sup> ET 6235) den im Zugversuch ermittelten Verlauf des Speichermoduls  $E'$  und des mechanischen Verlustfaktors ( $\tan \delta = E'' / E'$ ) über die Temperatur [206].

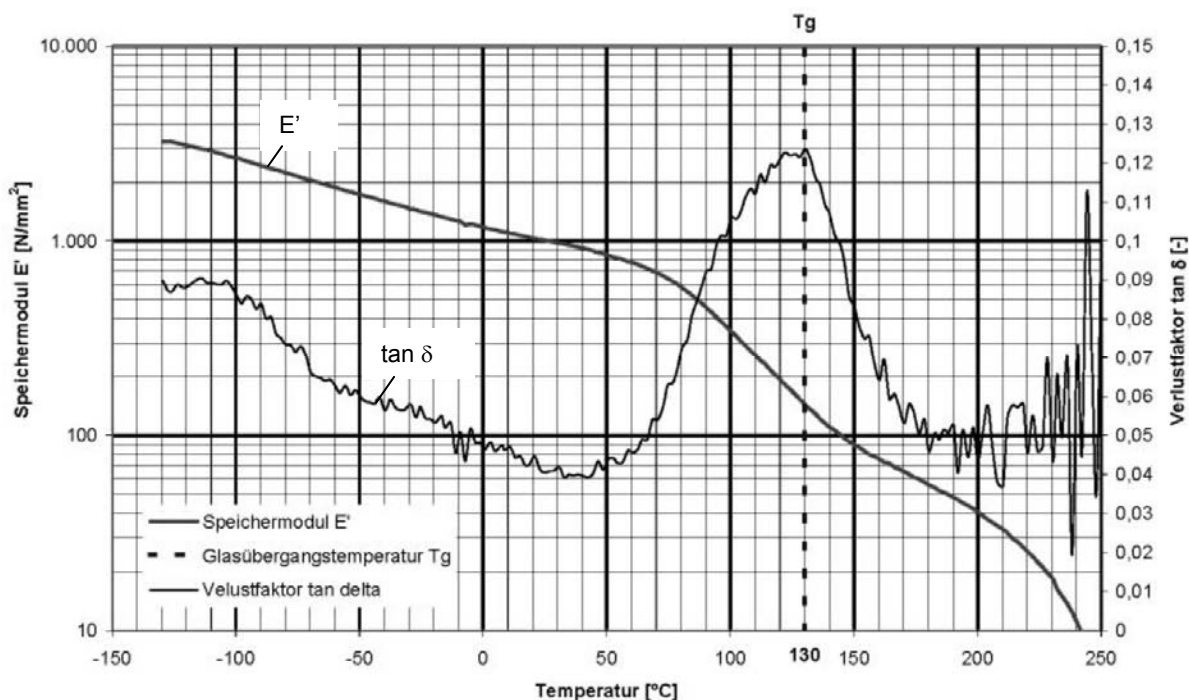


Abb. 3.8 Dynamisch-Thermisch-Mechanische Analyse (DMA) eines prismatischen Probekörpers aus Granulat DYNEON<sup>®</sup> ET 6235 (früher: HOSTAFLON<sup>®</sup> ET 6235) im Zugversuch mit sinusförmiger Beanspruchung ( $f = 10 \text{ Hz}$ ,  $0,01 \leq \varepsilon \leq 0,1 \%$ ,  $T/t \cong 2^\circ\text{C} / \text{min}$ ,  $b/d/l = 1/2/40 \text{ mm}$ ): Speichermodul  $E' [N/mm^2] = [MPa]$  und mechanischer Verlustfaktor  $\tan \delta [-]$ , aufgetragen über die Temperatur ( $-130^\circ\text{C} \leq T \leq 250^\circ\text{C}$ ), Herstellerangaben DYNEON<sup>®</sup> 2006 (nachträglicher Eintrag der Glasübergangstemperatur  $T_g$ )

Der Erweichungsbereich der amorphen Phase ( $\alpha$ -Übergang, engl.:  $\alpha$ -transition) ist in o.g. Diagramm deutlich durch den Abfall des Speichermoduls  $E'$  zwischen etwa  $+70^\circ\text{C}$  und  $+170^\circ\text{C}$  erkennbar. Die Glasübergangstemperatur  $T_g$  entspricht dem lokalen Maximalwert des mechanischen Verlustfaktors  $\tan \delta$  und etwa dem Wendepunkt der Speichermodulkurve  $E'$ . Der ermittelte Wert liegt bei  $T_g \cong +130^\circ\text{C}$ . Ein weiteres lokales Maximum des mechanischen Verlustfaktors liegt bei etwa  $T = -100^\circ\text{C}$ , ggf. liegt hier ein Nebenerweichungsbereich ( $\beta$ -Übergang, engl.  $\beta$ -transition) vor. (Anm.: Von FRANCK 2000 [62] wird die Glasübergangstemperatur von ETFE mit  $T_g = -100^\circ\text{C}$  angegeben.) Nach EHRENSTEIN 1999 [51] bedeutet ein Nebenerweichungsbereich ebenfalls eine erhöhte Abnahme der Steifigkeit beim Erwärmen und den Beginn einer Versprödung beim Abkühlen.

Unterhalb des Erweichungsbereiches ( $\alpha$ -Übergang) der amorphen Phase spricht man vom Glaszustand mit überwiegend energieelastischem Verhalten und relativ hohen Moduln (E-Modul, Schubmodul, Speichermodul etc.) bei kleinen Dehnungen. Die Moleküle verlassen in diesem Bereich nur unter relativ großem Energieeintrag ihren Platz. Im Erweichungsbereich kann beispielsweise der Speichermodul um mehrere Zehnerpotenzen fallen. In diesem Bereich ist das Verhalten auch bei kleinen Dehnungen nicht mehr überwiegend elastisch, sondern wird überwiegend viskoelastisch. Wird die Glasübergangstemperatur überschritten, spricht man vom gummielastischen Zustand mit entropieelastischem Verhalten und geringen Steifigkeiten (Moduln). Die Makromoleküle können in diesem Bereich aneinander abgleiten (Makro-BROWN'sche Bewegung). Bei weiterer Temperaturerhöhung hängt das Verhalten von der Struktur des Polymers ab. Unvernetzte Polymere - wie ETFE - schmelzen, während vernetzte Polymere im gummielastischen Zustand verbleiben, bis sie schließlich thermisch zersetzt werden (z.B. RHEINHARDT 1997 [150]).

Abb. 3.9 zeigt das spezifische Volumen  $1/\gamma$  [ $\text{cm}^3/\text{g}$ ] von ETFE, aufgetragen über die Temperatur. Das Diagramm lässt im baupraktischen Temperaturbereich keine nennenswerte Veränderung der Dichte ( $\gamma \cong 1,75 \text{ g/cm}^3$ , s. Tab. 2.12) erwarten.

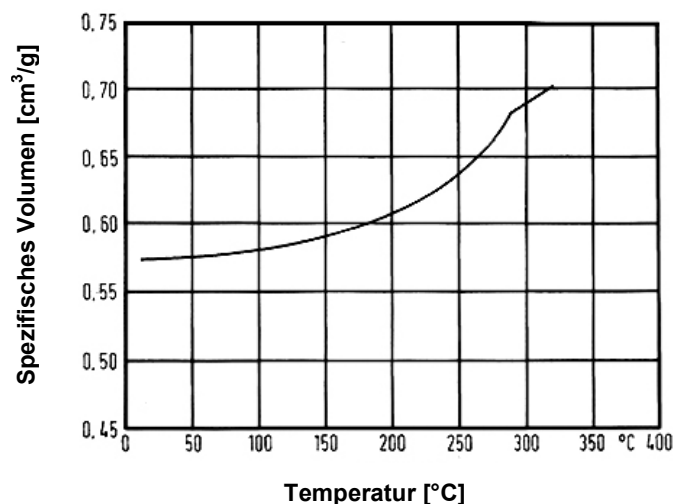


Abb. 3.9 Spezifisches Volumen von ETFE bei 1 bar in Abhängigkeit von der Temperatur ( $T \geq +10^\circ\text{C}$  bis zum Schmelzbereich), SAECHTLING 2001 [158]

### 3.3.5 Bestimmung der Schmelztemperatur

Die **Differential Scanning Calorimetry (DSC)** ist ein thermisches Analyseverfahren, mit dem der Schmelzpunkt, die Glasübergangstemperatur, die spezifische Wärmekapazität, die Enthalpie und die isotherme Kristallisation gemessen werden können. Sie erfasst den Unterschied der Wärmeströme zwischen einem Proben- und einem Referenztiegel, welche gleichzeitig demselben Aufheiz- und Abkühlprogramm unterworfen sind (s. Abb. 3.10).

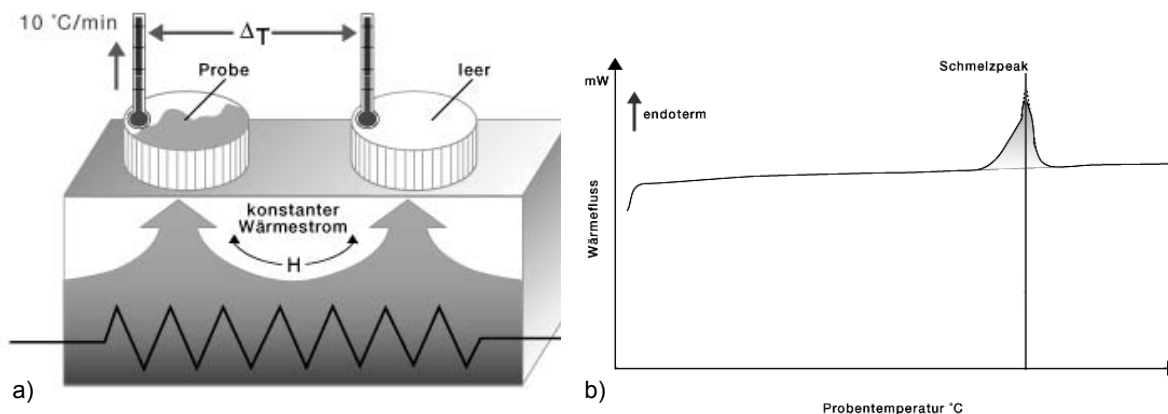


Abb. 3.10 a) Prinzipskizze der Differential Scanning Calorimetry (DSC), b) Messung des Schmelzpunktes am Beispiel des Polymers PA 6, ©BAYER MATERIAL SCIENCE 2006 [14]

Im Labor der DYNEON® 2005 [210] wurden Proben aus dem Granulat DYNEON® ET 6235 (HOSTAFLO® ET 6235) mit dem DSC-Gerät PERKIN ELMER PYRIS 1 mit einem Wärmestrom von 10°C/min untersucht. Die über die Temperatur aufgetragene Kurve des Wärmestromes ist in Abb. 3.11 dargestellt. Der Schmelzpunkt ergibt sich hieraus bei einer Temperatur von etwa 270°C (268,56°C). Dieser Wert liegt in dem in der Polymer-Literatur für ETFE angegeben Bereich für den (Kristallit-)Schmelzpunkt (265°C bis 275°C).

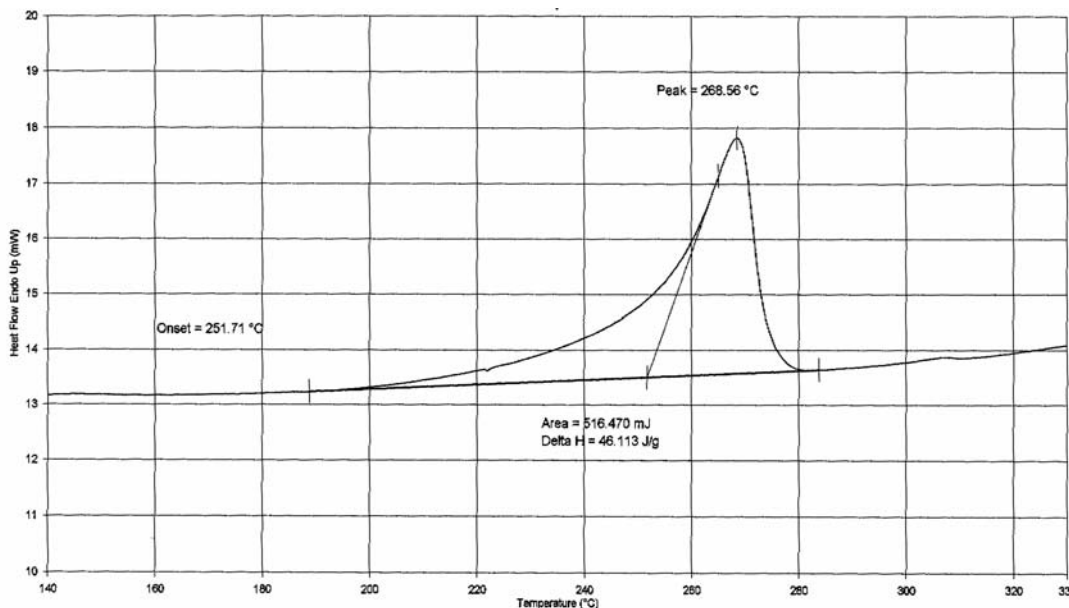


Abb. 3.11 Schmelzpunktanalyse von ETFE DYNEON® ET 6235 (HOSTAFLO® ET 6235) mit der Differential Scanning Calorimetry (DSC), Gerät®PERKIN ELMER PYRIS 1, Herstellerangaben®DYNEON, 2005



3.4 Fertigungsprozess (Herstellung und Verarbeitung)

3.4.1 Überblick

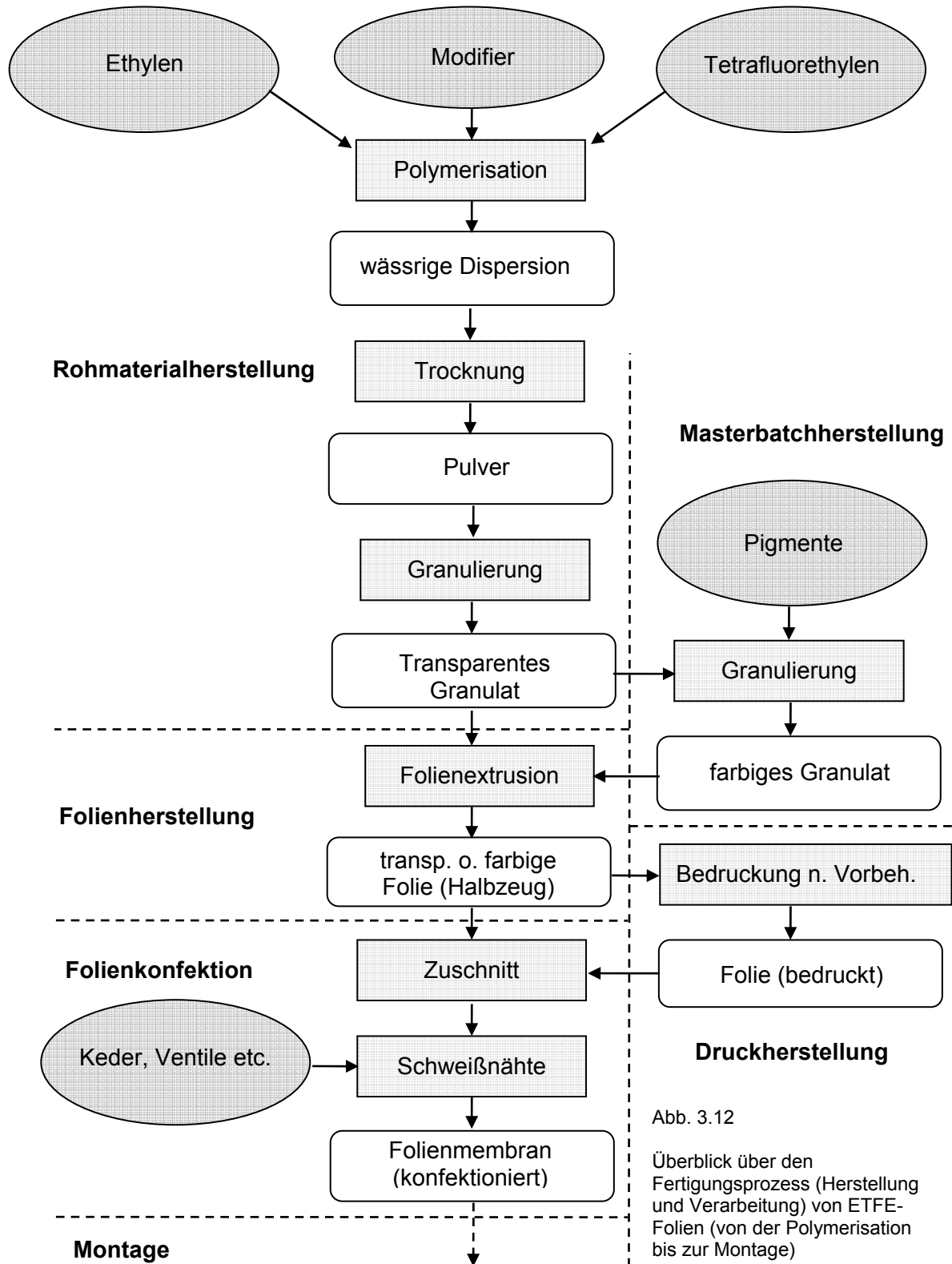


Abb. 3.12  
Überblick über den Fertigungsprozess (Herstellung und Verarbeitung) von ETFE-Folien (von der Polymerisation bis zur Montage)

Die Umformung von Rohstoffen zum Halbzeug der Folie wird Folienherstellung genannt. Die Anwendung technischer Prozesse auf fertige Folien (z.B. Bedruckung, Konfektion zur Membran) bezeichnet man als Folienverarbeitung (NENTWIG 2000 [137]).

Folien aus nicht thermoplastisch verarbeitbaren Kunststoffen (z.B. PTFE) lassen sich meist nur mechanisch (z.B. durch Abschälen) herstellen. Hingegen können thermoplastische Kunststoffe (z.B. ETFE) unter Druck und bei entsprechenden Temperaturen durch Kalandrieren (Auswalzen) oder durch Extrudieren (Auspressen) hergestellt werden. Für architektonische Anwendungen wurden bislang extrudierte ETFE-Folien eingesetzt. In Abb. 3.12 sind die wesentlichen Schritte des Fertigungsprozesses der ETFE-Folienmembranen dargestellt, d.h. die Herstellung der Folie als auch ihre Verarbeitung.

### 3.4.2 Polymerisation

Es gibt unterschiedliche Verfahren, um aus Monomeren ein Polymer herzustellen. Man unterscheidet heute die folgenden drei Arten der Polymerisation (früher Polyreaktion)\*:

- Additionspolymerisation als Kettenreaktion \*
- Kondensationspolymerisation \*
- Additionspolymerisation als Stufenreaktion \*

Bei der **Additionspolymerisation als Kettenreaktion (früher: Polymerisation)** werden - wie im Fall des ETFE - die C-C-Doppelbindungen (C = Kohlenstoff) zu langkettigen Makromolekülen verbunden (s. Abb. 3.1 und Gl. 3.1). Da bei ETFE zwei Monomereinheiten (Ethylen und Tetrafluorethylen) bei der Polymerisation beteiligt sind, spricht man von Copolymerisation. Der Beginn der Aufspaltung von Bindungen der Kohlenstoffatome mit Hilfe von Katalysatoren führt zur Anlagerung weiterer Monomereinheiten und schließlich zu einer Kettenreaktion, bei der die langkettigen Makromoleküle (Polymere) ohne Abspaltung niedermolekularer Nebenprodukte entstehen. Die Eigenschaften des Copolymers werden jedoch nicht alleine durch die chemische Zusammensetzung bestimmt, sondern auch durch das Polymerisationsverfahren, d.h., dass bei gleichen Ausgangsstoffen durch Polymerisation in der Gasphase, der Lösung, der Emulsion, der Suspension oder auch in der Substanz (in Masse) unterschiedliche Reaktionsprodukte mit unterschiedlichen Eigenschaften entstehen (NENTWIG 2000 [137]). Bei nicht modifiziertem ETFE spricht man von einer radikalischen Polymerisation, die zu einem alternierenden Aufbau führt (s. Tab. 2.2.1 in FRANCK 2000 [62]). Welche Änderungen die bei ETFE zugefügten Modifier in Bezug auf die Polymerisationsart und auf die entstehenden Strukturen bewirken, ist in der Polymerliteratur nicht beschrieben.

Bei der **Kondensationspolymerisation (früher: Polykondensation)** werden die Makromoleküle ebenfalls aus monomeren Grundbausteinen aufgebaut, jedoch haben diese keine aktiven, polymerisierbaren C-C-Doppelbindungen. Die Monomereinheiten können sich unter Abspaltung von Nebenprodukten (z.B. Wasser oder Alkohol) zu größeren Molekülen, so genannten Kondensationspolymerisaten (z.B. Polyester und Polyamid), zusammenschließen.

---

\* Nach FRANCK 2000, S. 35 [62] hat die International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) die Nomenklatur der Polymerisation kürzlich vereinheitlicht. Demnach heißt die Polyreaktion heute Polymerisation und wird nach den drei Arten der Additionspolymerisation mit Kettenreaktion (früher Polymerisation), Additionspolymerisation als Stufenreaktion (früher Polyaddition) und Kondensationspolymerisation (früher Polykondensation) unterschieden.

Die **Additionspolymerisation als Stufenreaktion (früher: Polyaddition)** ähnelt in vielem der Kondensationspolymerisation, jedoch ohne dass niedermolekulare Nebenprodukte abgespalten werden. Die Polyaddition führt häufig zu vernetzten Polymeren, beispielsweise zu Epoxydharzen.

### 3.4.3 Granulierung

Durch die Additionspolymerisation (als Kettenreaktion) erhält man in diesem Fall eine wässrige Dispersion\*, aus der mittels Trennung und Trocknung das ETFE in Pulverform gewonnen wird. Zur besseren Dosierbarkeit (Korngröße, Korngrößenverteilung, Schüttdichte) sowie zur staubfreien Weiterverarbeitung wird das Pulver zu Granulat verarbeitet. Zur Granulierung sind einige vorbereitende Schritte erforderlich (Mischen, Sieben, Verdichten, Homogenisieren, Plastifizieren etc.). Nach der Plastifizierung wird die heiße Polymerschmelze durch ein geeignetes Werkzeug, eine Art Lochsieb, gepresst, so dass 2-3 mm dicke Polymerstränge entstehen. Werden diese direkt hinter der Düsenplatte von einem rotierenden Messer abgeschabt, spricht man vom **Heißabschlag**. Die bei diesem Verfahren entstehenden Granulate sind durch die noch im Teilchen herrschende erhöhte Temperatur kugel- oder linsenförmig (s. Abb. 3.14 a). Hingegen werden beim so genannten **Kaltabschlag** die austretenden Polymerstränge zunächst über ein mit Wasser bespültes Leitblech geführt, bevor sie durch ein Schneidwerk in kleine Stücke zerteilt werden. In einem Wasserbad werden die Teilchen nachgekühlt bevor sie zum Trockner gelangen (s. Abb. 3.13). Bei ETFE-Granulat wird i.d.R. der Kaltabschlag angewendet [77], was an der zylindrischen Form des Granulates zu erkennen ist (s. Abb. 3.14 b).

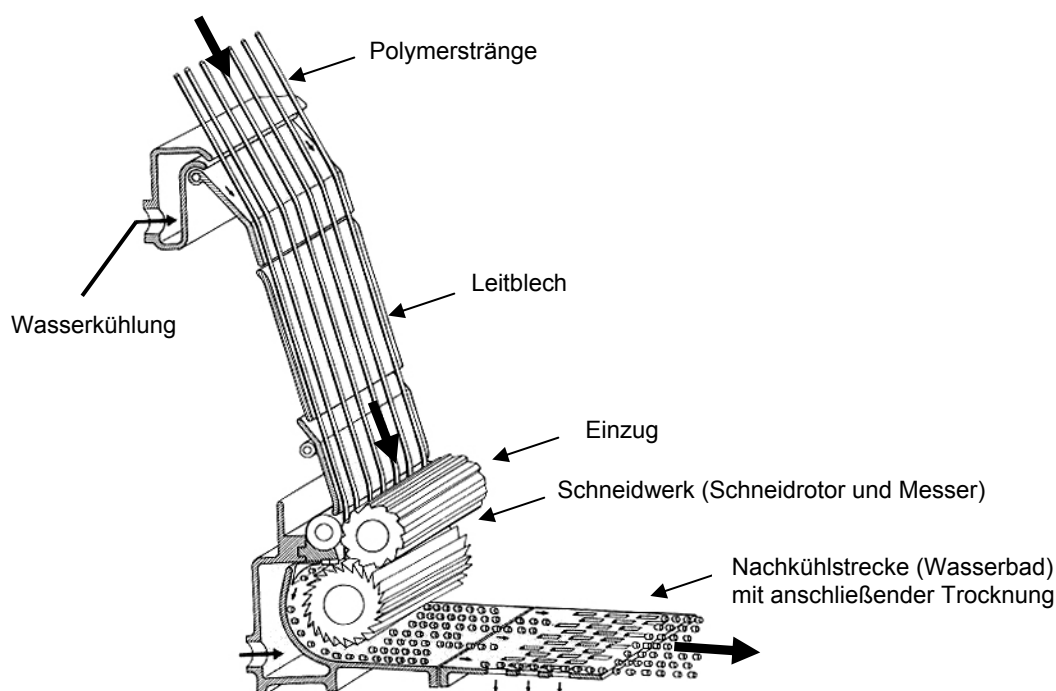
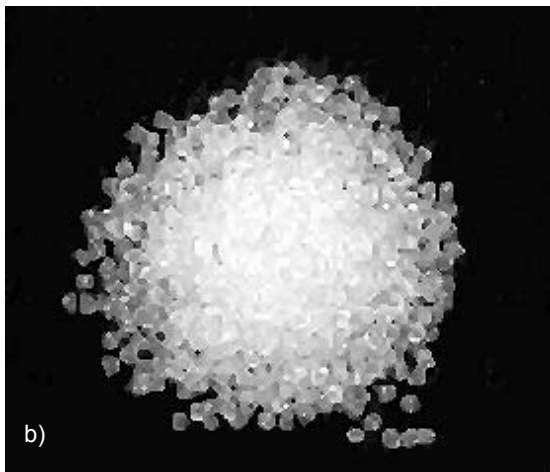


Abb. 3.13 Unterwasser-Granulieranlage (Kaltabschlag), NENTWIG 2000 [137] (mit zusätzlichen Hinweisen)

\* Eine Dispersion ist in der Chemie ein Gemenge aus mindestens zwei Stoffen, die sich kaum lösen oder chemisch miteinander verbinden lassen.



Durch das Mischen von Pulvern oder Granulaten aus zwei oder mehr Polymeren entstehen so genannte **Blends**. Die Mischung von produktionsfrischem Material mit Altmaterial (Regenerat, Regranulat, Recyklat) wird ebenfalls als Blend oder auch als Verschnitt bezeichnet.



Werden nachträglich Pigmente zur Farbgebung oder auch Additive zur Eigenschaftsverbesserung zum ursprünglichen Granulat (oder zum Pulver) hinzugefügt und erneut granuliert, spricht man von einem **Masterbatch**. Dieses wird i.d.R. von speziellen Masterbatch-Herstellern angeboten, wie z.B. dem Unternehmen COLORANT-CHROMATICS, in Cham (Schweiz).

Jeder Granulathersteller führt eine Auswahl an unterschiedlichen **Granulatsorten** für die anschließende Verwendung, beispielsweise als Kabelisolierung, Formteil oder Folie. Die einzelnen Sorten jedes Herstellers sind durch Kürzel gekennzeichnet. DuPONT führt derzeit etwa 17 Granulate im Sortiment (TEFZEL<sup>®</sup> HT 2004, TEFZEL<sup>®</sup> 200 u.a.). Die unterschiedlichen Granulatsorten können

Abb. 3.14

- a) linsenförmiges Granulat (Heißabschlag), DuPont 2006 [44]
- b) zylinderförmiges Granulat (Kaltabschlag), De VRIES 2003 [40]

trotz gleicher Prüfbedingungen und Probekörpergeometrien zu völlig unterschiedlichen mechanischen, elektrischen und optischen Eigenschaften führen.

Folgende Hersteller von ETFE-Granulaten sind bekannt (CORINEK 1993 [99] sowie HODANN und STEURER 2006 [77]):

- ASAHI GLASS<sup>®</sup>
- DAIKIN<sup>®</sup>
- DuPONT<sup>®</sup>
- DYNEON<sup>®</sup> (gehörig zum Unternehmen 3M<sup>®</sup>, Fluorpolymersparte früherer Teil der HOECHST<sup>®</sup> AG)
- früher auch MONTEFLUOS<sup>®</sup> (MONTEFLUOS<sup>®</sup> ist heute Teil der SOLVAY SOLEXIS<sup>®</sup>)

#### 3.4.4 Extrusion

Unter Extrusion versteht man die kontinuierliche Herstellung eines Halbzeuges aus Kunststoff, bei der unter Druck und Temperatur eine thermoplastische Schmelze durch ein Werkzeug gepresst wird.

### 3.4.4.1 Blasfolien und Flachfolien

Für ETFE-Folien werden zwei Extrusionsverfahren angewendet: Die Blasfolienextrusion und die Flachfolienextrusion (Verfahrensschemata s. Abb. 3.15). Flachfolien werden auch als Gießfolien und Blasfolien auch als Schlauchfolien bezeichnet. Da Blasfolien bislang größere Dickenschwankungen, Inhomogenitäten und mechanische Verstreckungen aufwiesen, wurden im architektonischen Bereich ausschließlich ETFE-Flachfolien eingesetzt. Nach NENTWIG 2000 [137] führten aber neue Konstruktionsideen in den letzten Jahren zu großen Qualitätsfortschritten in der Blasfolienextrusion. Objektive und quantitative Vergleiche liegen jedoch nicht vor. Es ist bei der Wahl des Extrusionsverfahrens zu bedenken, dass die maximale Bahnenbreite der Flachfolien verfahrensbedingt bei derzeit 1.600 mm (ASAHI<sup>®</sup>) bzw. bei 1.550 mm (NOWOFOL<sup>®</sup>) liegt, während Blasfolien je nach Düsendurchmesser auch etwa doppelt so breit hergestellt werden können.

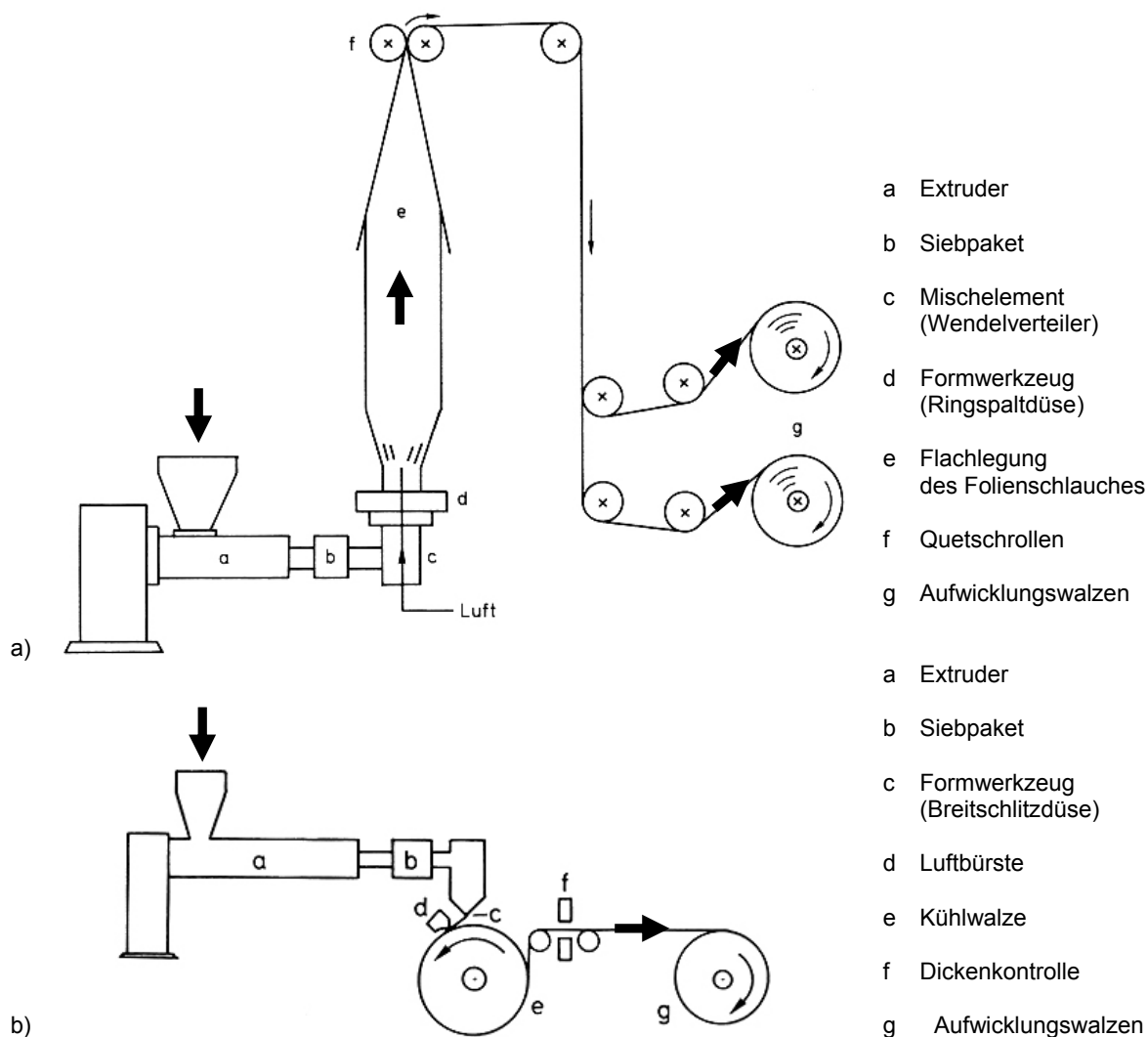


Abb. 3.15 Extrusionsverfahren: a) Blasfolienextrusion, b) Flachfolienextrusion, NENTWIG 2000 [137] (mit zusätzlichen Hinweisen)

Im folgenden seien einige bekannte ETFE-Flachfolien, sowie ihre Hersteller, beispielhaft genannt:

- FLUON® ET (ASAHI®)
- NORTON ETFE-film® (SAINT GOBIN®)
- NOWOFLON® (NOWOFOL®)
- TECAFLON® (ENSINGER®)
- TEFZEL® (DuPONT®)
- TOYOFLON® (TORAY®)
- früher auch HOSTAFLON® (HOECHST®, heute DYNEON® (Teil des Unternehmens 3M®))



Abb. 3.16 ETFE-Folie NOWOFLON® ET 6235, Foto: Covertex

Die Folienhersteller greifen auf unterschiedliche Granulate eines oder mehrerer Granulathersteller zurück. Gelegentlich findet sich das Kürzel des zugrunde liegenden Granulats in der Folienbezeichnung wieder. Beispielsweise besteht die Folie NOWOFLON® ET 200 aus dem Granulat TEFZEL® 200 des Unternehmens DuPONT® und NOWOFLON® ET 6235 aus dem Granulat DYNEON® ET 6235 (früher HOSTAFLON® ET 6235) des Unternehmens DYNEON® (früher HOECHST®).

Da bisher keine ETFE-Blasfolien im architektonischen Bereich eingesetzt wurden, beschränken sich die folgenden Beschreibungen auf die Flachfolienextrusion.

### 3.4.4.2 Extruder

Der Extruder hat die Aufgabe, das Granulat zu einer möglichst homogenen und exakt temperierten Schmelze zu erhitzen bzw. zu mischen, und mit dem notwendigen Druck in das nachfolgende Werkzeug, die Düse, zu befördern. Verschiedene Extruderarten sind beispielsweise in FRANCK 2000 [62] und MICHAELI 1999 [118] dargestellt und beschrieben (z.B. Schnecken-, Ramm-, Planetwalzen-, Kaskaden-, Weissenbergextruder). Zur Veranschaulichung des Prinzips ist in Abb. 3.17 ein Einschneckenextruder dargestellt. Er wird häufig bei der Herstellung von ETFE-Folien verwendet [77].

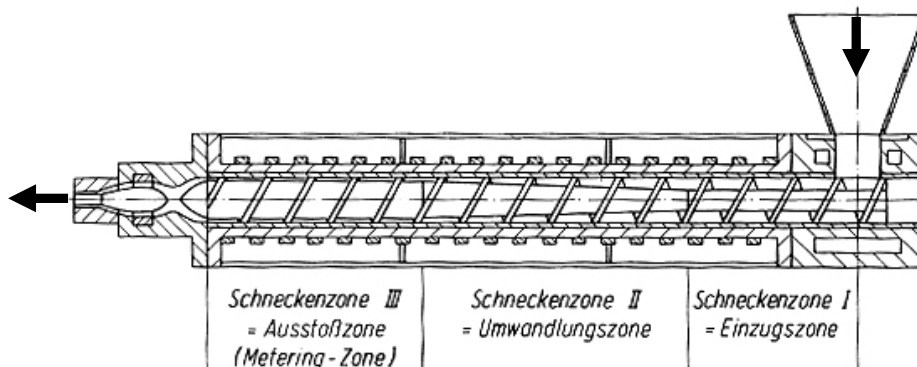


Abb. 3.17

Längsschnitt durch einen Einschneckenextruder, NENTWIG 2000 [137] (nach HELLERICH, HARSCH und HAENLE); (mit zusätzlichen Hinweisen)

### 3.4.4.3 Formwerkzeug (Düse)

Das ebenfalls beheizte Form- oder Extrusionswerkzeug ist an den Extruder angeflanscht. Es formt die Schmelze zur gewünschten Querschnittsform (Profil, Rohr, Platte, Folie etc.). Im Fall der ETFE-Flachfolien ist das Formwerkzeug eine Breitschlitzdüse (s. Abb. 3.18), die dem Extrusionsverfahren seinen Namen (Breitschlitzextrusionsverfahren) gab.

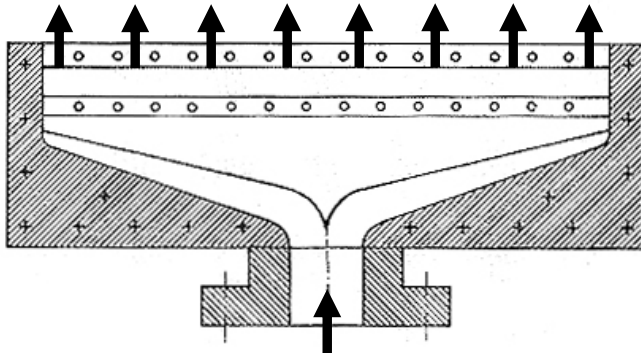


Abb. 3.18 Breitschlitzdüse zur Flachfolienextrusion, so genannte Kleiderbügeldüse, NENTWIG 2000 [137] (mit zusätzlichen Hinweisen)

Zum Ausgleich von Dickenunterschieden in Querrichtung wird der Spalt der Breitschlitzdüse mit Hilfe von etlichen Stellschrauben justiert (Flexlip-Düse). Die Justierung geschieht manuell oder automatisch. Die automatische Justierung ist an eine permanente Dickenmessung in Verbindung mit einer Mess- und Regeltechnik für den Düsenpalt gekoppelt ([77], [137]).

Bei der Herstellung dickerer Folien muss der Düsenpalt weiter geöffnet werden, was zu einem Abfall des Schmelzedruckes führt. Daher steigen die Dickenschwankungen mit zunehmender Foliendicke häufig überproportional an. Für die Praxis hat dies zur Folge, dass der Einsatz einer dickeren Folie (ab etwa 250  $\mu\text{m}$ ) erfahrungsgemäß nur noch eine geringe oder gar keine Erhöhung der nutzbaren Festigkeit mit sich bringt, und somit in statischer Hinsicht häufig nutzlos ist.

### 3.4.4.4 Walzenstuhl (Kalibrierung und Kühlung)

Flachfolien, so auch ETFE-Folien, werden nach dem Verlassen der Breitschlitzdüse auf einem Walzenstuhl kalibriert und gekühlt. Die Kühlstrecke besteht aus Abkühlwalzen. Luftbürsten, auch Luftrakel oder Luftmesser genannt, sorgen durch einen Luftstrom für das Anliegen der Folienbahn an den Walzen. Bei modernen Anlagen kann die Kühlwalzentemperatur durch ein im Walzenkörper integriertes Umwälzsystem für das Kühlmittel innerhalb von 2 Kelvin konstant gehalten werden [137]. Wegen der Abkühlwalzen wird das Verfahren auch Chill-Roll Verfahren genannt. Eine andere, oft auch zusätzlich genutzte Abkühlart ist das Quenchen. Hierbei wird die Folie kurz nach der Verfestigung ebenfalls durch Kühlwalzen oder – was meist der Fall ist – durch ein Wasserbad schnell abgekühlt (abgeschreckt). Der Abkühlprozess beeinflusst die Kristallitgröße und damit die Eigenschaften der Folie. Ist die Abkühlgeschwindigkeit zu gering, erreicht man einen erhöhten Kristallisationsgrad und eine sprödere Folie (NENTWIG 2000 [137]).

#### 3.4.4.5 Abzug

An die Kühlstrecke schließt sich der Abzug an. Er hat die Aufgabe das Extrudat, in diesem Fall die Folie, mit konstanter Geschwindigkeit von der Düse und dem Walzenstuhl abzuziehen. Damit hat er einen Einfluss auf die Folieneigenschaften, da während des Abkühlprozesses eine Kraft auf die Folie einwirkt. Es gibt verschiedene Abzugsformen, wie Band-, Raupen- oder Rollenabzüge. Hinter dem Abzug wird die Folienbahn geschnitten und auf Rollen aufgewickelt. Die Folienbahn auf der so genannten Mutterrolle ist bei dünnen ETFE-Folien bis zu 3.000 m lang. [77]).

#### 3.4.4.6 Bahnfehler und Einflüsse auf die Folieneigenschaften

So genannte Bahnfehler können aufgrund der vielfältigen Einflussfaktoren bei der Folienfertigung immer auftreten. Schwerwiegende Fehler sind beispielsweise das Auftreten von Stippen, Bahnverlauf, Rollneigung sowie Dickenungleichmäßigkeiten (nach NENTWIG 2000 [137]):

**Stippen**, auch Gelteilchen oder "Fischaugen" genannt, sind Verunreinigungen, die die Folieneigenschaften sehr negativ beeinflussen. Ihr Auftreten kann eine Reihe von Ursachen haben, z.B. Fremdverunreinigungen (Staub oder Schmutzteilchen), Abbauprodukte oder an der Düse ausgeschiedene Additive, nicht geschmolzene Bereiche, zu hoch gefahrene Temperaturen, Beimischung von Recyclaten oder inhomogene Verteilungen von Füllstoffen.

Als **Bahnverlauf** bezeichnet man den Fall, dass die beiden Kanten der Folienbahn nicht parallel sondern gekrümmt verlaufen. Dies führt zu Problemen beim Aufwickeln. Der Bahnverlauf wird durch Fehler in der Fertigungsanlage verursacht.

Liegt die Folie nicht plan in der Ebene, sondern wölbt sich in Querrichtung auf, spricht man von **Rollneigung**, in der Praxis auch "Schüsseln" genannt [77]. Ursachen können z.B. eine ungleichmäßige Dickenverteilung oder fertigungsbedingte Eigenspannungen der Folie sein.

Eine **mangelnde Dickengleichmäßigkeit** resultiert z.B. aus Fehlern in der Fertigungsanlage (z.B. Justierung der Flexlip-Düse, Mess- und Regeltechnik).

Bei allen thermischen Verfahren zur Herstellung und Verarbeitung thermoplastischer Folien erfolgen **Reckprozesse** (mechanisch thermische Verstreckungen). Sie sind verfahrensbedingt und unvermeidbar, beispielsweise durch die eingebrachten Zugspannungen infolge des Abzugs bei gleichzeitiger Abkühlung. Sie bewirken eine Orientierung der Makromoleküle des Polymers in Reckrichtung. Reckprozesse können auch gezielt zur Verbesserung gewünschter Folieneigenschaften in Längs- und Querrichtung eingesetzt werden. Das Reckverhältnis beider Richtungen hat einen Einfluß auf die Ausrichtung der Makromoleküle. Es kann theoretisch so eingestellt werden, dass die Folie nahezu orthotropes oder auch stark anisotropes mechanisches Verhalten aufweist. Beim Recken nimmt die Folienfläche geringfügig zu und die Dicke geringfügig ab.

Durch den "**Memory-Effekt**" (s. Abb. 2.26) sind thermoplastische Werkstoffe bestrebt, den Zustand vor dem Reckvorgang einzunehmen. Die Eigenspannungen sind sozusagen eingefroren und der vorherige Zustand im Material gespeichert. Dies bedeutet, dass sich eine einmal vorgereckte Folie bei Erwärmung ggf. nicht dehnt sondern schrumpft.



Beim Aufwickeln können **Verunreinigungen zwischen die Folienwicklungen** gelangen, die den Wickelprozess beeinflussen oder eine mechanische Schädigung verursachen können. Hauptgrund der Verunreinigungen ist die elektrostatische Aufladung der Folienbahn in Verbindung mit Ablagerungen aus der Raumluft [77].

Darüber hinaus kann die Folienqualität durch **unsachgemäße Lagerung, Unachtsamkeit beim Transport oder bei Rollenwechseln** leiden. Die Fehlerquellen sind aufgrund der vielen Arbeitsschritte vielfältig und die Ursachen manchmal schwer zu diagnostizieren. Bei der Folienherstellung haben daher die Sauberkeit, die Sorgfalt und auch die Qualitätskontrolle eine große Bedeutung.

### 3.4.5 Konfektionierung

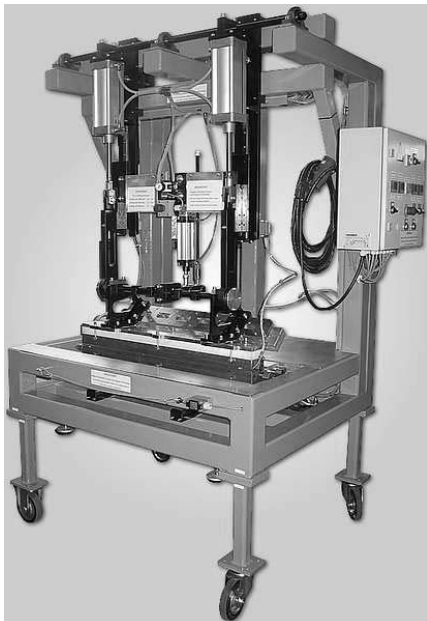


Abb. 3.19

Balkenschweißmaschine für ETFE,  
Fa. EICHENHOFER, 2007 [224]

Der Membrankonfektionär erhält die produktionsfrischen (oder gelagerten) transparenten, ggf. auch beschichteten oder pigmentierten ETFE-Folien chargenweise als Halbzeug (Rollenware) zur Weiterverarbeitung (Membrankonfektion oder auch Konfektionierung genannt). Er verschweißt die nach Zuschnitt aus den ebenen Folienbahnen herausgeschnittenen Teilflächen zur endgültigen Membranfläche mittels ETFE-Schweißmaschinen (s. z.B. 3.19). Hierbei werden Randtaschen mit Kederprofilen (Hohlsäume), Seiltaschen, etc. in die Folienmembran eingearbeitet. Anschließend werden Luftein- und Auslassstutzen, Entwässerungsstutzen etc. eingearbeitet. Im folgenden seien einige in Deutschland ansässige Membranbaufirmen (Konfektionäre) beispielhaft genannt, die neben anderen Membranwerkstoffen auch ETFE-Folien verarbeiten und im Bauwesen einsetzen:

- CENOTEC, Greven
- COVERTEX, Obing
- HIGHTEX, Rimsting
- KFM, Edersleben
- KOCH MEMBRANEN, Rimsting
- FOILTEC, Bremen

### 3.5 Untersuchte Folien

Bis etwa zum Jahr 2000 wurde in Europa für Membrankonstruktionen aus ETFE-Folie im architektonischen Bereich fast ausschließlich NOWOFLON® ET 6235 (HOSTAFLON® ET 6235, heute DYNELON® ET 6235) verwendet. Folie und Granulat unterlagen nach Herstellerangaben ([77], [206]) bis heute keinerlei Modifizierungen. Mittlerweile werden auch Folien anderer Hersteller verwendet. Die in der vorliegenden Arbeit dargestellten Werkstoffprüfungen wurden ausschließlich an den zwei Produkten ®NOWOFLON ET 6235 (transparent) des Folienherstellers ®NOWOFLON und ®FLUON ET NJ (transparent) des Folienherstellers ®ASAHI GLASS durchgeführt. Die beiden Folien unterscheiden sich sowohl in Bezug auf das verwendete Granulat als auch in Bezug auf den Extrusionsprozess (verwendete Maschinen etc.). Prinzipiell können beide Einflussgrößen zu Differenzen in den mechanischen Eigenschaften führen. Vergleichende Tests der beiden Folien zeigen aber bis zur Fließgrenze lediglich geringfügige Unterschiede in den Mittelwerten und auch in den Streuungen der mechanischen Kenngrößen (s. auch BLUM 2004 [18]).



## 4 Werkstoffprüfungen und FE-Simulationen

### 4.1 Aspekte der Werkstoffprüfung von ETFE-Folien

#### 4.1.1 Bemessungskennwerte

Der Einsatz von ETFE-Folien erfolgt bei den hier betrachteten Bauarten als Membran, d.h. als Flächenbauteil, das vernachlässigbare Druckkräfte, Biegemomente oder Torsionsmomente abträgt. Somit tritt im Werkstoff beispielsweise kein Stabilitätsversagen auf. Die Beanspruchung beschränkt sich auf Zug- und Schubspannungen - bei Betrachtung der beiden Hauptspannungsrichtungen lediglich auf Zugspannungen. Die Bemessungskennwerte und Kennwertfunktionen können daher aus Zugversuchen gewonnen werden.

Mit Bezug auf Anlage D - Grundlagen der Werkstoffmechanik, sind die folgenden Werkstoffeigenschaften und die diese beschreibenden Kennwerte oder Kennwertfunktionen für den bemessenden Konstrukteur bedeutend:

- Spannungs-Dehnungsverhalten im HOOKE'schen Bereich; Zugmodul  $E$ , Schubmodul  $G$  (Querkontraktionszahl  $\nu$ ) und Kriechmodul  $E_C$ , jeweils als Sekantenmoduln gemessen (ggf. auch als Tangentenmoduln)
- Spannungs-Dehnungs-Verhalten im nichtlinearen Bereich; Bruchverhalten
- Dehnungsanteile der rein elastischen Dehnung (zeitunabhängig), der viskoelastischen (zeitabhängig reversiblen) und der viskosen (zeitabhängig irreversiblen) Dehnungen
- Vergleichsspannungen an charakteristischen Grenzwerten (Kriechgrenze, Fließgrenze und Bruchgrenze)

Es ist hierbei zu beachten, dass bei der Materialprüfung grundsätzlich nicht die Eigenschaften eines Werkstoffes geprüft werden, sondern die Eigenschaften eines aus dem Werkstoff hergestellten Probekörpers. Dies gilt insbesondere für Kunststoffe. Damit ist eine Übertragbarkeit von Kennwerten oder Kennwertfunktionen, die an einem Probekörper gewonnen werden, auf andere Probekörpergeometrien oder Bauteile nicht ohne weiteres gegeben. Die hier vorgestellten Prüfungen beziehen sich demnach nicht auf "das ETFE", sondern auf geometrisch definierte Probekörper aus ETFE-Folie unter bestimmten Prüfbedingungen.

Die nach DIN EN ISO 527-1: 1996-04 [s. NORM 22] im einachsigen Zugversuch vorgegebenen 15 bis 25 mm schmalen Streifenproben sind zur Abschätzung des Verhaltens von Flächenbauteilen alleine wenig hilfreich. Sie werden daher im Membranbau seit einigen Jahren durch Biaxialprüfungen mit nahezu quadratischen, kreuzförmigen oder auch runden Probengeometrien ergänzt. Die Biaxialprüfungen sind zwar schwerer reproduzierbar und bieten aufgrund möglicher vielfältiger Versuchsbedingungen weniger Vergleichsmöglichkeiten mit anderen Werkstoffen. Sie bilden aber das Tragverhalten eines Flächengebildes genauer ab. Ebene Biaxialversuche sind bislang nicht genormt, stellen aber zumindest im HOOKE'schen Bereich geeignete, auf theoretischem Hintergrund basierende, und für Membranwerkstoffe anerkannte, Prüfverfahren dar. Sie sind versuchstechnisch wenig geeignet, den gesamten Fließbereich bis zum Bruch abzubilden. Hierauf wird in Kapitel 4.3 noch genauer eingegangen.

### 4.1.2 Einflussgrößen

Bei Annahme konstanter Fertigungs- und Geometriebedingungen des Probekörpers und ohne Medieneinflüsse sind die an Kunststoffen ermittelten Spannungs-Dehnungsbeziehungen für die jeweilige Beanspruchungsart prinzipiell von den Parametern Zeit, Temperatur, und Belastung abhängig. Sie äußern sich beispielsweise in den hieraus abgeleiteten Parametern der Dehngeschwindigkeit, der Beanspruchungsdauer und der Beanspruchungsgeschichte. In der Literatur (z.B. EHRENSTEIN 1999 [51]) ist der wichtige Hinweis zu finden, dass das mechanische Verhalten von Polymerwerkstoffen zudem von der Luftfeuchtigkeit abhängen kann.

### 4.1.3 Prüfmethoden

Primäres Ordnungsmerkmal der mechanischen Prüfung ist die Unterscheidung zwischen zerstörender und zerstörungsfreier Werkstoffprüfung [66]. Weitere Unterscheidungsmerkmale sind die Geschwindigkeit der Versuchsdurchführung (Unterscheidung nach statischen und dynamischen Beanspruchungen), die Art der Beanspruchung (Zug-, Druck-, Biege-, Torsions- und Scherbeanspruchung), der erzeugte Spannungs-Dehnungszustand (einachsiger, ebener oder räumlicher Spannungszustand) sowie die jeweilige Steuerung (kraft-, weg- oder dehngeschwindigkeitsgesteuert). Neben den mechanischen Methoden gibt es z.B. optische oder elektrische Methoden, die ebenfalls Aussagen über mechanische Eigenschaften ermöglichen.

Bei den hier vorgestellten Versuchen handelt es sich in erster Linie um einachsige oder zweiachsige, mechanische, statische, zerstörende Zugversuche an Laborprobekörpern aus ETFE-Folie. Die Zerstörung erfolgt durch Bruchversagen oder - im Sinne einer nicht möglichen Wiederverwendung - durch jede Art von Verformung, da auch die Belastungsgeschichte bei viskoelastischen Werkstoffen einen Einfluss auf die Ergebnisse hat oder zumindest haben kann. DMA-Versuche (Dynamisch-Thermisch-Mechanische Analyse) ergänzen die Prüfungen.

Entsprechend den Ausführungen in Anhang D - Grundlagen der Werkstoffmechanik - führen die Kraft- und die Wegsteuerung zu veränderlichen Dehngeschwindigkeiten im Probekörper und mit zunehmender Dehnung zu ansteigenden Differenzen zum "wahren" Werkstoffverhalten. Ergebnisse aus Versuchen unter monoaxialer und biaxialer Belastung, mit einachsigen und mehrachsigen ebenen Spannungszuständen, bei gleicher und über die verschiedenen Dehnungsbereiche konstant gehaltener Dehngeschwindigkeit, liegen für ETFE-Folien bislang nicht vor. Die vorliegende Arbeit zeigt aber, dass die Dehngeschwindigkeit bei ETFE-Folien auch bei statischen Kurzzeitzugversuchen einen Einfluss hat.

Neben monoaxialen werden zunehmend biaxiale Kurzzeitzugversuche im Membranbau durchgeführt. Auch haben sich mittlerweile biaxiale Kurzzeitzugversuche mit zyklisch aufgebrachtter Belastung etabliert, da sie das komplexe nichtlineare Verhalten von Geweben und Folien beim Be- und Entlasten (Hysterese) am besten wiedergeben. Bei Folien ermöglicht die zyklische Laststeigerung die Bestimmung der Fließgrenze (z.B. als 0,2%-Dehngrenze) über die nach der jeweiligen Entlastung verbleibende Restdehnung. Bereits 1975 wurden im Rahmen des Sonderforschungsbereiches (SFB) 64, Universität Stuttgart, von REINHARDT Ergebnisse zyklischer biaxialer Versuche an ebenen geschlitzten Kreuzproben an Geweben an der von LOSCH entwickelten Prüfmaschine vorgestellt (s. Reinhardt, 1975 [151]).

## **Dynamische Prüfungen**

Dynamische Prüfungen dienen der Simulation von schlag-, stoß- oder schwingungsartigen Beanspruchungen mit Dehngeschwindigkeiten über 10 Prozent pro Sekunde (600 %/min). Die Versuchsdauer beträgt weniger als eine Minute. Die Ergebnisse sind stark abhängig von der Geschwindigkeit bzw. der Frequenz der Beanspruchung. Nach dem Kriterium der Dehngeschwindigkeit müssen auch Versuche zur Bestimmung des Widerstandes gegen simulierten Hagelschlag oder auch zur Bestimmung der Durchsturzsicherheit zu den dynamischen Prüfverfahren gezählt werden. Der Hagelschlagversuch ist jedoch nicht als Tragfähigkeits- sondern im weiteren Sinn als Gebrauchstauglichkeitskriterium zu werten. Bei diesem Versuch wird die Schädigungsenergie mit definierten Simulationsgeschossen gemessen und mit der Schädigungsenergie der örtlich zu erwartenden Hagelschlagszenarien verglichen. Da Hagelschlag - wie alle Einwirkungen – eine statistische Größe ist, ist vom Bauherrn bzw. seiner Versicherung zu entscheiden, ob das aus den Simulationen abschätzbare Restrisiko tragbar ist. Der Nachweis der Durchsturzsicherheit nach den Anforderungen der Landesbauordnungen und den Grundsätzen der Berufsgenossenschaften Bau (z.B. GS Bau 18) ist weder ein Kriterium der Gebrauchstauglichkeit noch der Tragfähigkeit. Er dient der Arbeitssicherheit der am Bau beteiligten Arbeitskräfte und ggf. des Wartungs- und Reinigungspersonals.

## **Statische und quasistatische Prüfungen**

Quasistatische Prüfungen sind Versuche mit Dehngeschwindigkeiten unter 10 Prozent pro Sekunde bzw. mit einer Versuchsdauer von mindestens einer Minute. Bei diesen Prüfungen ist eine Abhängigkeit der Ergebnisse von der Beanspruchungsgeschwindigkeit deutlich kleiner, als bei den dynamischen Prüfungen. Zu den quasistatischen Versuchen zählen beispielsweise monoaxiale und biaxiale Zugversuche und Weiterreißversuche.

GRELLMANN 2005 [66] differenziert in Bezug auf die Dehngeschwindigkeit noch eine dritte Gruppe innerhalb der quasistatischen Prüfungen, die statischen Prüfungen, mit Dehngeschwindigkeiten unter 0,01 Prozent pro Sekunde (0,6 %/min). Zu ihnen zählen alle Langzeitprüfungen, so auch Retardationsversuche (Kriechversuche) und Relaxationsversuche, also die Zunahme der Dehnung unter einer konstanten Last bzw. die Abnahme der Spannung bei einer konstanten Dehnung. Es wird hierbei impliziert, dass die Lastaufbringung im Retardationsversuch bzw. die Dehnungsaufbringung im Relaxationsversuch definiert und schnell erfolgt und die Ergebnisse unabhängig von diesen beiden Vorgängen sind.

### **4.2 Übersicht über die ausgewerteten Versuche**

Tab. 4.1 enthält die in der vorliegenden Arbeit ausgewerteten Versuche. Es wurden monoaxiale Kurzzeitzugversuche, biaxiale Kurzzeitzugversuche, DMA-Versuche und ein Berstversuch ausgewertet.

#### **Monoaxiale Kurzzeitzugversuche (Kapitel 4.3)**

In Kapitel 4.3.1 wird die Durchführung der monoaxialen Kurzzeitzugversuche nach DIN EN ISO 527 Teil 1 [N22] und Teil 3 [N23] beschrieben. Es werden die Möglichkeiten der Fließgrenzenbestimmung, die Unterscheidung des Sekanten- und des Tangentenmoduls, sowie die vorgegeben Probengeometrien und Prüfgeschwindigkeiten erläutert.

Kapitel 4.3.2 beinhaltet die Auswertung von Daten des Folienherstellers<sup>®</sup> NOWOFOL, die mit der Prüfmaschine ZWICK Z 100 im Labor des Herstellers an der Folie<sup>®</sup> NOWOFLON ET 6235 monoaxial gemessen und elektronisch aufgezeichnet wurden. Die Auswertung dient der Untersuchung des Einflusses der Foliendicke auf die Bruchspannung, die Bruchdehnung und die Spannung bei 10 % Dehnung. Weitere Daten liefern Hinweise auf den Einfluss der Probengeometrie und der Prüfgeschwindigkeit auf die Messergebnisse. Die Auswertung dieser Daten dient der Untersuchung des Einflusses dieser beiden Parameter auf die Spannung bei 2 % Dehnung und auf den Sekantenmodul bis zur Proportionalitätsgrenze.

Kapitel 4.3.3 beinhaltet die Auswertung selbst durchgeführter Kurzzeitzugversuche an demselben Material unter den gleichen Prüfbedingungen, ebenfalls durchgeführt im Labor des Herstellers. Die Auswertung dient der Feststellung der Streuungen.

In Kapitel 4.3.4 wird mittels FE-Simulationen der Einfluss des Verhältnisses der Probenbreite  $b_0$  zur Probenlänge  $l_0$  untersucht.

#### **Biaxiale Kurzzeitzugversuche (Kapitel 4.4)**

Die hier ausgewerteten biaxialen Kurzzeitzugversuche wurden mit der Folie<sup>®</sup> ASAHI FLUON NJ 250  $\mu\text{m}$  im Labor des konstruktiven Ingenieurbaus, Fachbereich 10 – Bauwesen, der Universität Duisburg-Essen, unter der Leitung von Herrn Dipl.-Ing. Klaus SAXE durchgeführt. Die Prüfmaschine ist ein Eigenbau, dessen Anwendungsgebiet und Leistungsfähigkeit von SAXE und BAIER 1998 [163] sowie von SAXE und KOENEN 1991 [164] in der Literatur beschrieben wird.

Das Unternehmen Covertex hat anlässlich des Projektes AWD Arena in Hannover das o.g. Labor beauftragt, Versuche durchzuführen, so auch die hier ausgewerteten biaxialen Kurzzeitzugversuche. Das Ingenieurbüro ENGINEERING + DESIGN, LINKE und MORITZ GbR wurde von Covertex beauftragt, die vom Labor ermittelten Rohdaten auszuwerten, die statischen Berechnungen und Nachweise zu erbringen und das Projekt wissenschaftlich zu begleiten. Erbracht hat diese Leistungen der Verfasser. Sie bilden den Hintergrund für die in Kapitel 4.4 neu dargestellten und ausgewerteten Versuchsergebnisse und die daraus hergeleiteten Erkenntnisse. Dies beinhaltet insbesondere die Einflüsse aus Temperatur und der aus der Prüfgeschwindigkeit abgeleiteten Dehngeschwindigkeit auf die Spannungs-Dehnungsbeziehung und die Werkstoffkenngrößen und Kennwertfunktionen des E-Moduls, des Schubmoduls (der Querkontraktionszahl) und der Fließspannung. Erst die Separierung der einzelnen Einflüsse bildet die Grundlage zur Entwicklung eines systematischen Prüfprogramms – letztlich mit den beiden Zielen der Formulierung eines allgemeinen Werkstoffgesetzes und der Herleitung eines probabilistischen Bemessungskonzeptes für ETFE-Folienkonstruktionen.

#### **DMA-Versuche (Kapitel 4.5)**

Das Unternehmen<sup>®</sup> DYNEON hat auf Anfrage Dynamisch-Mechanisch-Thermische Versuche an Probekörpern aus ETFE-Granulat<sup>®</sup> DYNEON ET 6235 durchgeführt und die Messdaten für diese Arbeit zur Verfügung gestellt. Die Ergebnisse der bei verschiedenen Frequenzen durchgeführten Versuche bei ansteigender Temperatur sind in Kapitel 4.5 dargestellt. Sie dienen hier der Ermittlung des E-Moduls in Abhängigkeit von den Parametern Dehngeschwindigkeit und Temperatur und sollen weitere Erkenntnisse zur Ermittlung der Zeit-Temperatur-Verschiebung des Werkstoffes liefern.

**Berstversuche (Kapitel 4.6)**

Im Jahr 2003 wurde von BAUER und STEIGENBERGER ein Berstversuch an einem aus <sup>®</sup>NOWOFLO ET 6235 gefertigten 2-Lagen-Pneu (3,0 x 5,8 m) auf dem Werksgelände des Unternehmens SKYSPAN durchgeführt und die Messdaten für diese Arbeit zur Verfügung gestellt. Die Auswertung der Messdaten dient der Bestimmung der Fließgrenze und der Bruchgrenze (Spannungen und Dehnungen) am 1:1 Modell, d.h. unter Berücksichtigung der Schweißnähte. Die anschließende Nachrechnung der im Berstversuch gemessenen Maximalstiche mit einem FE-Programm soll Aufschluss darüber geben, in wie weit die in Kapitel 4.4 biaxial gemessenen Steifigkeiten mit der Realität übereinstimmen.

Tab. 4.1 enthält eine Übersicht über die ausgewerteten Versuche.

Versuche	Kapitel	Prüfinstitut / Prüfer / Datum / Projekt (Probennummern)	Material	Probenart	Folien-dicke [µm]	Proben-anzahl
Kurzzeit-zug-versuche, monoaxial	4.3	<sup>®</sup> NOWOFOL / Herstellerangaben	<sup>®</sup> NOWOFLO ET 6235	Streifenproben b = 15 mm / b/l = unterschiedlich, T = +23°C	50 - 250	k.A. / 12
		<sup>®</sup> NOWOFOL / ABSTREITER, GRÜTZMANN, MORITZ / 2000	<sup>®</sup> NOWOFLO ET 6235	Streifenproben b = 15 mm, T = +23°C	100 - 250	123
Kurzzeit-zug-versuche, biaxial	4.4	Univ. Duisburg-Essen / SAXE, et. al. / 2004 / AWD Arena Hannover (COV 334 – COV 734, COV 454 – COV 654, COV 364 – COV 764, COV 154 – COV 354)	<sup>®</sup> ASAHI ET FLUON NJ	Kreuzproben Spannungs-verhältnis 3:1, 4 Temperaturen	250	16
		Univ. Duisburg-Essen / SAXE, et. al. / 2004 / AWD Arena Hannover (COV 144)	<sup>®</sup> ASAHI ET FLUON NJ	Kreuzprobe Spannungs-verhältnis 3:1, T = +23°C, 3 Geschwindigkeiten	250	1
DMA-Versuche	4.5	<sup>®</sup> DYNEON / FRIEDRICH et. al. / 2006	<sup>®</sup> NOWOFLO ET 6235	Zugschwing-versuche, T = 0 – 100°C, 3 Frequenzen f = 1, 10 u. 100 Hz	prisma-tische Prüfkörper b/d/l = 1/2/40 mm	3
Berst-versuche	4.6	SKYSPAN Europe / STEIGENBERGER, BAUER et. al. / 2003	<sup>®</sup> NOWOFLO ET 6235	2-Lagen-Pneu 3,0 m x 5,8 m, T = +2°C	250	1

Tab. 4.1 Übersicht über die ausgewerteten Versuche

## 4.3 Monoaxiale Kurzzeitzugversuche

### 4.3.1 Prüfverfahren nach DIN EN ISO 527

Monoaxiale Kurzzeitzugversuche gehören zu den quasistatischen Prüfverfahren. Die Belastung erfolgt zügig (aber nicht extrem schnell), stoßfrei und i.d.R. stetig ansteigend bis zum Bruch. Die bei diesen Versuchen benutzten Universalprüfmaschinen (s. Abb. 4.1) erlauben geregelte mechanische Prüfungen, Messungen, Datenauswertung und Ergebnisdarstellung. Sie gewährleisten bei konventionell durchgeführten Prüfungen nach DIN EN ISO 527 eine konstante Abzugsgeschwindigkeit der Traverse.

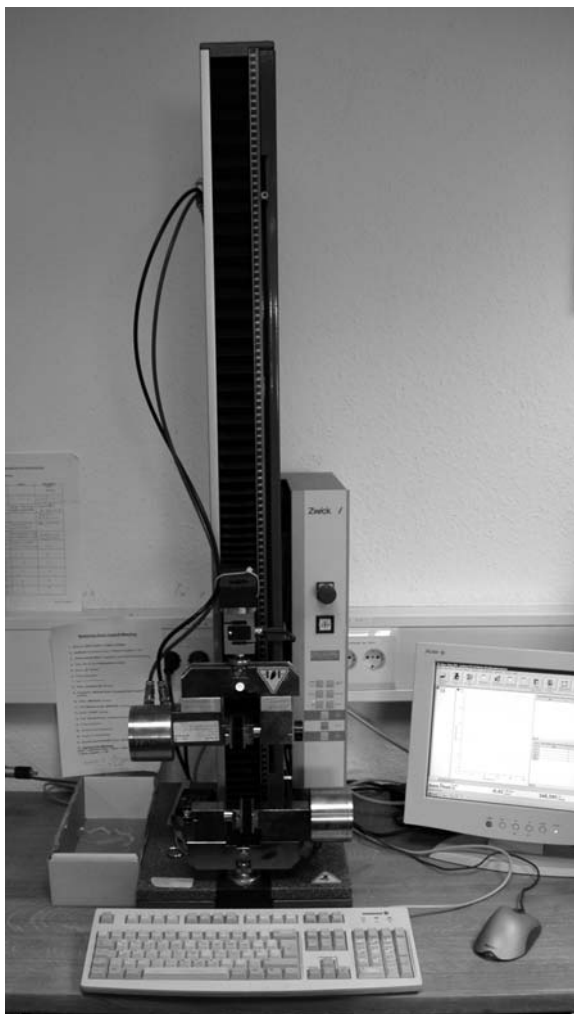


Abb. 4.1 Universalprüfmaschine der Firma <sup>®</sup>ZWICK,  
<sup>®</sup>NOWOFOL, Foto: K. MORITZ, 2006

Unter diesen Bedingungen können die Versuche für die Ermittlung von Werkstoffkennwerten und Kennwertfunktionen, die Qualitätssicherung, die Schadensfallanalyse, die Vorauswahl von Kunststoffen für definierte Einsatzfälle und für die Lösung einfacher konstruktiver Aufgaben herangezogen werden [66].

Bei ETFE-Folien werden Monoaxialversuche für die Ermittlung von Spannungs-Dehnungs-Kennlinien, der Kennwerte E-Modul (Zugmodul), Bruchdehnung, Bruchspannung, Streckdehnung und Streckspannung, sowie der bei Kunststoffen ohne ausgeprägte Streckgrenze verwendeten Spannung bei einer Dehnung von 10 % eingesetzt. Die Bestimmung der Zugeigenschaften erfolgte bis 1996 nach DIN 53 354:1981 - Prüfung von Kunstleder [N7], anschließend nach DIN 53 455:1988 - Prüfung von Kunststoffen - Zugversuch [N9] und derzeit nach DIN EN ISO 527-1:1996 - Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften: Allgemeine Grundsätze [N22] sowie nach DIN EN ISO 527-3:2003 – Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften: Prüfbedingungen für Folien und Tafeln [N23]. Die Normenreihe gilt für Formmassen, Tafeln und Folien aus Kunststoff (in den USA: ASTM D 882).

DIN EN ISO 527-1:1996-04 [N22] zeigt typische Spannungs-Dehnungs-Diagramme und Kenngrößen für monoaxial gezogene Kunststoffe (s. Abb. 4.2). Darin werden spröde Werkstoffe (Kurve a), zähe Werkstoffe mit Streckpunkt ( $\sigma_B \geq \sigma_y$ ) (Kurve b), zähe Werkstoffe mit Streckpunkt ( $\sigma_B < \sigma_y$ ) (Kurve c), und zähe Werkstoffe ohne ausgeprägten Streckpunkt (Kurve d) unterschieden.



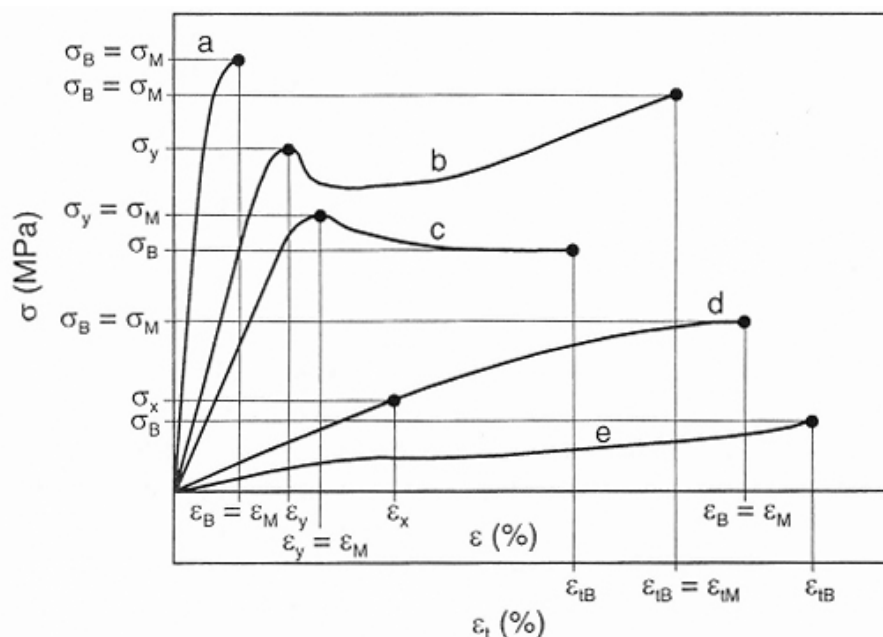


Abb. 4.2 Spannungs-Dehnungs-Diagramme und Kenngrößen verschiedener Kunststoffe: spröde Werkstoffe (Kurve a), zähe Werkstoffe mit Streckpunkt (b) und (c), zähe Werkstoffe ohne Streckpunkt (d) und elastomere Werkstoffe (e); DIN EN ISO 527-1:1996 [N22]

Es werden die folgenden charakteristischen Punkte der Kennlinien definiert:

**Streckgrenze:**  $\sigma_y, \epsilon_y$ , definiert über den ersten Spannungswert, bei dem ein Zuwachs der Dehnung ohne Steigerung der Spannung auftritt. Sie kann über den Anstieg der Spannungs-Dehnungs-Linie ermittelt werden (horizontale Tangente der Kennlinie,  $d\sigma / d\epsilon = 0$ ).

**Bruchgrenze:**  $\sigma_B, \epsilon_B$ , definiert über die Spannung beim Bruch des Probekörpers

**Zugfestigkeit:**  $\sigma_M, \epsilon_M$ , definiert über die maximale Zugspannung, die während des Versuchs registriert wird.

Für die Auswertung der Versuche, bei denen die Kraft  $F$  und die Dehnung  $\epsilon$  gemessen werden, sind Spannung  $\sigma$  bzw. Dehnung  $\epsilon$  als technische Größen definiert, d.h. auf den Ausgangsquerschnitt  $A_0$  bzw. die Ausgangslänge  $l_0$  bezogen:

$$\sigma = F/A_0 \quad (4.1)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (4.2)$$

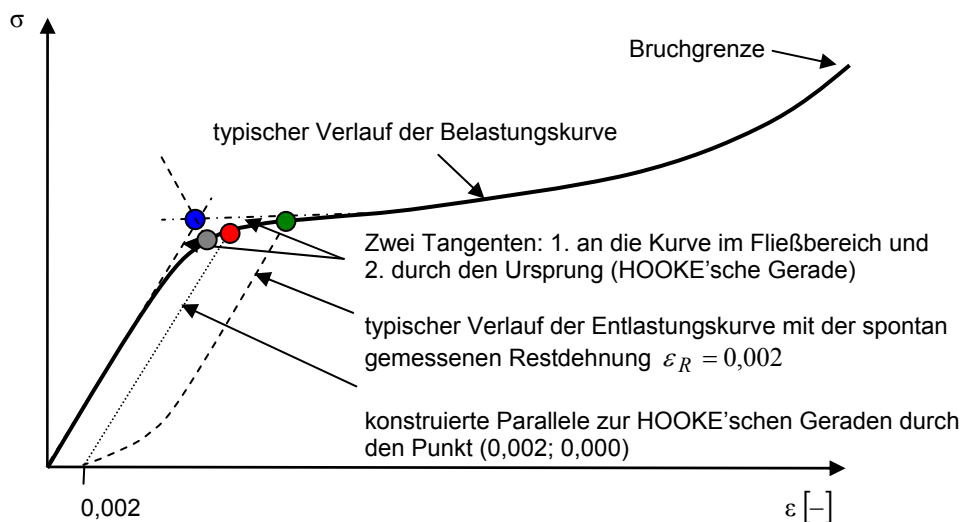
Im monoaxialen Kurzzeitzugversuch beanspruchte ETFE-Folien lassen sich für bestimmte Dehngeschwindigkeiten und Temperaturen näherungsweise der Kurve b zuordnen - jedoch mit der Einschränkung, dass die Spannung oberhalb der Streckgrenze i.d.R. nicht abfällt, sondern nach einem flachen, nicht immer horizontalen Bereich, monoton bis zum Bruch ansteigt. Der in Anhang D, Kap. D 4.2 (Abb. D 16) beschriebene Teleskopeffekt ist selten zu beobachten.

Im biaxialen Kurzzeitzugversuch, insbesondere bei hoher Temperatur und/oder geringer Dehngeschwindigkeit ist die Streckgrenze der ETFE-Folie nicht ausgeprägt, so dass die Kennlinie dann eher eine Ähnlichkeit zu Kurve d aufweist. Desgleichen ist auch bei monoaxialen Versuchen bei hohen Temperaturen und/oder geringen Dehngeschwindigkeiten zu erwarten. In jedem Fall sind ETFE-Folien im Gebrauchstemperaturbereich bis zur Fließ- bzw. Streckgrenze den duktilen (zähen) Werkstoffen zuzuordnen. Dies gilt nicht für den Fließbereich.

### Fließgrenze

Entsprechend den Ausführungen in Anhang D, Kap. D 4.2, wird für metallische Werkstoffe ohne ausgeprägte Streckgrenze die 0,2 %-Dehngrenze als Fließgrenze angesetzt. Sie wird, wie dort beschrieben, als Parallele zur HOOKE'schen Geraden durch den Spannungs-Dehnungspunkt  $\sigma = 0 \text{ N/mm}^2$ ;  $\varepsilon = 0,2 \%$  konstruiert.

Diese Vorgehensweise basiert auf der Annahme, dass die Entlastungsgerade mit derselben Steigung erfolgt, wie die Belastungsgerade, so dass eine verbleibende Restdehnung von  $\varepsilon_R = 0,2 \%$  erwartet werden darf. Diese Annahme ist für viele Metallwerkstoffe wohl auch in etwa zutreffend. Viskoelastische Werkstoffe, so auch ETFE-Folie, mit zeitabhängig reversiblen und irreversiblen Dehnungsanteilen, weisen aber eine nichtlineare Entlastungsgerade auf, wenn sie aus dem viskoelastischen oder viskosen Dehnungsbereich entlastet werden. Die konstruktive Ermittlung würde in diesem Fall also einen konservativen Wert der 0,2 %-Dehngrenze liefern (roter Punkt in Abb. 4.3).



4 mögliche Arten der Fließpunktbestimmung

- Tangentenverfahren (COPLAN-Methode)
- Tangentenverfahren (Winkelhalbierende)
- konstruktiv ermittelte 0,2 %-Dehngrenze
- spontan gemessene 0,2 %-Dehngrenze

Abb. 4.3 Typischer Verlauf einer Spannungs-Dehnungs-Kennlinie von ETFE-Folie im monoaxialen Kurzzeitzugversuch, mögliche Fließgrenzendefinitionen

Versuche mit zyklischen Belastungen (mehrfacher Be- und Entlastung) ermöglichen eine genauere Ermittlung der 0,2 %-Dehngrenze über die unmittelbar nach der Entlastung gemessene Restdehnung  $\varepsilon_R = 0,002 [-]$ .

In der vorliegenden Arbeit wird diese Restdehnung als spontan gemessene Restdehnung bezeichnet, da sie nach der Messung, in Abhängigkeit von der Temperatur, der Dehngeschwindigkeit und der Beanspruchungsgeschichte, noch eine gewisse Zeit weiter abnimmt (grüner Punkt in Abb. 4.3).

In der Praxis der Kunststoffprüfung wird alternativ zur 0,2 %-Dehngrenze auch die 0,5 %-Dehngrenze (EHRENSTEIN 1999 [51]) oder das Tangentenverfahren (COPLAN-Verfahren; QUINSON und PEREZ 1997 [147]) zur näherungsweise Ermittlung der Fließgrenze verwendet. Das Tangentenverfahren wird über den Schnittpunkt der HOOKE'schen Geraden (Ursprungstangente) mit der Tangente an die Kurve im Fließbereich definiert. Es liefert geringere Fließdehnungen und - in Abhängigkeit der Kurvensteigung im Fließbereich - geringere oder größere Fließspannungen, als die 0,2 %-Dehngrenze (blauer Punkt in Abb. 4.3). Konstruiert man durch den Schnittpunkt der beiden Tangenten die Winkelhalbierende, so liefert deren Schnittpunkt mit der Spannungs-Dehnungs-Kennlinie eine genauere Definition der Fließgrenze (grauer Punkt in Abb. 4.3). Ein Vorteil dieses genaueren Verfahrens ist, dass die Fließgrenze auf der Kennlinie liegt.

QUINSON und PEREZ 1997 [147] stellen noch ein weiteres Verfahren zur Fließgrenzenbestimmung für amorphe und teilkristalline Thermoplaste vor, das ihren Angaben zufolge den Beginn irreversibler Dehnungsanteile kennzeichnet. Auch dieses Verfahren bedarf der zyklischen Belastung, um die spontane Restdehnung  $\varepsilon_R$  nach der jeweiligen Entlastung zu messen. Abb. 4.4 zeigt das diesbezügliche Diagramm, bei dem die Restdehnung  $\varepsilon_R$  über die im Zyklus zuvor gemessene Maximaldehnung  $\varepsilon_{\max}$  aufgetragen wird.

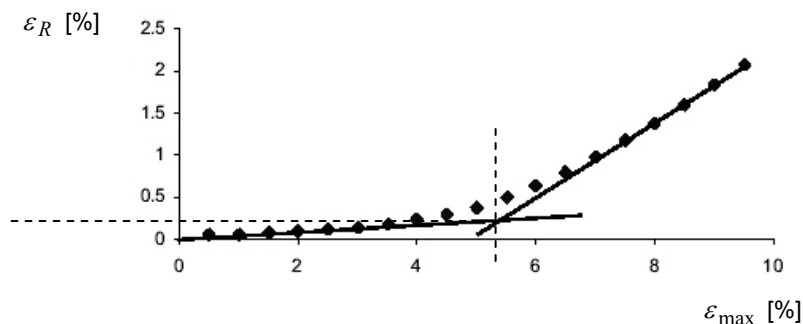


Abb. 4.4 Fließgrenzendefinition über die Restdehnung  $\varepsilon_R$  – Maximaldehnung  $\varepsilon_{\max}$  – Kurve; QUINSON und PEREZ 1997 [147]

Der Schnittpunkt der beiden an die Kurve angetragenen Tangenten kennzeichnet den Übergang zum plastischen Verhalten. Für die untersuchten ETFE-Folien liefert dieses Verfahren eine Fließgrenze, die in etwa mit der (spontan) gemessenen 0,2 %-Dehngrenze ( $\varepsilon_R = 0,2\%$ ) übereinstimmt.

Wenn keine Versuche mit zyklischen Belastungen - mit der Möglichkeit, die spontane Restdehnung zu messen - vorliegen, ist für ETFE-Folie - in Übereinstimmung mit dem Metallbau - die etablierte Definition der Fließgrenze über die konstruktiv ermittelte 0,2 %-Dehngrenze zu empfehlen.

MENGES, HABERSTROH, MICHAELI und SCHMACHTENBERG 2002 [111] nennen ein Verfahren, mit dem der Fließeintritt optisch sichtbar gemacht werden kann. Der Werkstoff verändert mit dem Eintreten des Fließens seine Lichtbrechung, was man durch Interferenzerscheinungen in polarisiertem Licht sehen kann. Die Veränderung der Lichtbrechung wird auf eine Umorientierung der Fibrillen in die beiden Hauptspannungsrichtungen zurückgeführt. Bei inhomogenen Spannungsverteilungen erlaubt dieses Phänomen auch die Unterscheidung von Bereichen, in denen der Werkstoff fließt, von Bereichen, in denen noch keine Fließvorgänge stattfinden.

### E-Modul (Sekanten- und Tangentenmodul)

Entsprechend dem HOOKE'schen Gesetz wird der im Zugversuch ermittelte E-Modul  $E_t$  ( $t =$  tension) nach DIN EN ISO 527-1 definiert. Er wird im Intervall zwischen den (technischen) Dehngrenzen  $\varepsilon_1 = 0,0005$  und  $\varepsilon_2 = 0,0025$  bestimmt:

$$E_t = \frac{(\sigma_2 - \sigma_1)}{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)} \quad (4.3)$$

$$\sigma_1 = \frac{F_1}{A_0}; \sigma_2 = \frac{F_2}{A_0} \quad (4.4)$$

Der E-Modul kann auf den gesamten linearen Dehnungsbereich bezogen werden, unabhängig davon, ob er neben den linear elastischen auch linear viskoelastische Dehnungen beinhaltet (GRELLMANN 2005 [66]). Während der Ursprungsmodul  $E_0$  als Tangentenmodul ( $E_T$ ) bestimmt wird, ist der E-Modul  $E_t$  als Sekantenmodul ( $E_S$ ) definiert (s. Abb. 4.5).

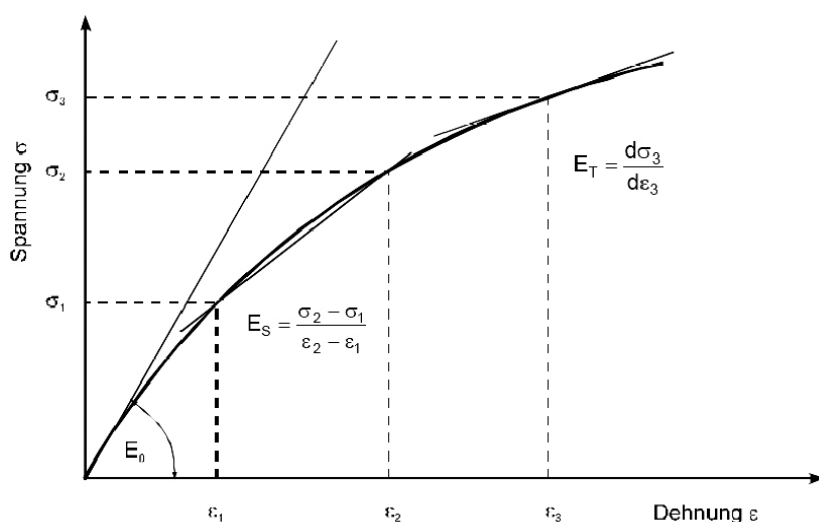
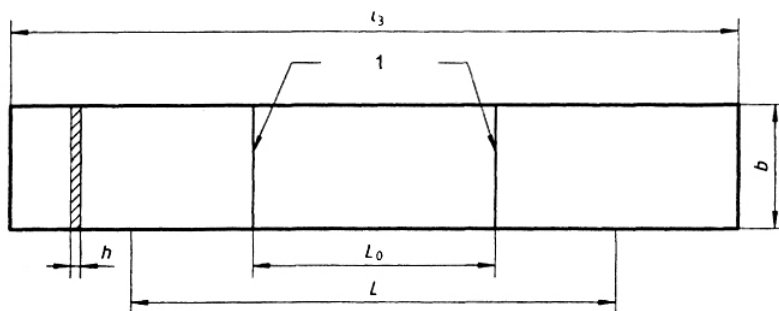


Abb. 4.5 Sekantenmodul  $E_S$ , Tangentenmodul  $E_T$ , Ursprungsmodul  $E_0$ ; GRELLMANN 2005 [66]

Nach DIN EN ISO 527 ist die Prüfgeschwindigkeit bei der Bestimmung des E-Moduls möglichst nahe bei 1 % der Ausgangsmesslänge  $l_0$  pro Minute zu wählen. Bei  $l_0 = 50$  mm ergäbe sich demnach eine Prüfgeschwindigkeit  $v_T = 5$  mm/min, was einer technischen Dehngeschwindigkeit von 1 Prozent pro Minute (bezogen auf die Ausgangslänge) entspräche.

### Probekörpergeometrie

Nach DIN EN ISO 527-3 [N23] ergeben sich vier mögliche Probekörpertypen. In Deutschland durchgeführte Monoaxialversuche an ETFE-Folien werden vornehmlich entsprechend dem Probekörpertyp 2 durchgeführt (s. Abb. 4.6), wie auch in der Norm empfohlen. Schulterproben, wie die nach deutscher Norm definierten Probekörpertypen 4, 1B oder 5 (s. Abb. 4.7), werden jedoch in anderen Ländern auch bei der Folienprüfung verwendet.



#### Legende

- 1 Messmarken
- $b$  Breite: 10 mm bis 25 mm
- $h$  Dicke:  $\leq 1$  mm
- $L_0$  Messlänge:  $50 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$
- $L$  Anfangsabstand der Einspannklemmen:  $100 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$
- $l_3$  Gesamtlänge:  $\geq 150 \text{ mm}$

Abb. 4.6

Probekörpertyp 2 nach DIN EN ISO 527-3:2003-07 [N23]

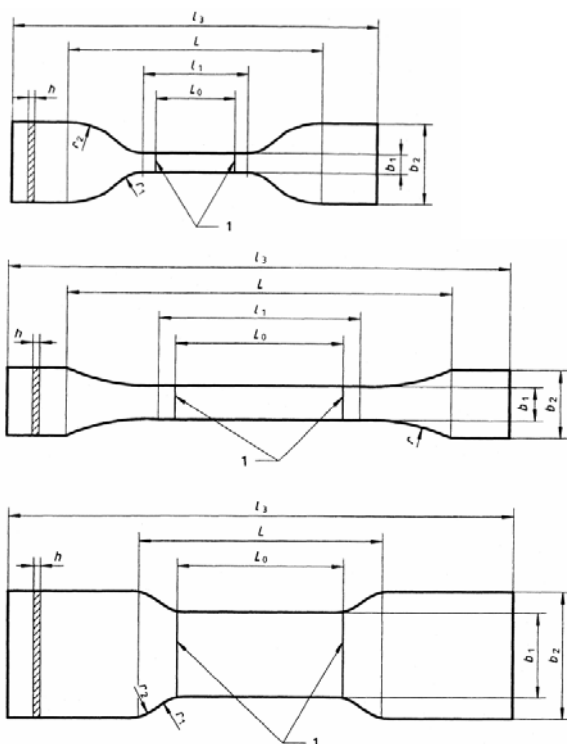


Abb. 4.7

Schulterproben  
(Probekörpertypen 5, 1B und 4 - von oben nach unten - nach DIN EN ISO 527-3:2003-07 [N23]), Legenden / Abmessungen s. Norm

Der Probekörpertyp 2 bietet den Vorteil, dass die geraden Schnittkanten mit dem Schneidwerkzeug (s. Abb.4.8) einfach und ohne große Gefahr von Schädigungen herstellbar sind. (Anm.: Bei den schmalen Proben können selbst kleinste Verletzungen des Randes mit dem Schneidwerkzeug zu erheblichen Reduktionen der Bruchfestigkeit und damit auch zu großen Streuungen führen.)

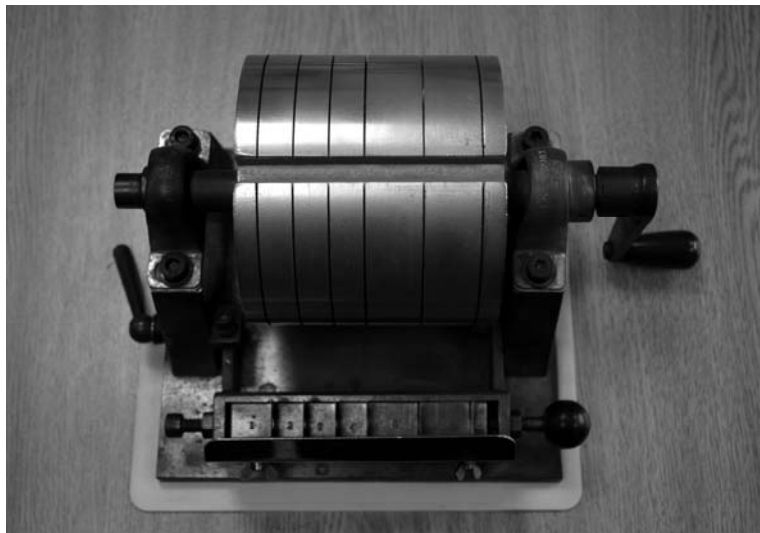


Abb. 4.8

Schneidwerkzeug (Rollmesser) für Streifenproben unterschiedlicher Breite, ©NOWOFOL, Foto: K. MORITZ, 2006

### Prüfgeschwindigkeit

Nach DIN EN ISO 527-1:1996 [N22] werden Kurzzeitzugversuche weggesteuert, mit konstanter Prüfgeschwindigkeit, durchgeführt. Mit Prüfgeschwindigkeit ist hier die Traversengeschwindigkeit  $v_T$  [mm/min] auf der Basis technischer Dehnungen gemeint. Eine konstante Dehngeschwindigkeit [%/min] auf der Basis wahrer Dehnungen (s. Anhang D, Kap. D 5) wird in der Norm nicht gefordert.

Nach Tabelle 1 der Norm soll die Zugprüfmaschine eine Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min bis 500 mm/min mit Grenzabweichungen von  $\pm 20\%$  (1 mm/min bis 10 mm/min) und  $\pm 10\%$  (20 mm/min bis 500 mm/min) einhalten können. Dies ist ein relativ großer Bereich, der jedoch durch DIN EN ISO 10350 [N14] genauer spezifiziert wird. Demnach ist für zäh brechende Kunststoffe mit Bruchdehnungen  $\epsilon_B > 10\%$  eine Prüfgeschwindigkeit von  $v_T = 50$  mm/min und für spröde brechende Kunststoffe mit Bruchdehnungen  $\epsilon_B \leq 10\%$  eine Prüfgeschwindigkeit von  $v_T = 5$  mm/min zu wählen. Der Anwendungsbereich der Norm bezieht sich jedoch auf thermoplastische und duroplastische Kunststoffe, die spritzgegossen, gepresst oder in Form von Platten mit festgelegter Dicke hergestellt werden.

Nach DIN EN ISO 527-1:1996 [N23] Kap. 5 werden Folien üblicherweise mit einer Prüfgeschwindigkeit 5, 50, 100, 200, 300 oder 500 mm/min geprüft. Orientiert man sich an der Definition quasistatischer Versuche (z.B. nach SAECHTLING 2001, S. 105) [158]), ist die Prüfgeschwindigkeit so zu wählen, dass der zu ermittelnde charakteristische Festigkeitswert (wie die Bruch- oder die Streckspannung) etwa nach einer Minute erreicht wird. Bei einer Bruchdehnung von  $\epsilon_B = 400\%$  und einer Probenlänge  $l_0 = 50$  mm würde dies zu einer Prüfgeschwindigkeit  $v_T = 200$  mm/min führen.

### 4.3.2 Auswertung monoaxialer Kurzzeitzugversuche

Die hier ausgewerteten Monoaxialversuche an 15 mm schmalen Streifenproben sollen Aufschluss über den Einfluss der Foliendicke auf die Werkstoffkennwerte geben. Die Daten beziehen sich auf die Folie <sup>®</sup>NOWOFLON ET 6235 des Herstellers <sup>®</sup>NOWOFOL. Früher wurde die Folie auch vom Unternehmen <sup>®</sup>HOECHST (heute <sup>®</sup>DYNEON) unter der Bezeichnung <sup>®</sup>HOSTAFLOX ET 6235 mit dem gleich lautenden Granulat (heute <sup>®</sup>DYNEON ET 6235) hergestellt. Beide Folien sind nach Herstellerangaben identisch.

Eigenschaft		Zugfestigkeit $\sigma_B$	Bruchdehnung $\epsilon_B$	Spannung bei 10 % Dehnung $\sigma_{\epsilon=0,1}$	Weiterreißwiderstand* $F_{max}$
Prüfnorm		DIN 53 455	DIN 53 455	DIN 53 455	DIN 53 363
Nennstärke	Prüfrichtung	N/mm <sup>2</sup>	%	N/mm <sup>2</sup>	N/mm
50 $\mu\text{m}$	E	64	450	23	450
	Q	56	500	22	450
80 $\mu\text{m}$	E	58	500	23	450
	Q	54	600	21	450
100 $\mu\text{m}$	E	57	500	23	450
	Q	55	600	22	430
150 $\mu\text{m}$	E	58	600	22	450
	Q	57	650	22	430
200 $\mu\text{m}$	E	52	600	21	430
	Q	52	600	21	430
225 $\mu\text{m}$	E	52	600	21	430
	Q	52	600	21	430
250 $\mu\text{m}$	E	52	700	20	440
	Q	52	700	20	440

Tab. 4.2 Mittelwerte aus monoaxialen Zugversuchen, Prüfparameter:  $b = 15 \text{ mm}$ ,  $l_0 = 50 \text{ mm}$ ,  $T = 23^\circ\text{C}$ ,  $v_T = 200\%/min$ ,  $d = 50 \text{ bis } 250 \mu\text{m}$ ; <sup>®</sup>NOWOFLON ET 6235, transparent Herstellerdaten <sup>®</sup>NOWOFOL [77] \* Weiterreißwiderstand an trapezförmigen Proben mit Einschnitt (s. Kap. 4.7)

In Tab. 4.2 sind den Herstellerdatenblättern für diese Folie entnommene Angaben zu den charakteristischen Folienkennwerten (Mittelwerte) der Zugfestigkeit (Bruchspannung), der Bruchdehnung, der Spannung bei 10 % Dehnung und des Weiterreißwiderstandes dargestellt [77].

## Einfluss der Foliendicke

Der Tabelle ist zu entnehmen, dass im Mittel die Zugfestigkeit, die Spannung bei einer Dehnung von 10 % und die Weiterreißfestigkeit mit der Foliendicke abnehmen. Die Bruchdehnung nimmt hingegen im Mittel zu.

Die Kennwerte aus den monoaxialen Kurzzeitzugversuchen verhalten sich für Materialdicken ab 200  $\mu\text{m}$  isotrop oder zumindest orthotrop\*. Dünnere Folien sind in Extrusionsrichtung scheinbar fester. Damit wird allerdings nicht gezeigt, dass der Extrusionsprozess (die Änderung der Schlitzdicke) eine Ausrichtung der Kettenmoleküle bewirkt, da sich die o.g. Spannungen als technisch definierte Größen auf den unverformten Ausgangsquerschnitt beziehen. Da die Bruchdehnungen mit zunehmender Foliendicke von 450 % (Foliendicke 50  $\mu\text{m}$ ) auf 700 % (Foliendicke 250  $\mu\text{m}$ ) ansteigen, verändert sich auch der verformte Querschnitt in Probenmitte (am Versagensort) mit der Foliendicke. Daher wäre es durchaus denkbar, dass die wahren Spannungen (bezogen auf den verformten Querschnitt) in Probenmitte für dünne und dicke Folien trotz unterschiedlicher tabellarischer Werte identisch sind.

## Strukturänderungen

Grundlage der o.g. Tabellenwerte sind Spannungs-Dehnungs-Messkurven, die häufig in Mehrfachdiagrammen zusammengefasst werden, wie in Abb. 4.9 dargestellt. Zur Auswertung werden die Kurven rechnerisch in den Ursprung verschoben. Die Bruchgrenze (Bruchspannung und Bruchdehnung) sowie zwei markante Steifigkeitsänderungen (Knickpunkte der Kennlinie) sind darin ablesbar.

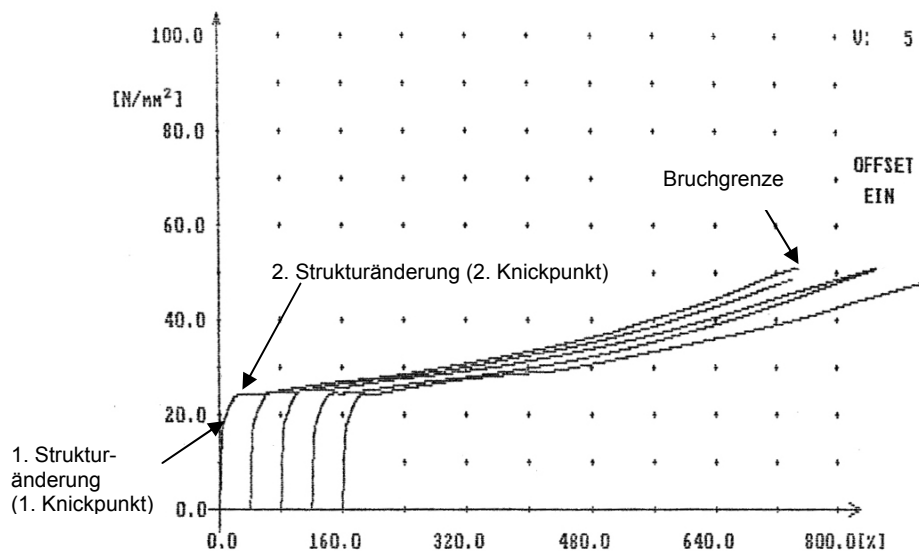


Abb. 4.9 Spannungs-Dehnungs-Messkurven, zusammengefasst in einem Mehrfachdiagramm, monoaxialer Zugversuch nach DIN 53 455 (heute DIN EN ISO 527:2003-07 [N23])  
 ®NOWOFLON ET 6235 -250  $\mu\text{m}$ ; K. MORITZ 2000 [131]

\* DE VRIES 2003 [40] (Appendix B2) stellt Ergebnisse monoaxialer Prüfungen an Probekörpern in Extrusions-, Quer- und Diagonalrichtung (45°) vor (je Entnahmerichtung 5 Proben, ®NOWOFLON ET 6235, transparent,  $d = 200 \mu\text{m}$ ). Die Schwankungsbreiten der Steifigkeit, der Spannung und der Dehnung an der Proportionalitätsgrenze waren innerhalb jeder der drei Gruppen größer, als die Unterschiede, bedingt durch die Entnahmerichtung. Dies deutet eher auf näherungsweise isotropes als auf orthotropes Verhalten hin.



Abb. 4.10 zeigt den Anfangsbereich einer derartigen Messung als Kraft-Weg-Diagramm. Der Ausschnitt veranschaulicht die Steifigkeitsänderung am ersten Knickpunkt. Die Kraft entspricht dort einer Spannung von  $\sigma \cong 16-17 \text{ N/mm}^2$ . Die Steifigkeitsänderung deutet auf eine Änderung im strukturellen Aufbau der Folie hin, der bei rein elastisch-plastischer Materialbeschreibung als Fließbeginn gedeutet werden kann, obwohl hier die Streckgrenze, also eine horizontale Tangente der Spannungs-Dehnungskurve, nicht erreicht wird. Die Steigung wird bei den monoaxialen Versuchen ( $T = +23^\circ\text{C}$ ;  $V_T = 100 \text{ mm/min}$ ) erst beim zweiten Knickpunkt ( $\sigma \cong 24-25 \text{ N/mm}^2$ ) in etwa Null. Eine horizontale Tangente würde der technischen Definition der Streckgrenze entsprechen.

Abweichend von der elastisch-plastischen Materialbeschreibung setzt sich die Gesamtverformung bei viskoelastischen Polymerwerkstoffen aus den drei Anteilen der elastischen, der viskoelastischen (auch relaxierend genannten) und der viskosen Dehnung zusammen. In Ermangelung der sich überlagernden Dehnungsanteile werden der Dehnungsbereich bis zum ersten Knickpunkt näherungsweise als überwiegend elastisch, zwischen dem ersten und dem zweiten Knickpunkt als überwiegend relaxierend (mit viskoelastischen, also zeitabhängig reversiblen Dehnungen) und oberhalb des zweiten Knickpunktes als überwiegend viskos (mit irreversiblen zeitabhängigen Dehnungen) aufgefasst.

Von Seite der Hersteller wird statt der Fließ- oder der Streckgrenze grundsätzlich die Spannung bei einer Dehnung von 10 % angegeben. Dieser Wert ist immer eindeutig messbar. Er liegt bei den Versuchen zwischen den beiden o.g. Knickpunkten bei etwa  $\sigma_{\varepsilon=0,1} \cong 20-21 \text{ N/mm}^2$ .

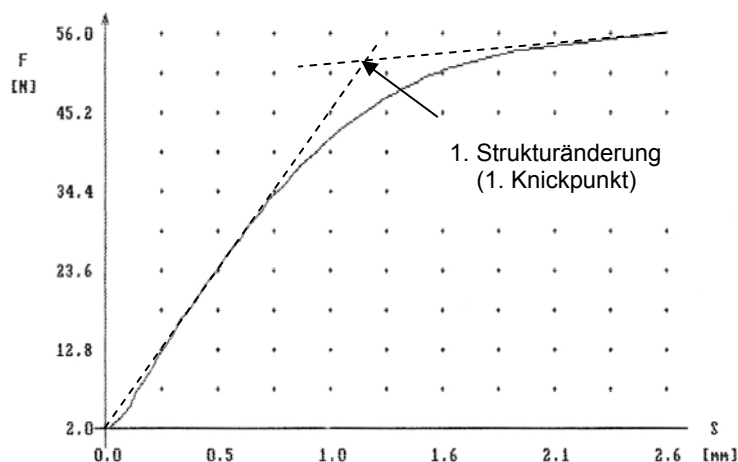


Abb. 4.10

Kraft-Weg-Diagramm bis zur ersten Strukturänderung (1. "Knickpunkt"), monoaxialer Zugversuch nach DIN 53 455 (heute DIN EN ISO 527-3:2003-07 [N23])<sup>®</sup> NOWOFLON ET 6235 - 250  $\mu\text{m}$ ; K. MORITZ 2000 [131]

## Dicken- und Gewichtsangaben

Materialeigenschaften sind statistisch verteilte Größen, so auch das Flächengewicht ( $\text{g/m}^2$ ) und die Foliendicke ( $\mu\text{m}$ ). Beide Parameter werden maßgeblich durch den Extrusionsprozess bestimmt.

Das Flächengewicht kann beispielsweise nach DIN EN ISO 2286-2 [N17] an 100 x 100 mm großen Proben ermittelt werden. Es schwankt aufgrund lokal begrenzter Unebenheiten und kann nach Herstellerangaben eine Toleranz bis etwa  $\pm 6\%$  aufweisen [141].

Die Foliendicke kann durch mechanische Abtastung nach DIN 53370 [N25] oder durch (optische) berührungslose Messverfahren, z.B. mit kapazitiven Abstandssensoren, laseroptischen Triangulationssensoren,  $\beta$ -Strahlern (Kryptonquelle) oder mit Seilzug-Wegsensoren auf Potentiometer- oder Encoderbasis, aufgenommen werden (s. Abb. 4.11). Sie schwankt aufgrund von Prozess- und vermutlich seltener aufgrund von Dichteunterschieden, und kann nach Herstellerangaben eine Toleranz von maximal  $\pm 10\%$  aufweisen [77].



Abb. 4.11

Dickenmessung an ETFE-Folien mit berührungslosem, optischem Messverfahren ( $\beta$ -Strahler), Foto: ©NOWOFOL, 2006

Die Dickenklassifizierung erfolgt bei ETFE-Folien nach der Nenndicke (kein Mittelwert) und nicht nach der Mindestdicke. Die verarbeitenden Konfektionäre sichern sich i.d.R. durch Spezifikation gegen unerwünschte Materialschwankungen (z.B. Minderdicken) ab. Ihre Spezifikationen beinhalten i.d.R. Grenzwerte der Dicke, der Festigkeiten, der Dichte und ggf. der erforderlichen Dehngrenzen. Die Einhaltung der Spezifikationen wird durch ein Werksprüfzeugnis des Herstellers gemäß DIN EN 10204 [N13] nachgewiesen. Es sei angemerkt, dass sich die aus der Prüflast und dem Ausgangsquerschnitt errechneten Spannungswerte prinzipiell auf die Nenndicke (Herstellerangaben) beziehen, und nicht auf die dünnste Stelle des 15 mm breiten Folienstreifens. Daher beinhaltet der Variationskoeffizient der Bruchspannung stets die überlagerte Streuung aus Werkstoff-Inhomogenitäten und Dickenschwankungen.

### Probenabmessungen und Prüfgeschwindigkeit

Bei der Prüfung von Kunststoff-Folien für Membrankonstruktionen wurden zunehmend auch monoaxiale Zugversuche mit breiteren Probenstreifen (50 mm, 100 mm, 200 mm, ggf. auch 1.000 mm) durchgeführt, mit dem Ziel das Verhalten der Flächenbauteile genauer zu erfassen. Derartige Probekörperbreiten wurden im Membranbau ursprünglich bei der Gewebeprüfung eingesetzt, da 15 mm schmale Streifenproben mit nur wenigen Gewebefäden (z.T. mit Schußbogigkeit) häufig keine brauchbaren Ergebnisse lieferten. Abweichungen von den nach DIN EN ISO 527 definierten Probekörpergeometrien führen jedoch dazu, dass die Messdaten schwerer reproduzierbar und vergleichbar sind. Die Probengeometrie kann bei ETFE-Folien nämlich einen nicht vernachlässigbaren Einfluss auf die Prüfergebnisse haben, denkt man beispielsweise daran, dass man mit einer Veränderung der Probenlänge auch bei gleicher Traversengeschwindigkeit [mm/min] eine andere Dehngeschwindigkeit [%/min] erzeugt.

Im folgenden werden Daten aus Monoaxialversuchen vorgestellt, die vom Hersteller ©NOWOFOL an transparenten Streifenproben der Folie ©NOWOFLON ET 6235 bei  $T = +23^\circ\text{C}$  mit unterschiedlichen Probengeometrien bei gleicher Prüfgeschwindigkeit (Traversengeschwindigkeit) durchgeführt wurden [77]. Anhang B enthält die entsprechenden Messprotokolle (s. Abb. B 1 bis B 5). Die Prüfparameter sind in Tab. 4.3 dargestellt.

<b>Hersteller</b>	®NOWOFOL
<b>Material</b>	®NOWOFLON ET 6235, transparent
<b>Ort / Datum</b>	Prüflabor ®NOWOFOL, Siegsdorf / 20.09.2002
<b>Prüfart / Norm</b>	monoaxial / in Anlehnung an DIN 53 354 [N7]
<b>Maschine</b>	Zwick
<b>Prüfer</b>	Abstreiter, Grützmann
<b>Probenbreite b</b>	50 mm
<b>Probendicke d<sub>0</sub></b>	200 µm
<b>Messlänge l<sub>0</sub> = freie Einspannlänge L</b>	5 mm; 10 mm; 20 mm; 50 mm
<b>Gesamtprobenlänge l<sub>3</sub></b>	250 mm
<b>Verhältnis b/l<sub>0</sub></b>	10; 5; 2,5 und 1
<b>Prüfgeschwindigkeit V<sub>T</sub> (Traversengeschwindigkeit)</b>	5 mm/min = konstant
<b>technisch definierte Dehngeschwindigkeit <math>\dot{\epsilon}</math></b>	100 % / min; 50 % / min; 25 % / min; 10 % / min
<b>Temperatur T</b>	23° C (klimatisiertes Labor ( $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ))
<b>Anzahl Proben n</b>	4 Messlängen à 3 Probekörper = 12

Tab. 4.3 Probekörperabmessungen und Versuchsbedingungen, monoaxialer Zugversuch, ®NOWOFLON ET 6235 (L = l<sub>0</sub> = veränderlich) [77]

Abb. 4.12 zeigt die Mittelwerte der Spannung bei 2 % Dehnung  $\sigma_{\epsilon=2\%}$  in Abhängigkeit vom Verhältnis  $b/l_0$  des Probekörpers im monoaxialen Zugversuch bei T = + 23°C. Diese Dehnung entspricht etwa der Fließdehnung, was durch die nahezu horizontale Tangente an die Spannungs-Dehnungs-Kennlinien deutlich wird. Die Probendicke beträgt bei allen Probekörpern d = 200 µm, die Probenbreite jeweils 50 mm. Die freie Einspannlänge L entspricht der Messlänge l<sub>0</sub>. Für jede der gewählten Einspannlängen 5 mm, 10 mm, 20 mm und 50 mm wurden je drei Versuche gefahren.

Mit der konstanten Traversengeschwindigkeit  $v_T = 5 \text{ mm/min}$  ergeben sich je nach Einspannlänge unterschiedliche technische Dehngeschwindigkeiten  $\dot{\epsilon}$ . Bezogen auf den Ausgangszustand nimmt  $\dot{\epsilon}$  die Werte 1; 2,5; 5 und 10 an. Es sei angemerkt, dass die konstante Prüfgeschwindigkeit in Form der konstanten Traversengeschwindigkeit wenig Aussagekraft besitzt. Sie muss bei kraftgesteuerten Versuchen erst in die physikalisch relevante Dehngeschwindigkeit umgerechnet werden - als technisch definierte Dehngeschwindigkeit bezogen auf die Ausgangs-Messlänge.

Das Diagramm zeigt für kleine Verhältnisse  $b/l_0$  eine deutliche und nichtlineare Zunahme der Spannung bei einer Dehnung von 2 %. Ab einem Verhältnis  $b/l_0 \cong 10$  kann der Einfluss als vernachlässigbar angenommen werden. Die Veränderung der Länge bewirkt jedoch neben der Veränderung des Breiten-Längenverhältnisses auch eine veränderliche (technische) Dehngeschwindigkeit  $\dot{\epsilon}$ , die im o.g. Diagramm ebenfalls dargestellt ist.

Abb. 4.13 zeigt die Mittelwerte des Sekantenmoduls  $E_S$  bis zur Proportionalitätsgrenze in Abhängigkeit vom Verhältnis  $b/l_0$  des Probekörpers im monoaxialen Zugversuch bei  $T = +23^\circ\text{C}$ . Der Sekantenmodul zeigt prinzipiell ein Verhalten, wie die Spannung bei 2 % Dehnung.

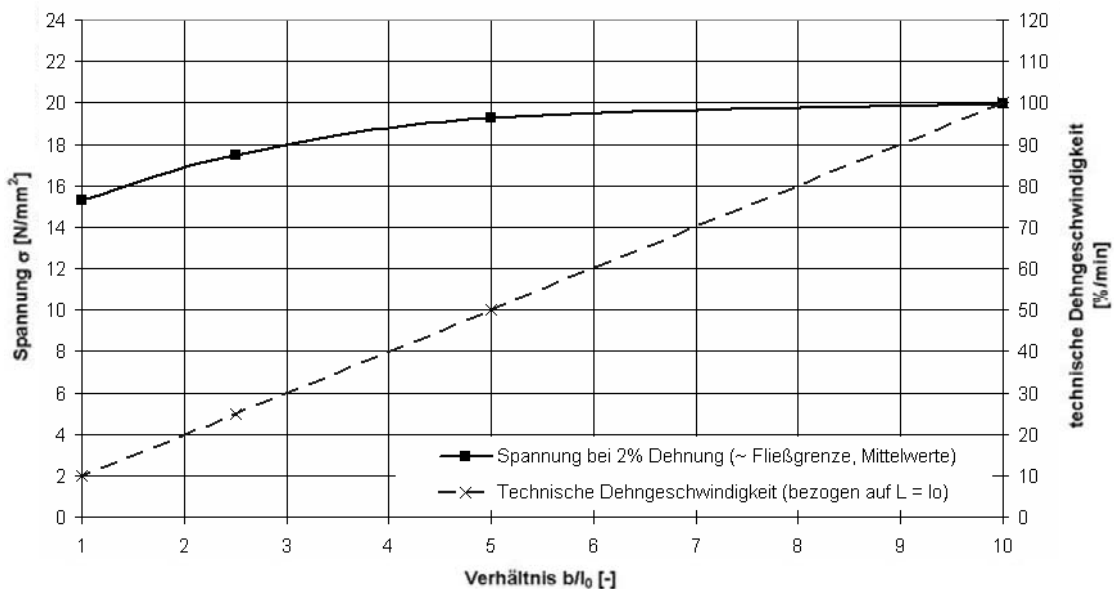


Abb. 4.12 Spannung bei 2 % Dehnung  $\sigma_{\epsilon=2\%}$  ( $\cong$  Fließdehnung) sowie die technische Dehngeschwindigkeit  $\dot{\epsilon}$  (bezogen auf die freie Einspannlänge  $L =$  Messlänge  $l_0$  im Ausgangszustand) in Abhängigkeit vom Verhältnis  $b/l_0$  des Probekörpers,  $T = +23^\circ\text{C}$ ,  $v_T = 5 \text{ mm/min}$ , ©NOWOFLON ET 6235 – transparent,  $d = 200 \mu\text{m}$

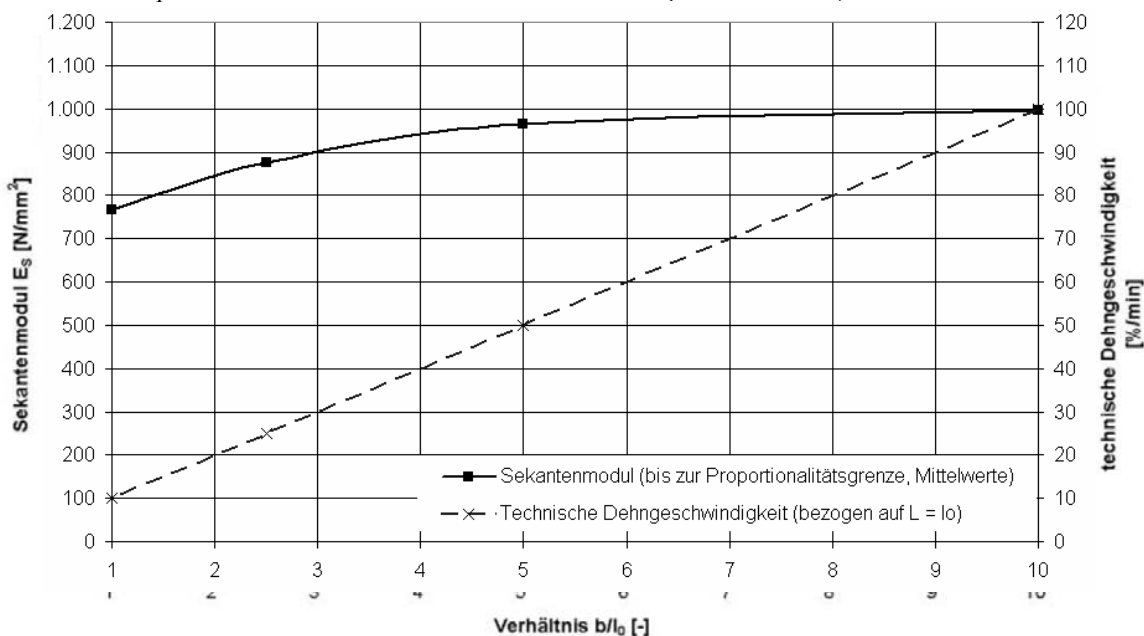


Abb. 4.13 Sekantenmodul  $E_S$  bis zur Proportionalitätsgrenze sowie die technische Dehngeschwindigkeit  $\dot{\epsilon}$  (bezogen auf die freie Einspannlänge  $L =$  Messlänge  $l_0$  im Ausgangszustand) in Abhängigkeit vom Verhältnis  $b/l_0$  des Probekörpers,  $T = +23^\circ\text{C}$ ,  $v_T = 5 \text{ mm/min}$ , ©NOWOFLON ET 6235 – transparent,  $d = 200 \mu\text{m}$

Abb. 4.14 (Spannung bei 2 % Dehnung) und Abb. 4.15 (Sekantenmodul) zeigen einen Vergleich zweier Serien mit gleichen Prüfbedingungen, derselben Dehngeschwindigkeit  $\dot{\epsilon} = 10 \text{ \% / min}$ , aber mit unterschiedlichem Verhältnis  $b/l_0 = 1,0$  bzw.  $0,3$  (s. Tab. 4.4).

Serie	1	2
Probenanzahl	3	3
Probenbreite $b$ [mm]	50 mm	15 mm
Messlänge $l_0 =$ freie Einspannlänge $L$	50 mm	50 mm
Verhältnis $b/l_0$	1,0	0,3
Prüfgeschwindigkeit $V_T$ (Traversengeschwindigkeit)	5 mm/min	5 mm/min
Dehngeschwindigkeit $\dot{\epsilon}$ (techn. def.) = $100 V_T / l_0$	10 %/min	10 %/min

Tab. 4.4 Vergleich zweier Serien mit derselben Dehngeschwindigkeit  $\dot{\epsilon} = 10 \text{ \% / min}$ , aber mit unterschiedlichem Verhältnis  $b/l_0$  ( $b/l_0 = 1,0$  bzw.  $0,3$ )

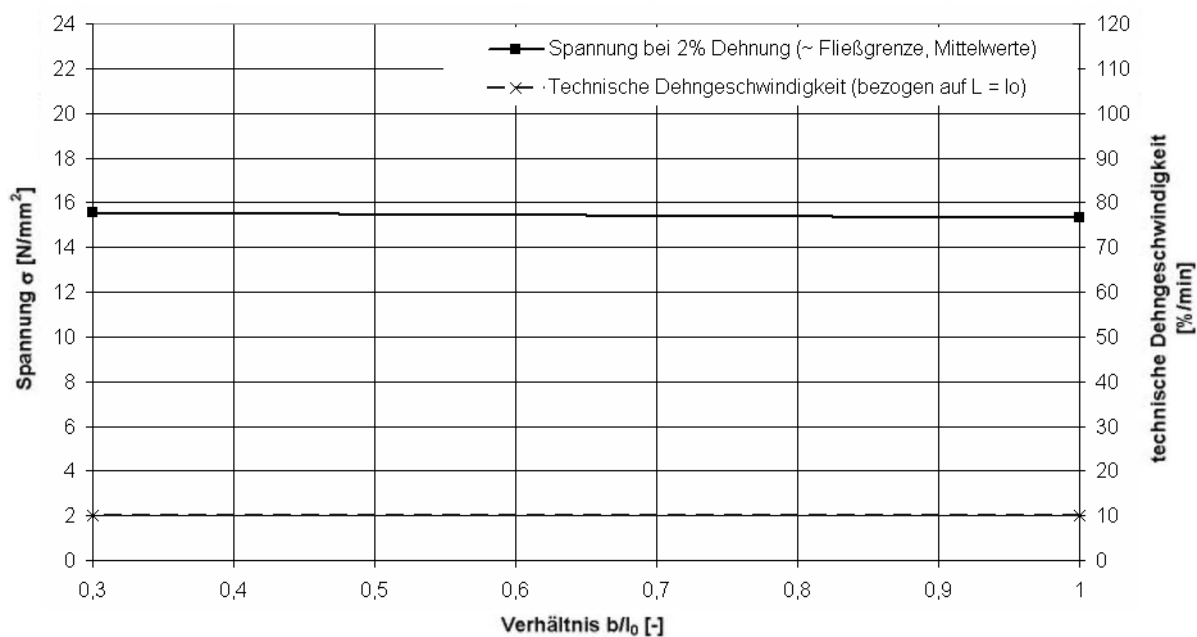


Abb. 4.14 Spannung bei 2 % Dehnung  $\sigma_{\epsilon=2\%}$  (~ Fließdehnung) sowie die technische Dehngeschwindigkeit  $\dot{\epsilon}$  (bezogen auf die freie Einspannlänge  $L =$  Messlänge  $l_0$  im Ausgangszustand) in Abhängigkeit vom Verhältnis  $b/l_0$  des Probekörpers,  $T = + 23^\circ\text{C}$ ,  $v_T = 5 \text{ mm / min}$ , ®NOWOFLON ET 6235 – transparent,  $d = 200 \text{ }\mu\text{m}$

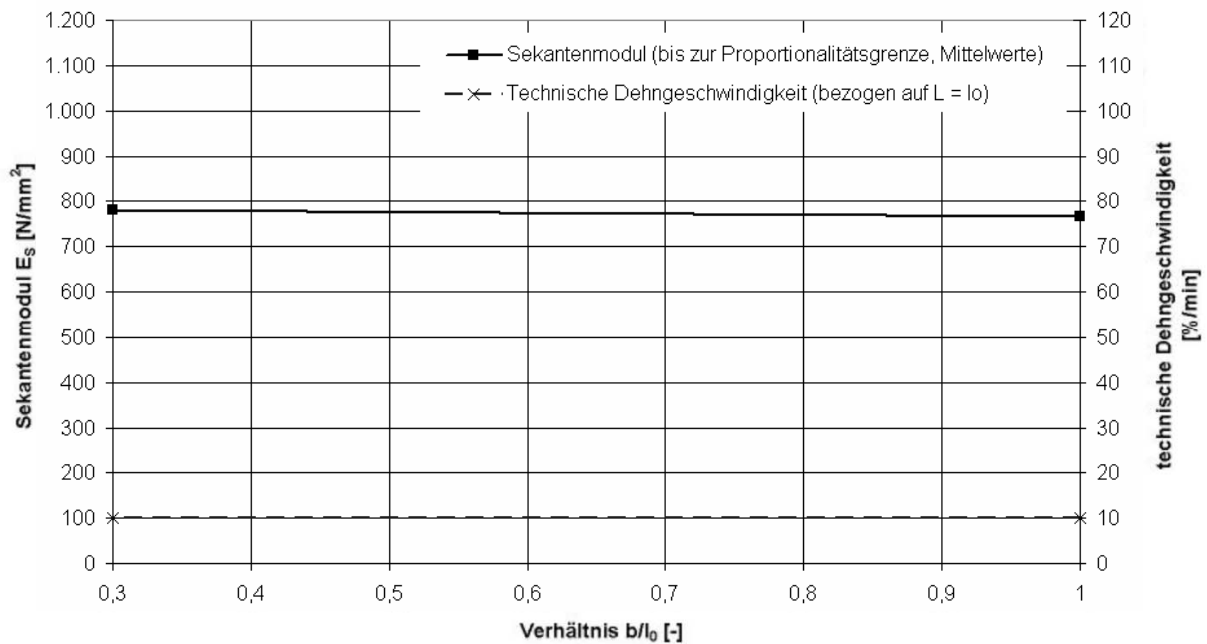


Abb. 4.15 Sekantenmodul  $E_S$  bis zur Proportionalitätsgrenze sowie die technische Dehngeschwindigkeit  $\dot{\epsilon}$  (bezogen auf die freie Einspannlänge  $L = \text{Messlänge } l_0$  im Ausgangszustand) in Abhängigkeit vom Verhältnis  $b/l_0$  des Probekörpers,  $T = +23^\circ\text{C}$ ,  $v_T = 5 \text{ mm/min}$ ,  
©NOWOFLON ET 6235 – transparent,  $d = 200 \mu\text{m}$

Der Vergleich zeigt trotz der unterschiedlichen Verhältnisse  $b/l_0$  nahezu konstante Werte für die Spannung  $\sigma_{\epsilon=2\%}$  bei 2 % Dehnung und für den Sekantenmodul  $E_S$  bis zur Proportionalitätsgrenze.

Die Ergebnisse führen zu dem Schluss, dass die im Monoaxialversuch gewonnenen Werte weniger vom Verhältnis  $b/l_0$  des Folienkörpers abhängen, als vielmehr von der Dehngeschwindigkeit  $\dot{\epsilon}$  [%/min]. Falls die Fließdehnung von der Dehngeschwindigkeit unabhängig wäre, also beispielsweise konstant 2 % betragen würde, wäre diese Beziehung ebenfalls nichtlinear. Die vorliegenden Versuche haben diesbezüglich nur eine begrenzte Aussagekraft, da sie nur bis zur Dehnung  $\epsilon = 2\%$  gefahren wurden. Aussagen über den Einfluss der Dehngeschwindigkeit auf die Bruchspannung und die Bruchdehnung sind hieraus nicht ableitbar.

## Temperatur

Abb. 4.16 zeigt die Abhängigkeit der Bruchdehnung, der Bruchspannung (Zugfestigkeit) und der Spannung bei einer Dehnung von 10 % von der Temperatur (vgl. Abb. 2.2). Das Diagramm stammt aus dem Jahr 1991. Es wurde auf der Basis der US-amerikanischen Norm ASTM D 1708 erstellt.

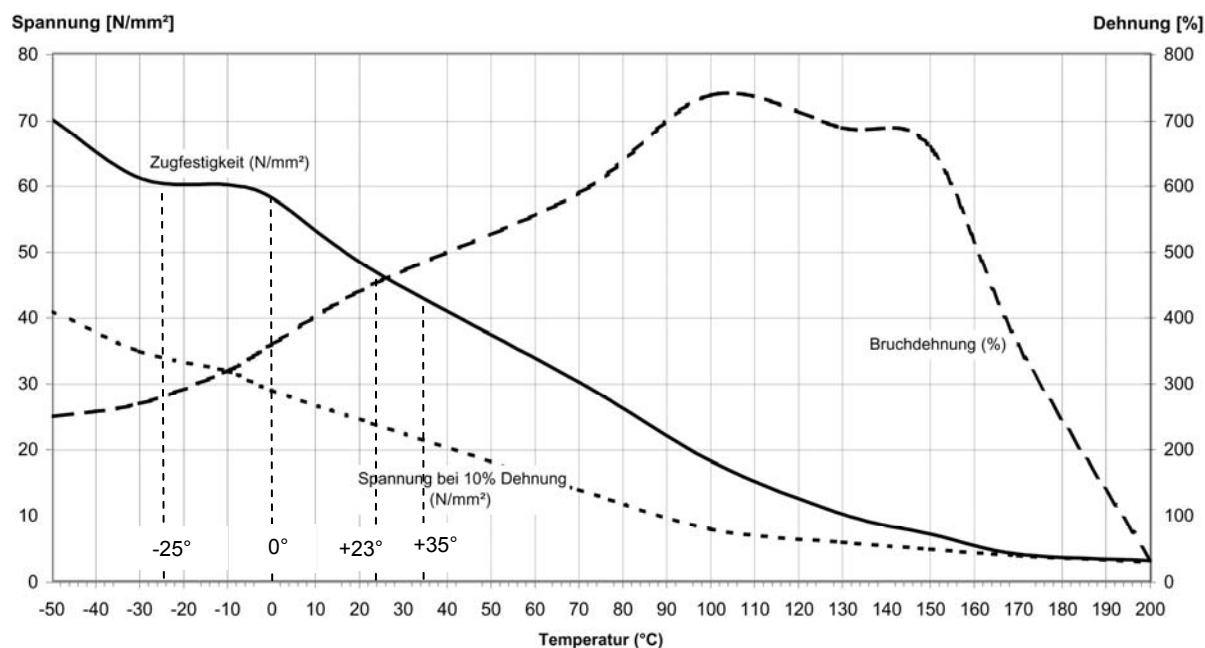


Abb. 4.16 Prinzipielles Verhalten der Zugfestigkeit, der Bruchdehnung und der Spannung bei 10 % Dehnung in Abhängigkeit von der Temperatur, gemessen an Streifenproben in monoaxialen Zugversuchen nach ASTM D 1708, ETFE-Folie<sup>®</sup> HOSTAFILON ET 6235 – transparent, 200 µm, Herstellerangaben<sup>®</sup> HOECHST 1991 (heute<sup>®</sup> DYNELON) [79] (mit nachträglichem Eintrag von vier Temperaturstufen)

Die Bruchdehnung steigt im Bereich zwischen ca. -25°C und +75°C nahezu linear mit etwa 3,3 Prozent pro °C an. Bei Temperaturen unter -25°C flacht die Kurve ab. Bei Temperaturen über +75°C nimmt die Steigung zunächst bis zum Maximalwert (~750 % bei ~100°C) zu, bevor sie ab etwa +150°C steil abfällt.

Die Bruchspannung (Zugfestigkeit) fällt unterhalb von -25°C und zwischen etwa -10°C und +100°C nahezu linear mit etwa 4 N/mm<sup>2</sup> pro °C ab. Zwischen -25°C und -10°C liegt sie konstant bei etwa 60 N/mm<sup>2</sup>. Oberhalb von 100°C flacht die Kurve ab.

Die Spannung, gemessen bei einer Dehnung von 10 %, fällt zwischen -50°C und +100°C nahezu linear mit etwa 0,22 N/mm<sup>2</sup> ab. Oberhalb von +100°C flacht auch diese Kurve deutlich ab.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Werkstoffprüfungen bei genau definierten Temperaturen, möglichst in einem klimatisierten Labor oder einer Klimakammer, durchzuführen sind. Insbesondere Langzeittests werden zuweilen auch bei Raumtemperatur in unklimatisierten Räumen durchgeführt, in denen die Temperatur im Winter z.B. +19°C und im Sommer z.B. +26°C betragen, und damit von der allgemein üblichen Referenztemperatur von +23°C mehr oder weniger abweichen kann. Dies erschwert den Vergleich von Messdaten und erhöht den Aufwand bei der Auswertung.

### 4.3.3 Vergleichstests

Zur statistischen Auswertung wurden 108 Monoaxialversuche an <sup>®</sup>HOSTAFOLON ET 6235 (100 – 250  $\mu\text{m}$ ), davon 15 Schweißnahtproben (200  $\mu\text{m}$ ) der Firma Covertex mit herstellerüblichen Prüfparametern und Probenabmessungen im Werk <sup>®</sup>NOWOFOL, Siegsdorf, durchgeführt. Die Prüfparameter sind in Tab. 4.5 dargestellt.

<b>Folienhersteller</b>	<sup>®</sup> NOWOFOL
<b>Material</b>	<sup>®</sup> NOWOFOLON ET 6235, transparent
<b>Schweißnahtkonfektion</b>	Covertex, Obing (D), kontinuierl. Schweißverfahren
<b>Ort</b>	Siegsdorf (D)
<b>Prüfer</b>	Moritz, Abstreiter, Grützmann
<b>Datum</b>	19.07.2000 und 03.08.2000
<b>Prüfart</b>	monoaxial
<b>Maschine</b>	Zwick
<b>Norm</b>	in Anlehnung an DIN 53 455 [N9]
<b>Probenbreite b</b>	15 mm
<b>Probendicke <math>d_0</math></b>	100 – 250 $\mu\text{m}$
<b>Messlänge <math>L_0</math> = Abstand der Einspannklemmen L</b>	50 mm
<b>Gesamtprobenlänge <math>L_3</math></b>	250 mm
<b>Prüfgeschwindigkeit <math>v_{T,1}</math></b>	100 mm/min für $\varepsilon \leq 0,2$ [-]
<b>Prüfgeschwindigkeit <math>V_{T,2}</math></b>	500 mm/min für $\varepsilon > 0,2$ [-]
<b>Temperatur T</b>	23° C (klimatisierter Prüfraum, $\pm 1^\circ\text{C}$ )
<b>Gesamtanzahl Proben n</b>	123
<b><math>n_{100\text{ E}}, n_{100\text{ Q}}</math></b>	5/5 (E = Extrusionsrichtung / Q = Querrichtung)
<b><math>n_{150\text{ E}}, n_{150\text{ Q}}</math></b>	5/5 (E = Extrusionsrichtung / Q = Querrichtung)
<b><math>n_{200\text{ E}}, n_{200\text{ Q}}</math></b>	19/19 (E = Extrusionsrichtung / Q = Querrichtung)
<b><math>n_{225\text{ E}}, n_{225\text{ Q}}</math></b>	17/17 (E = Extrusionsrichtung / Q = Querrichtung)
<b><math>n_{250\text{ E}}, n_{250\text{ Q}}</math></b>	9/7 (E = Extrusionsrichtung / Q = Querrichtung)
<b><math>n_{200, \text{SN}, \text{E}}, n_{200, \text{SN}, \text{Q}}</math></b>	5/10 (SN = Schweißnahtproben, E, Q s.o.)

Tab. 4.5 Probekörperabmessungen und Versuchsbedingungen, monoaxialer Zugversuch an insgesamt 123 Proben, <sup>®</sup>NOWOFOLON ET 6235; MORITZ 2000 [131]



## Auswertung und Interpretation der Ergebnisse

Das in Abb. 4.17 dargestellte Spannungs-Dehnungs-Diagramm zeigt die Mittelwertkurven getrennt nach Foliendicke, nach der Entnahmerichtung des Probenmaterials (Extrusions- und Querrichtung) sowie getrennt nach Folienproben und Schweißnahtproben.

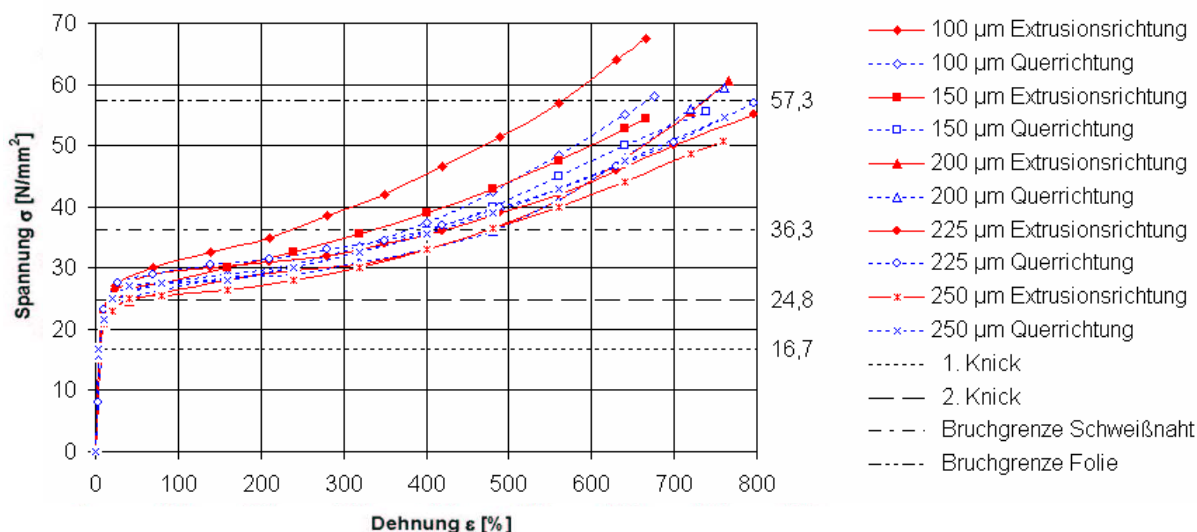


Abb. 4.17 Spannungs-Dehnungs-Diagramm, getrennt nach Foliendicke, Quer- und Extrusionsrichtung sowie nach Folien- und Schweißnahtproben, 108 Probekörper, Mittelwerte, <sup>®</sup>NOWOFLON ET 6235, transparent

Das grundsätzliche Spannungs-Dehnungsverhalten wird durch die mittig in der Probe angeordnete Schweißnaht nicht beeinflusst. Die Spannung am ersten Knick (Fließgrenze) beträgt im Mittel aller Proben etwa  $\sigma_S = 16,7 \text{ N/mm}^2$ .

Für die Schweißnahtproben ergibt sich im Mittel eine Bruchspannung von  $\sigma_{B,SN} = 36,2 \text{ N/mm}^2$ , für Folienproben ohne Schweißnaht  $\sigma_B = 57,3 \text{ N/mm}^2$ . Die ablesbaren Grenzen des 1. Knickes, des 2. Knickes sowie die Bruchgrenzen der Folie und der Schweißnaht ( $d = 200 \mu\text{m}$ ) sind im Diagramm als horizontale Linien gestrichelt dargestellt.

Etwa ab dem 2. Knick sind deutliche Unterschiede im Spannungs-Dehnungsverhalten der einzelnen Foliendicken zu beobachten, was sich auch im Vergleich der Variationskoeffizienten der Bruchspannung  $\sigma_B$  und der Spannung bei 10 %-Dehnung  $\sigma_{\epsilon=0,10}$  ausdrückt (s. Abb. 4.18). Die von den Herstellern zumeist angegebene Spannung bei 10 % Dehnung liegt zwischen dem 1. und dem 2. Knick der Spannungs-Dehnungslinie.

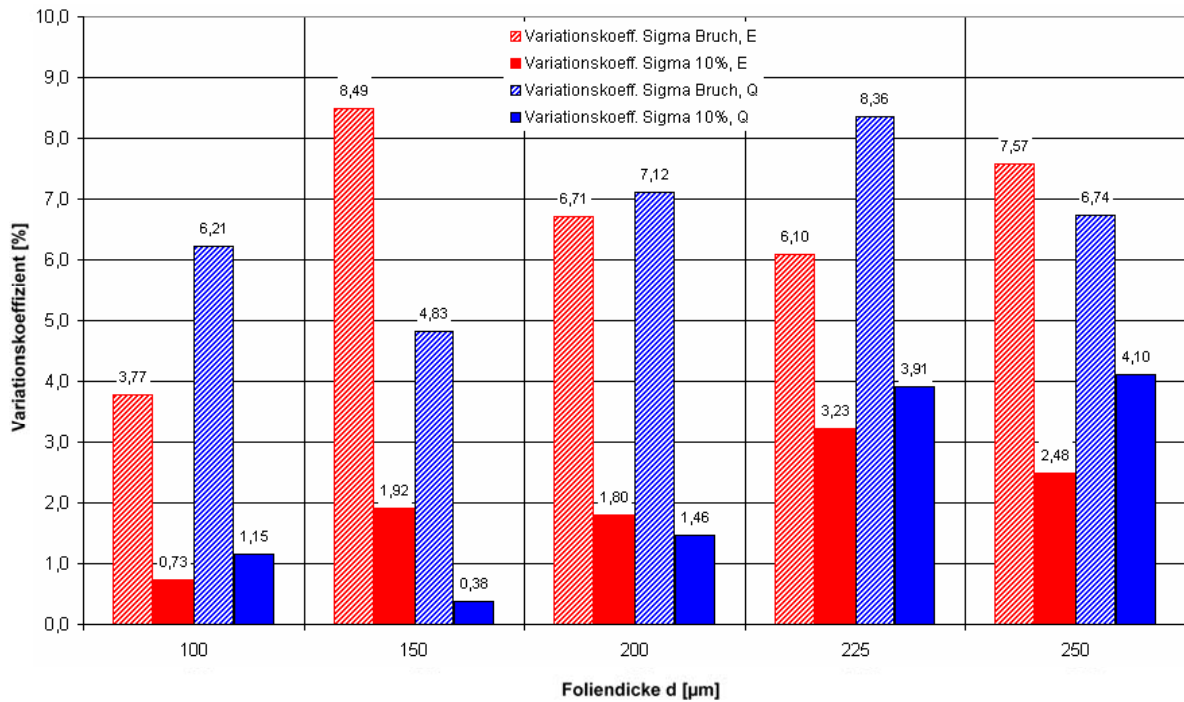


Abb. 4.18 Vergleich der Variationskoeffizienten der Bruchspannung  $\sigma_B$  und der Spannung bei 10 % Dehnung  $\sigma_{\varepsilon=0,10}$  in Abhängigkeit von der Foliendicke, <sup>®</sup>NOWOFLON ET 6235, transparent

Die folgenden Abbildungen zeigen die Bruchkraft  $F_B$  (Abb. 4.19), die Bruchspannung  $\sigma_B$  (Abb. 4.20) und die Bruchdehnung  $\varepsilon_B$  (Abb. 4.21) jeweils in Abhängigkeit von der Foliendicke.

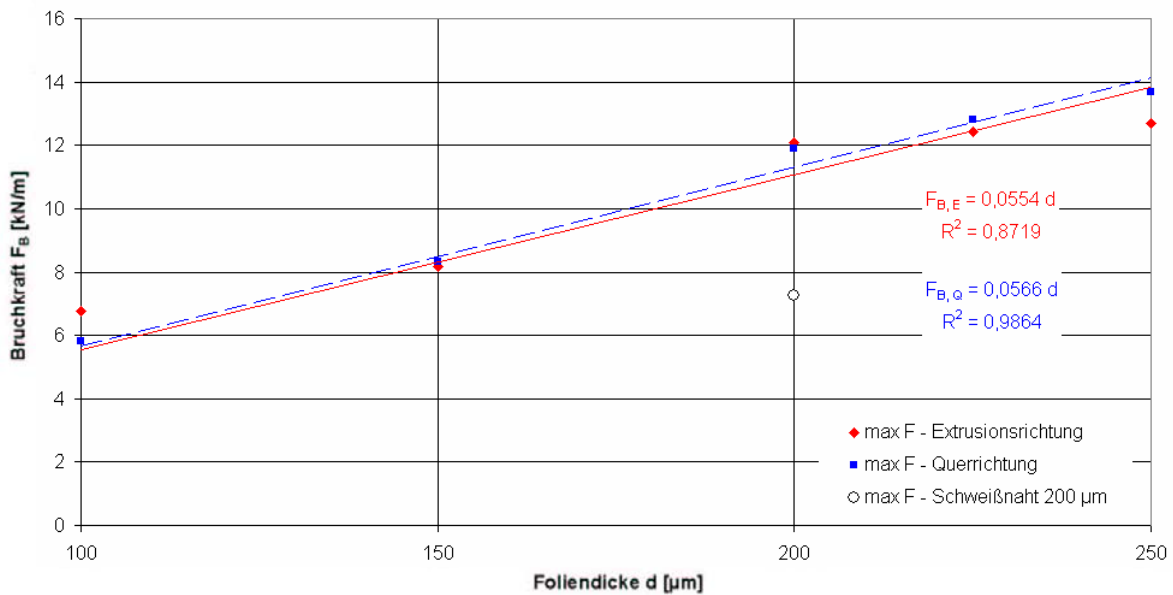


Abb. 4.19 Bruchkraft  $F_B$  in Abhängigkeit von der Foliendicke, <sup>®</sup>NOWOFLON ET 6235, transparent

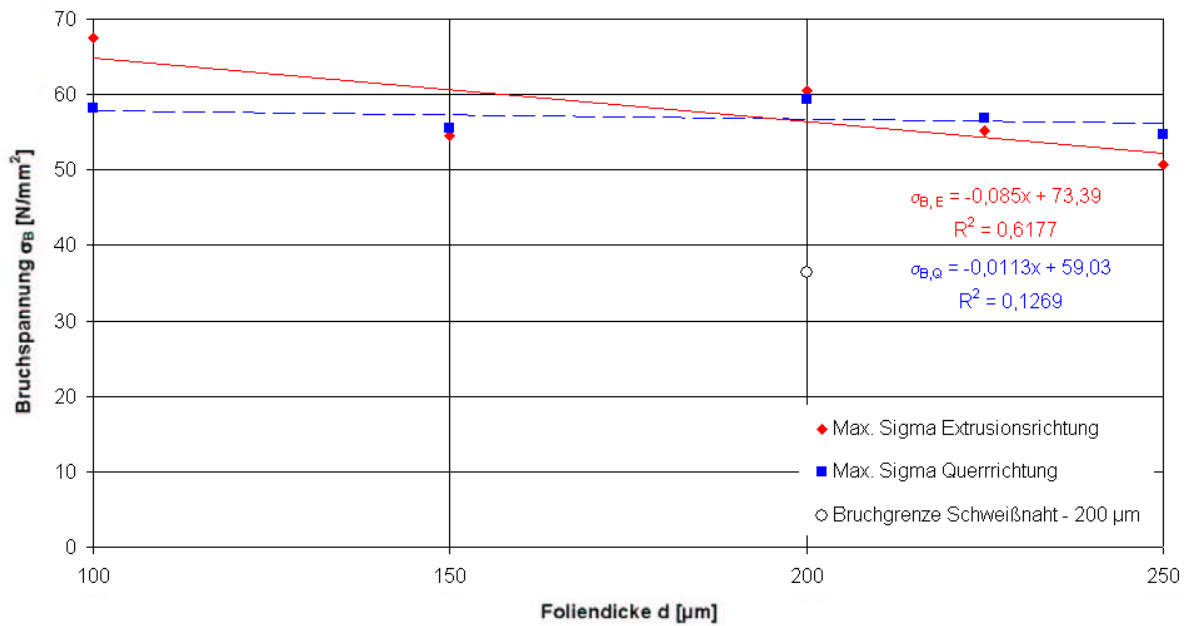


Abb. 4.20 Bruchspannung  $\sigma_B$  in Abhängigkeit von der Foliendicke, <sup>®</sup>NOWOFLON ET 6235, transparent

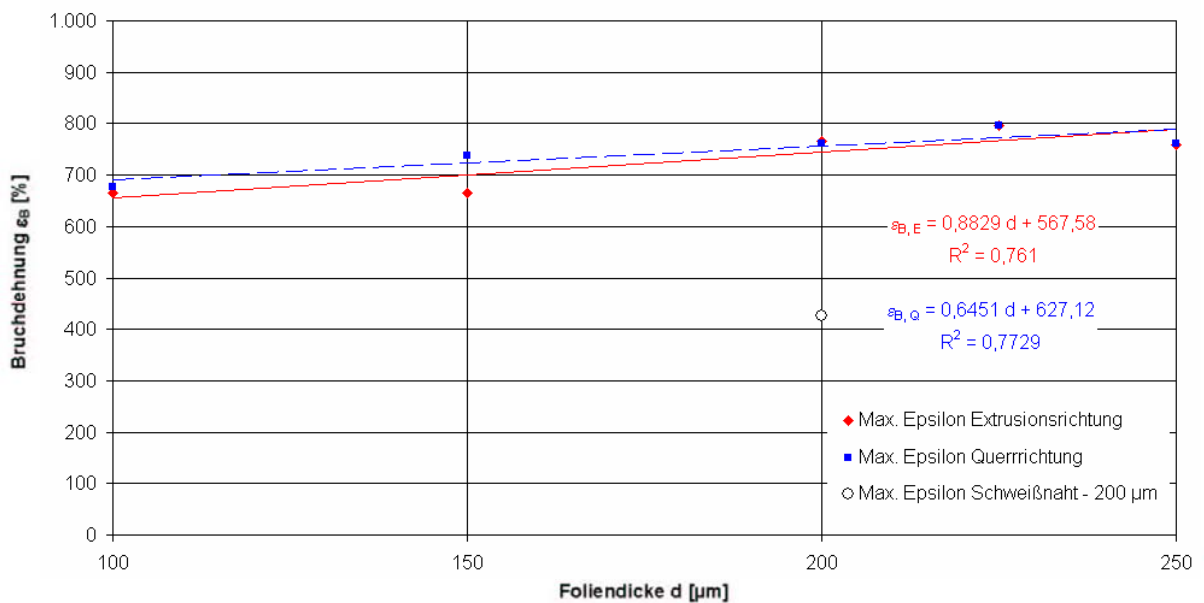


Abb. 4.21 Bruchdehnung  $\epsilon_B$  in Abhängigkeit von der Foliendicke, <sup>®</sup>NOWOFLON ET 6235, transparent

Erwartungsgemäß zeigt sich ein linearer Anstieg der maximalen Prüfkraft (Bruchkraft) mit zunehmender Foliendicke. Die Bruchspannung zeigt, dass bei den Herstellerdaten bereits festgestellte isotrope Verhalten ebenfalls nur für größere Foliendicken.

Ein Vergleich der in Abb. 4.22 dargestellten Fotos einer Folienprobe ohne Schweißnaht (a) und mit Schweißnaht (b) zeigt unterschiedliches Bruchverhalten. Beide Proben weisen eine deutlich erkennbare Fließzone sowie eine Einschnürung auf.

Bei der Folienprobe (ohne Schweißnaht) beginnt der Bereich etwa in Probenmitte, bei der Schweißnahtprobe zwischen der mittig angeordneten Schweißnaht und den Einspannklemmen. Mit zunehmender Dehnung bzw. Versuchsdauer breitet er sich von der Mitte her aus, erreicht aber nicht die Einspannungen.

Die Schweißnahtprobe reißt deutlich früher als die Folienprobe ohne Schweißnaht, d.h. ehe sich die Fließzone in dem Maß ausbreiten kann. Der Bruch erfolgt bei der Schweißnahtprobe nach Hohlrumbildungen direkt an einer der beiden Schweißnahtkanten. Eine Eintrübung (Weißfärbung, Einleitung eines Weißbruches), die nach MENGES, HABERSTROH, MICHAELI und SCHMACHTENBERG 2002 [111] bei teilkristallinen Thermoplasten üblicherweise mit Mikrorissen (Crazes) einhergeht, ist nicht zu beobachten (s. Anhang D, Kap. D 6.3.1, Abb. D 20)

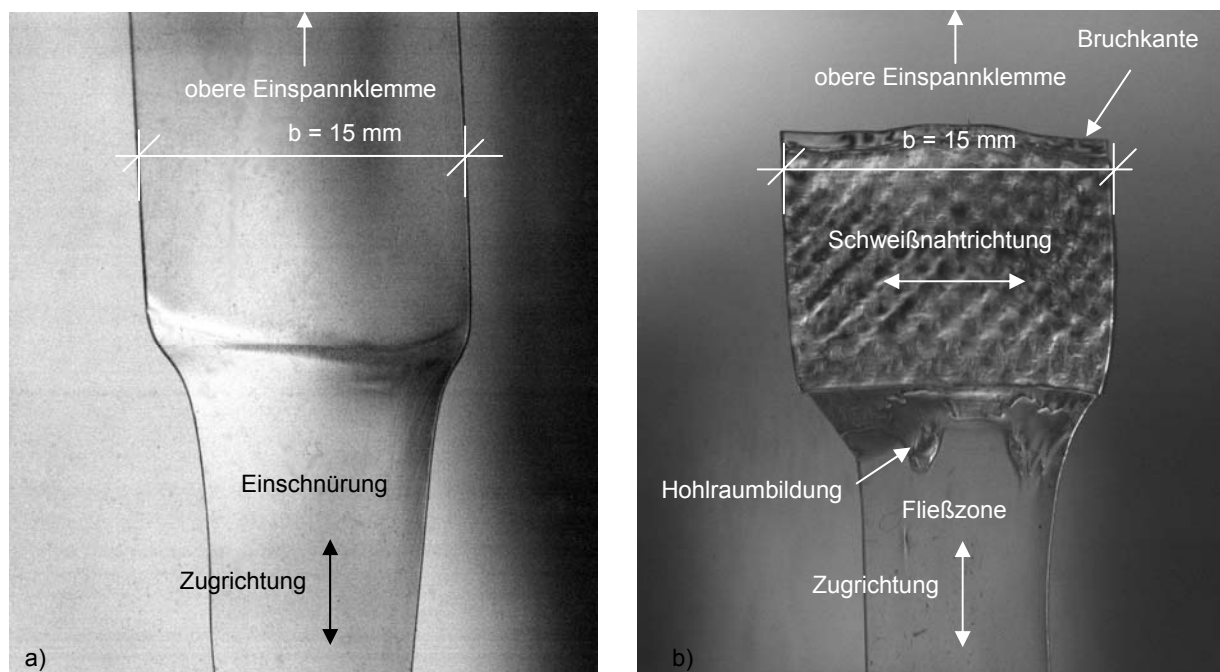


Abb. 4.22 Monoaxialer Zugversuch an schmalen ETFE-Streifenproben nach DIN EN ISO 527-1, Typ 2 ( $b = 15 \text{ mm}$ ,  $l_0 = 50 \text{ mm}$ , s. Tab. 4.2), <sup>®</sup>NOWOFLON ET 6235, transparent:

- a) Ausschnitt einer Folienprobe nach dem Bruch: ausgeprägte Fließzonenausbildung (Einschnürung bis kurz vor den Einspannklemmen)
- b) Ausschnitt einer Schweißnahtprobe (in Probenmitte angeordnete Schweißnaht) nach dem Bruch: Fließzonenausbildung mit Hohlrumbildung an beiden Schweißnahtkanten, Brucheintritt an einer der beiden Schweißnahtkanten

Wenn sich im Bauwerk eine Schweißnaht in unmittelbarer Nähe maximaler Spannungen befindet - dies ist bei einer maximalen Bahnenbreite von derzeit etwa 1.600 mm häufig der Fall - wird nach derzeitigem Entwicklungsstand der Schweißnähte ein Tragwerksversagen durch Bruch an einer Schweißnahtkante und nicht im Mittenbereich der Folie erfolgen, wenn die Folie nicht vorgeschädigt ist.

Abb. 4.23 zeigt die Bruchspannung und die Bruchdehnung für die einzelnen Foliendicken, getrennt nach Extrusions- und Querrichtung.

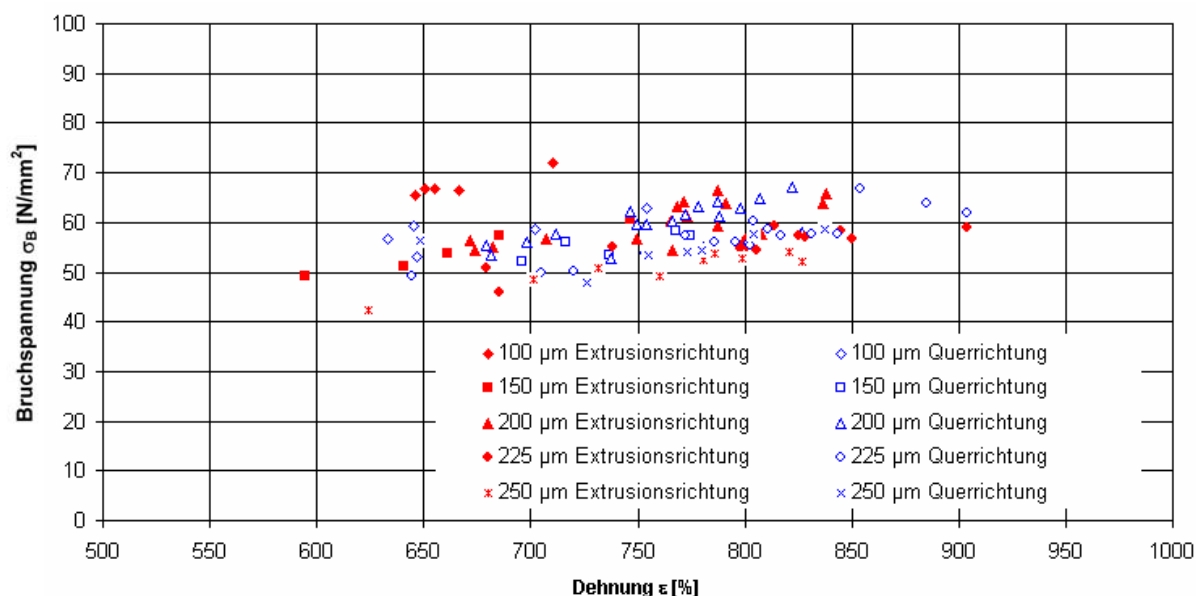


Abb. 4.23 Bruchspannungs-Bruchdehnungs-Diagramm (93 Folienproben, ohne Schweißnahtproben),  
 ©NOWOFLON ET 6235, transparent

Abb. 4.24 zeigt die Spannungen bei einer Dehnung von 10 %, aufgetragen über die Foliendicke. Die konstanten Verläufe zeigen, dass bis zu dieser Dehnung keine signifikante Abhängigkeit des Spannungs-Dehnungsverlaufs von der Foliendicke vorliegt. Die Schweißnahtproben verhalten sich hierbei wie die Folienproben.

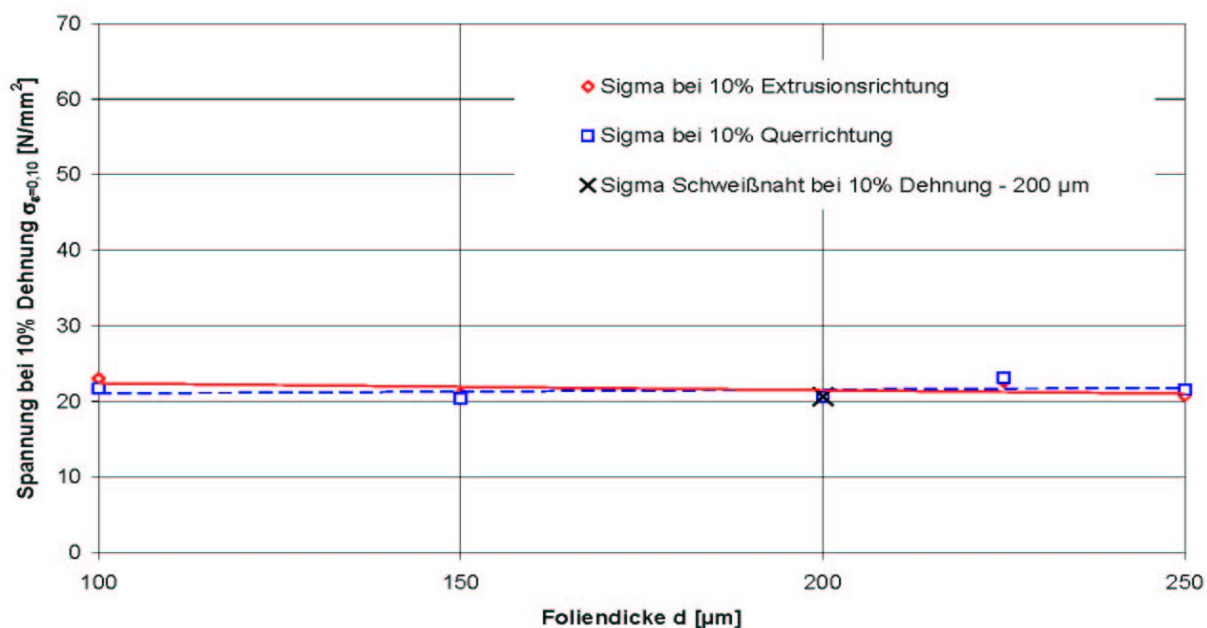


Abb. 4.24 Spannung bei 10 % Dehnung  $\sigma_{\epsilon=0,10}$  in Abhängigkeit von der Foliendicke  $d$ ; ©NOWOFLON ET 6235, transparent

## Statistische Auswertung der Versuche

Die ermittelten Daten wurden nach EN 1990 [N26] (s. Anhang C - Grundlagen der Statistik und Wahrscheinlichkeitstheorie) statistisch ausgewertet. Nach Norm ist für die Auswertung von Versuchen zur Materialfestigkeit die logarithmische Normalverteilung der Zufallsgröße anzunehmen. Die gewünschte Aussagewahrscheinlichkeit  $W$  (Konfidenzniveau), also das Maß für die Zuverlässigkeit der Aussage, dass der geschätzte 5 %-Fraktilwert nicht kleiner ist, als der 5 %-Fraktilwert der Grundgesamtheit der möglichen Messwerte, soll nach EN 1990 für Bemessungsgrößen aus statistisch ausgewerteten Materialprüfungen 75 % betragen.

Der zum 5 %-Fraktilwert erforderliche Fraktilfaktor  $k_n$  hängt maßgeblich davon ab, ob die Streuung der Zufallsvariablen (Variationskoeffizient  $v_x$  der Grundgesamtheit) bekannt ist oder nicht. Er beruht bei bekanntem Variationskoeffizienten der Grundgesamtheit auf der Normalverteilung. Bei unbekanntem Variationskoeffizienten beruht er auf der nicht zentralen t-Verteilung, auch STUDENT'sche Verteilung genannt. Aufgrund der großen Anzahl von Vorversuchen des Herstellers wurde der Variationskoeffizient der Grundgesamtheit der Messgrößen als bekannt vorausgesetzt.

Die Versuche bestätigen, dass  $v_x \leq 10\%$  für Bruchzustandsgrößen und  $v_x \leq 5\%$  für Messgrößen bis zu einer Dehnung von 10 % angenommen werden können. Die statistische Auswertung zeigt die erwarteten Variationskoeffizienten ( $\max V_{\sigma_B} = 8,49\%$ ,  $\max V_{\sigma_{10\%}} = 4,10\%$ ), die sich bei Einhaltung konstanter Dehngeschwindigkeiten (anstatt konstanter Traversengeschwindigkeiten) und auf der Basis wahrer Spannungs-Dehnungsgrößen sicher noch reduzieren ließen (s. Anhang D, Kap. D 5).

Ein Vergleich der Mittelwerte aller durchgeführten Versuche mit den Herstellerangaben zeigt im wesentlichen gute Übereinstimmung. Im Fall der 200  $\mu\text{m}$ -Folie wurden die Festigkeiten nach Herstellerangaben weit übertroffen, so dass letztere eher konservative Werte darstellen.

Abb. 4.25 bis 32 zeigen die Mittelwerte, 5%-Fraktilwerte, Summenhäufigkeiten und Wahrscheinlichkeitsdichten für die Bruchspannungen und Bruchdehnungen der Schweißverbindung und der Folie (beide 200  $\mu\text{m}$ ) in Extrusionsrichtung (E) und in Querrichtung (Q). Der Probenumfang beträgt  $n = 5$  für die Schweißnahtproben und  $n = 19$  für die Folienproben.

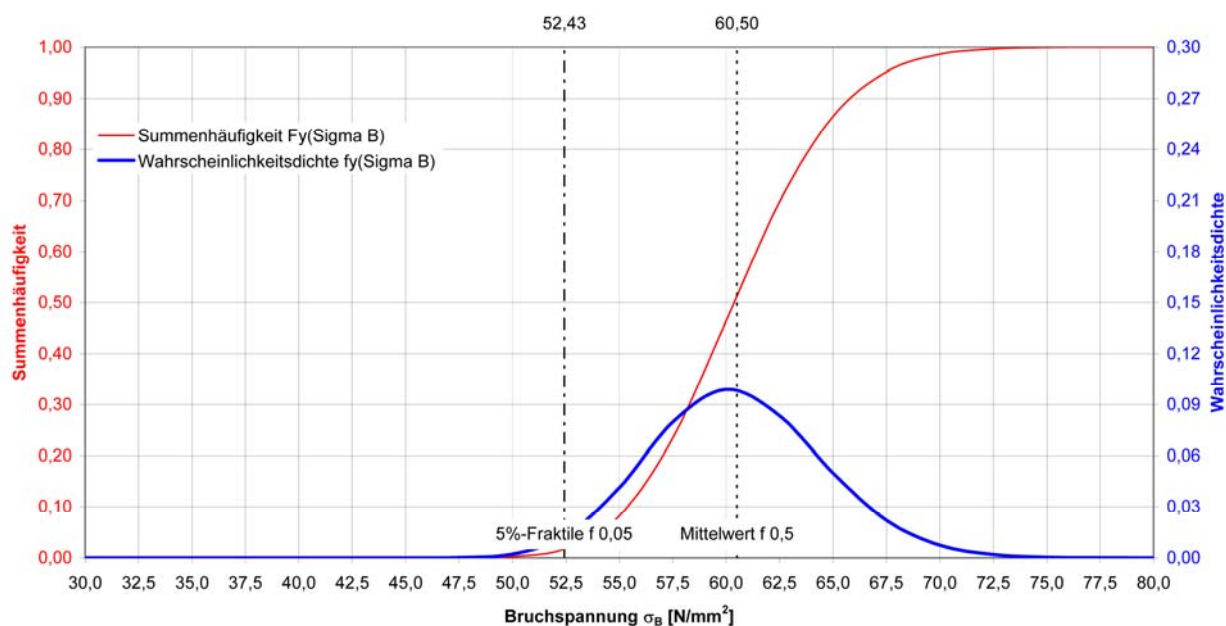


Abb. 4.25 Bruchspannung der Folie in Extrusionsrichtung  $\sigma_{B,200,E}$  : Verteilungsfunktion, Wahrscheinlichkeitsdichte, Mittelwert und 5%-Fraktile für 19 Proben

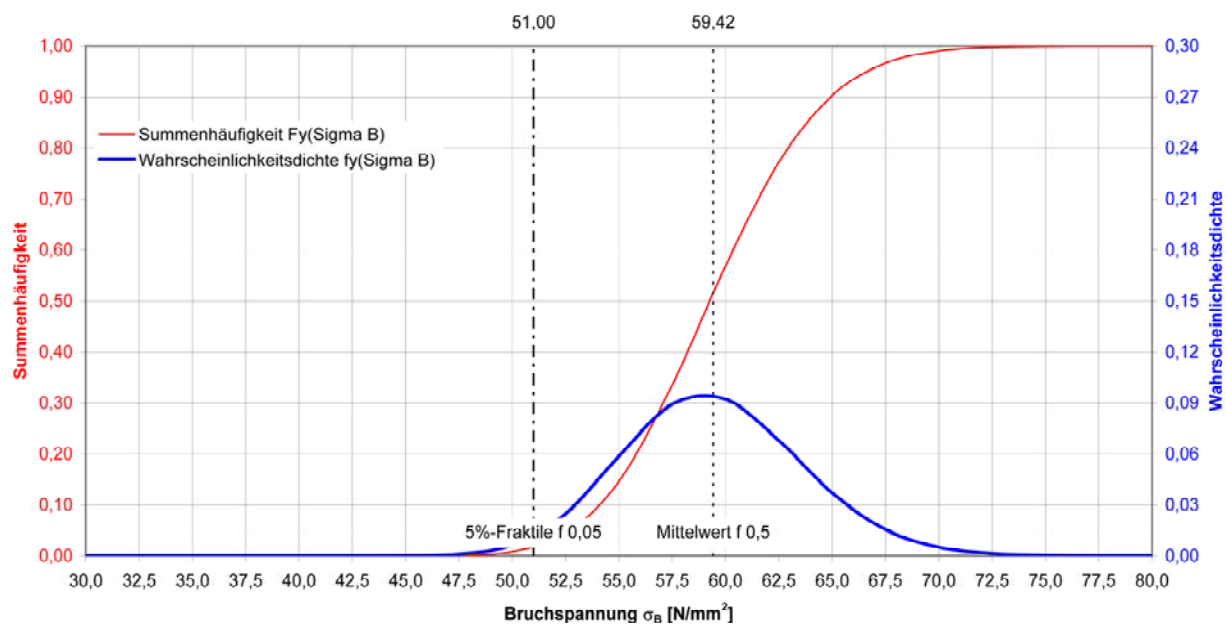


Abb. 4.26 Bruchspannung der Folie in Querrichtung  $\sigma_{B,200,Q}$  : Verteilungsfunktion, Wahrscheinlichkeitsdichte, Mittelwert und 5%-Fraktile für 19 Proben

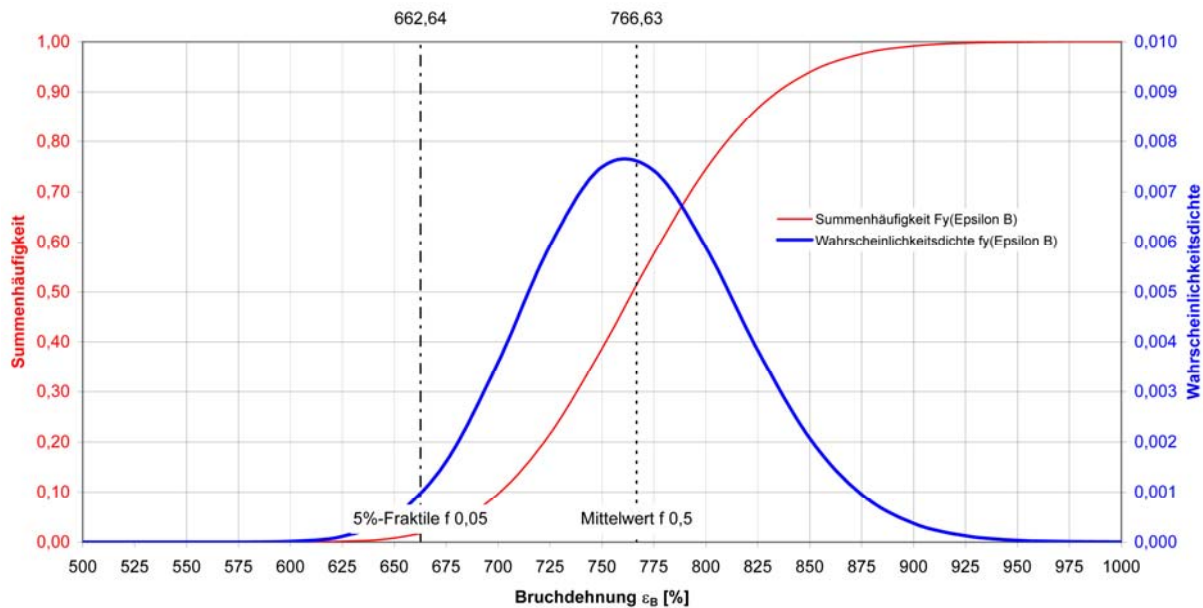


Abb. 4.27 Bruchdehnung der Folie in Extrusionsrichtung  $\epsilon_{B,200,E}$  : Verteilungsfunktion, Wahrscheinlichkeitsdichte, Mittelwert und 5%-Fraktile für 19 Proben

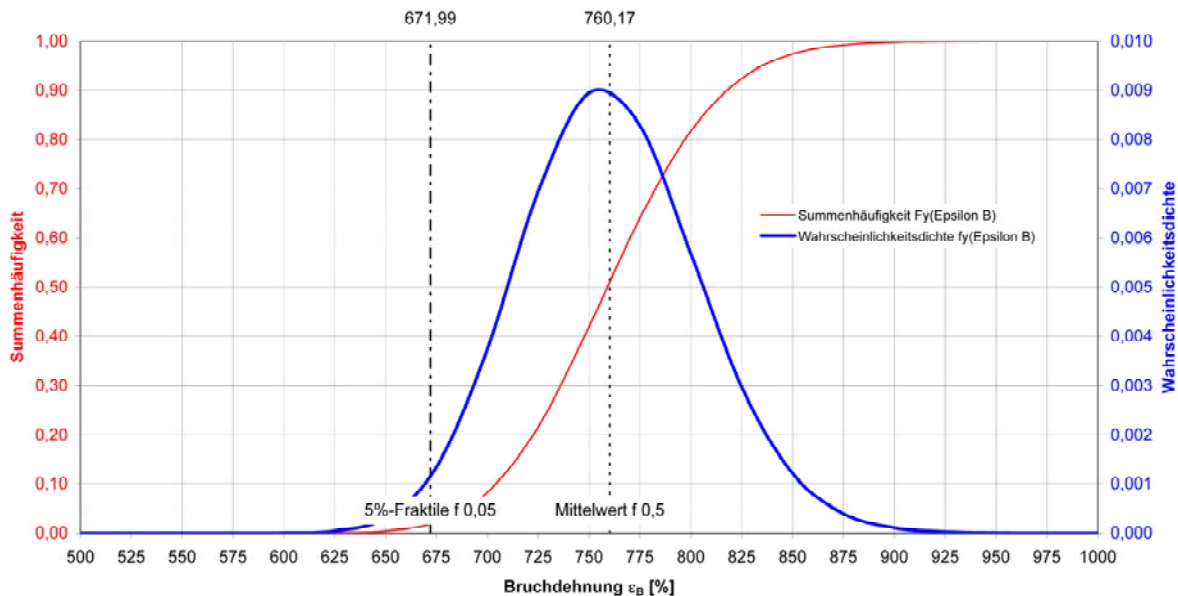


Abb. 4.28 Bruchdehnung der Folie in Querrichtung  $\epsilon_{B,200,Q}$  : Verteilungsfunktion, Wahrscheinlichkeitsdichte, Mittelwert und 5%-Fraktile für 19 Proben



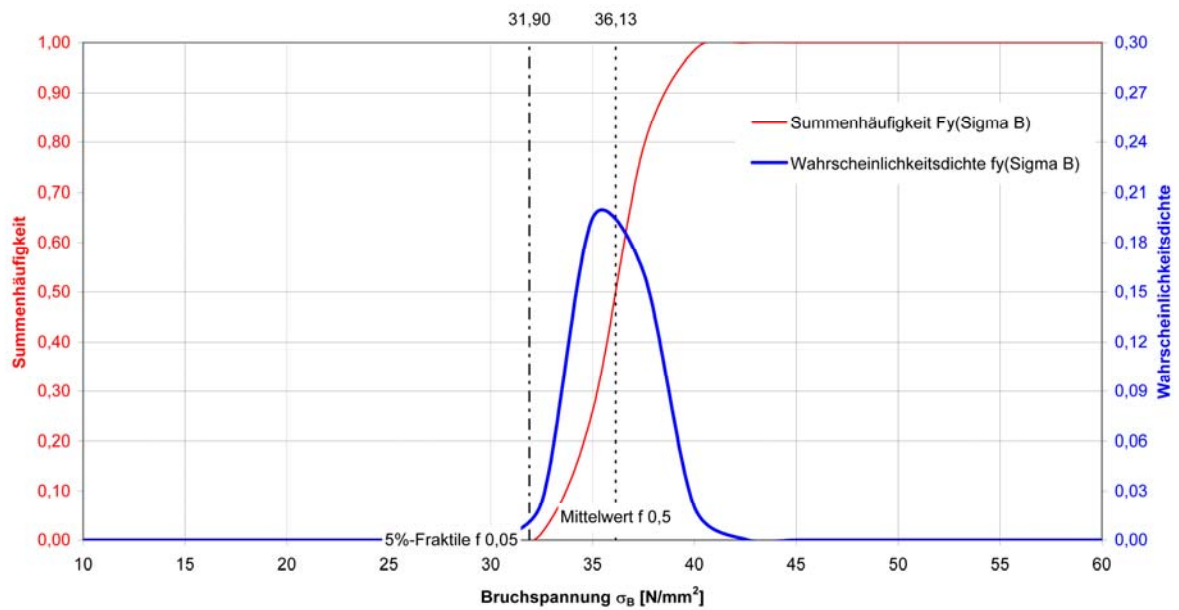


Abb. 4.29 Bruchspannung der Schweißnaht quer zur Extrusionsrichtung  $\sigma_{B,200,SN,E}$  : Verteilungsfunktion, Wahrscheinlichkeitsdichte, Mittelwert und 5%-Fraktile für 5 Proben

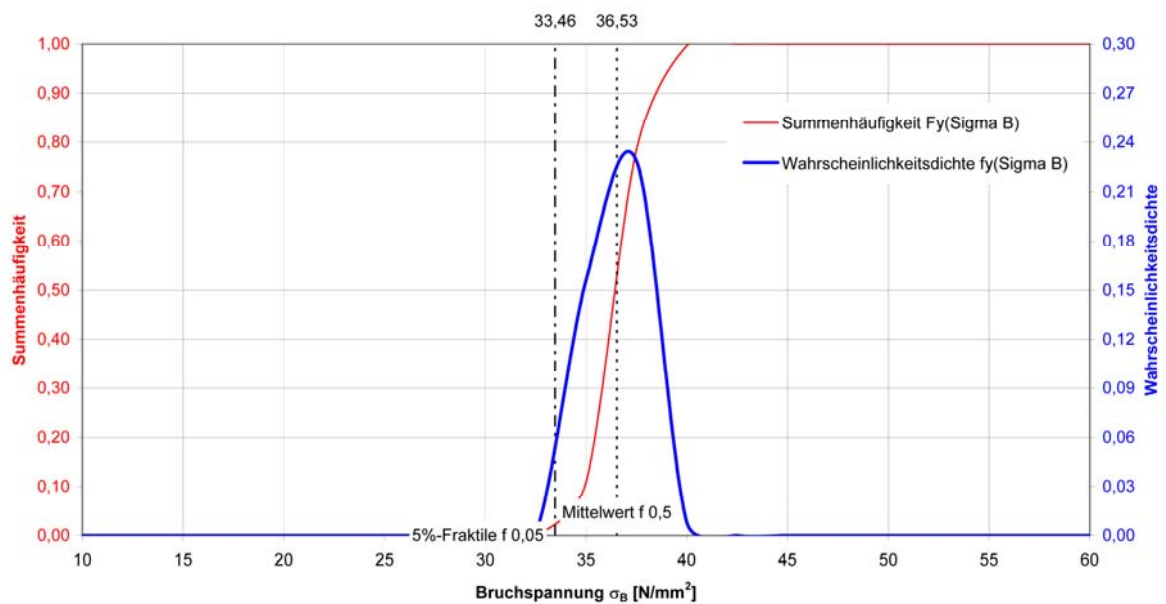


Abb. 4.30 Bruchspannung der Schweißnaht quer zur Querrichtung  $\sigma_{B,200,SN,Q}$  : Verteilungsfunktion, Wahrscheinlichkeitsdichte, Mittelwert und 5%-Fraktile für 5 Proben

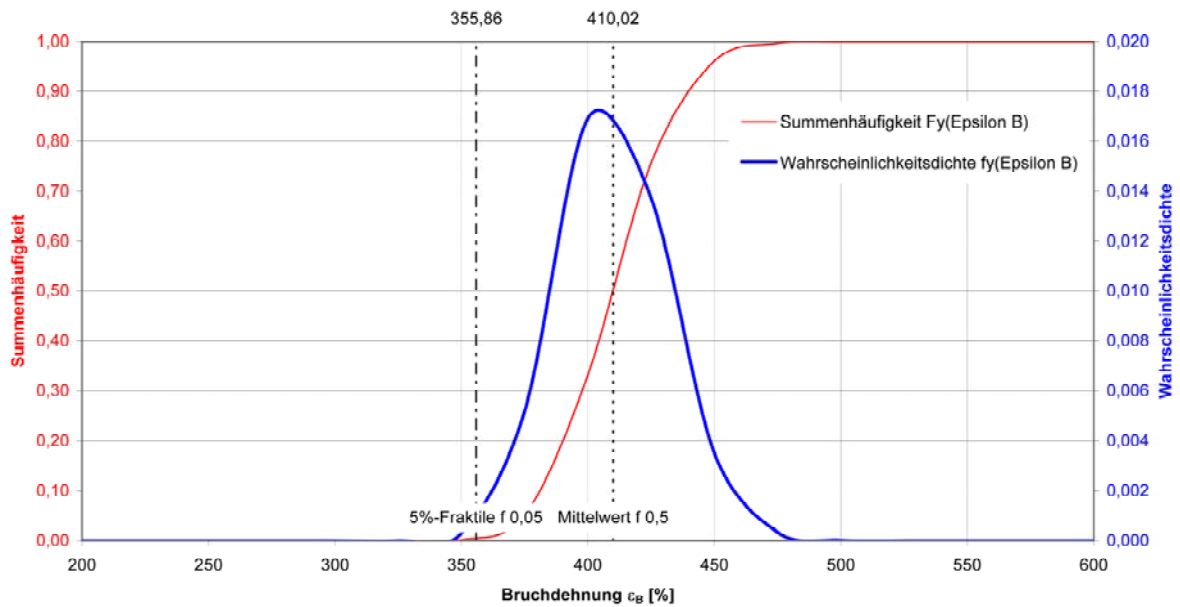


Abb. 4.31 Bruchdehnung der Schweißnaht quer zur Extrusionsrichtung  $\epsilon_{B,200,SN,E}$  : Verteilungsfunktion, Wahrscheinlichkeitsdichte, Mittelwert und 5%-Fraktile für 5 Proben

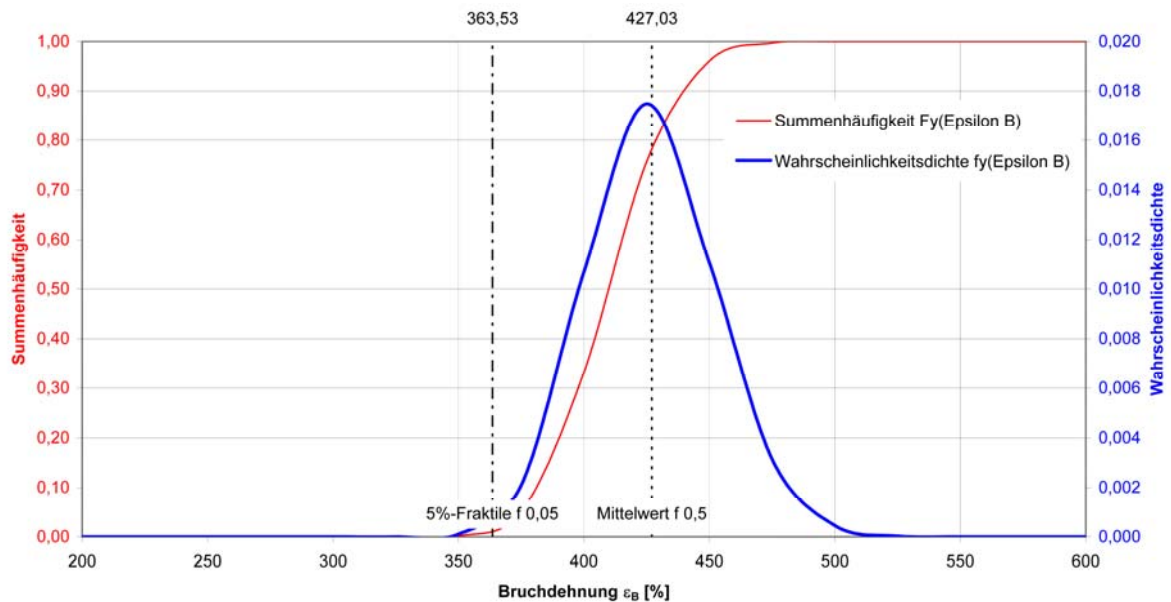


Abb. 4.32 Bruchdehnung der Schweißnaht quer zur Querrichtung  $\epsilon_{B,200,SN,Q}$  : Verteilungsfunktion, Wahrscheinlichkeitsdichte, Mittelwert und 5%-Fraktile für 5 Proben

#### 4.3.4 FE-Simulationen zur Abschätzung des Einflusses der Probengeometrie

Monoaxialversuche mit unterschiedlichen Probenbreiten zeigen, dass das Verhältnis von Probenbreite zu Probenlänge  $b_0/l_0$  einen Einfluss auf die Messergebnisse hat. Die Behinderung der Dehnung in Querrichtung  $\varepsilon_y$  führt zu einem mehrachsigen ebenen Spannungszustand. Die Dehnungen in Breitenrichtung  $\varepsilon_y$  bleiben im Bereich der Einspannungen nicht mehr spannungslos, Damit wäre der Ansatz des einachsigen Spannungszustandes ungültig. Hingegen wird die Querkontraktion in Dickenrichtung nicht behindert ( $\sigma_z = 0; \varepsilon_z \neq 0$ ). Es gelten daher an den Einspannungen unter Berücksichtigung der behinderten Querkontraktion (s. Kap. 4) näherungsweise die folgende Beziehungen (HOOKE) für den ebenen Spannungszustand eines homogenen und isotropen Werkstoffs:

$$\varepsilon_y = 0 \quad (4.5)$$

$$\sigma_x = \frac{E_S}{1-\nu^2} \varepsilon_x \quad (4.6)$$

$$\sigma_y = \nu \sigma_x \quad (4.7)$$

$$E_S = (1-\nu^2) \frac{\sigma_x}{\varepsilon_x} \quad (4.8)$$

Die Begründung der prinzipiellen Abhängigkeit der Bruchfestigkeit und der Bruchdehnung vom Verhältnis der Probenbreite zur freien Einspannlänge  $b_0/l_0$  liefert die Betrachtung der folgenden Abbildungen: Abb. 4.33 a und b zeigen eine 1.000 mm breite Probe ohne und mit Belastung, Abb. 4.33 c und d zeigen eine 50 mm breite Probe unter Belastung und nach dem Bruch.

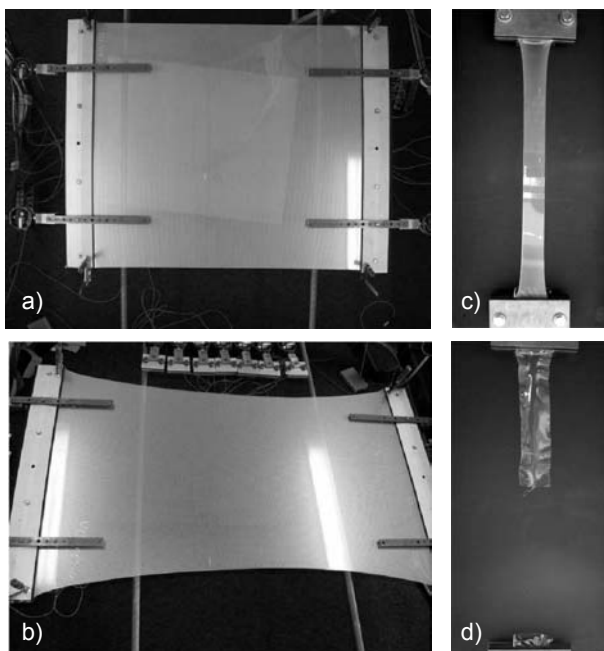


Abb. 4.33

Monoaxialer Zugversuch an 1.000 mm breiten ETFE-Streifenproben: a) unbelastet, b) belastet, sowie an 50 mm breiten ETFE-Streifenproben: c) belastet, d) nach dem Bruch; Fotos: R. BLUM, 2004

Während Proben mit einem kleinen Verhältnis  $b_0/l_0$  häufig in der Nähe der Probenmitte versagen, also an der Stelle maximaler Einschnürung (minimalen Querschnitts), verlagert sich der Bruch bei den breiten Proben in den Bereich der behinderten Querdehnung an der Einspannung. Der mehrachsige ebene Spannungszustand verhindert lokal die Fließausbreitung und leitet ggf. sogar einen Sprödbruch (s. Anhang D, Kap. D 6.3.1) an der Einspannstelle ein, bevor sich der bei schmalen Proben beobachtete duktile Bruch im Bereich der Querschnittsreduktion in Probenmitte nach langem Fließbereich ausbilden kann.

Die folgenden Beispielrechnungen zeigen FE-Vergleichsrechnungen mit dem Programm ANSYS für die Probenbreite  $b_0$  bei unterschiedlichen Probenlängen  $l_0$ . Die Berechnung wurde mit FE-Schalenelementen des Typs 181 und dem implementierten Werkstoffgesetz MISO durchgeführt, d.h. mit bilinearem, ideal elastisch-plastischem, Werkstoffverhalten. Die simulierten Belastungen betragen 3,0 kN/m (elastisch) und 4,95 kN/m (elastisch-plastisch), Die bei letztgenannter Belastung bilinear angesetzten Steifigkeiten wurden auf der Basis der in dieser Arbeit vorgestellten biaxialen Werkstoffprüfungen abgeschätzt (angesetzte Parameter s. Tab. 4.6, Modellierung des Versuchsaufbaus s. Abb. 4.34).

### Eingabeparameter

<b>Sekantenmodul</b> $E_1$ , bis zur Fließgrenze (für $\sigma \leq \sigma_F = 16 \text{ N/mm}^2$ )	800	N/mm <sup>2</sup>
<b>Tangentenmodul</b> $E_2$ , Fließbereich (für $\sigma > \sigma_F = 16 \text{ N/mm}^2$ )	161	N/mm <sup>2</sup>
<b>Querkontraktionszahl</b> $\nu$	0,45	-
<b>Ausgangspobenddicke</b> $d_0$	225	µm
<b>Ausgangspobendreite</b> $b$	100	mm
<b>Ausgangslängen zwischen den Einspannklemmen</b> $L = l_0$	30; 100; 200; 2.000	mm
<b>Verhältnisse</b> $b/l_0$	3,33; 1,00; 0,50; 0,05	-

Tab. 4.6 Eingabeparameter für FE-Simulationen von Einachsigen Kurzzeitzugversuchen, beispielhaft für  $F = 3,00 \text{ kN/m}$  und  $F = 4,95 \text{ kN/m}$ ; Programm ANSYS

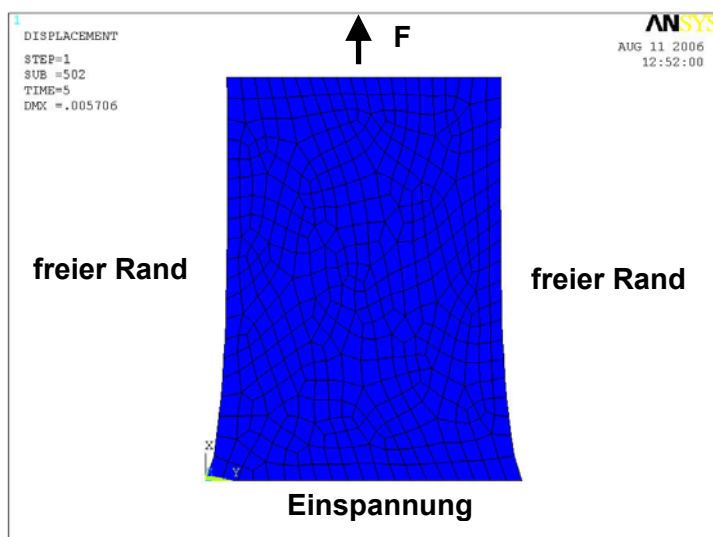
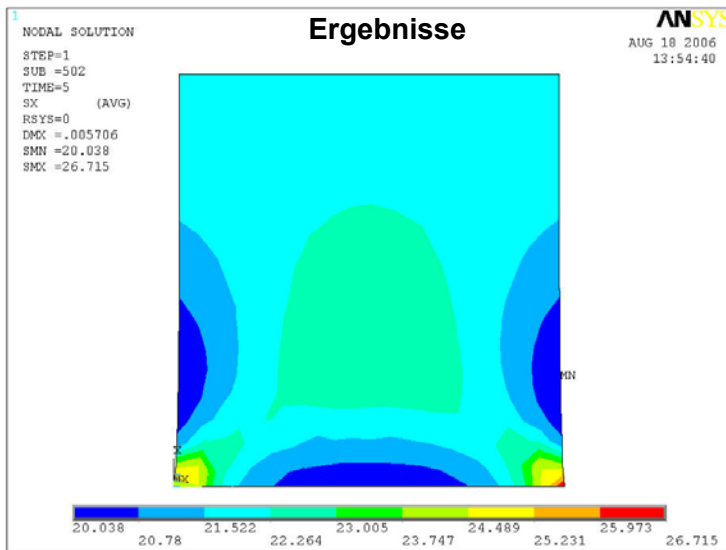


Abb. 4.34 FE-Simulation von ETFE-Streifenproben, Programm ANSYS: FE-Netz (halbes System, verformter Probekörper, dargestellt für  $b = 100 \text{ mm}$ ,  $l_0/2 = 100 \text{ mm}$ ,  $F = 4,95 \text{ kN/m}$ )

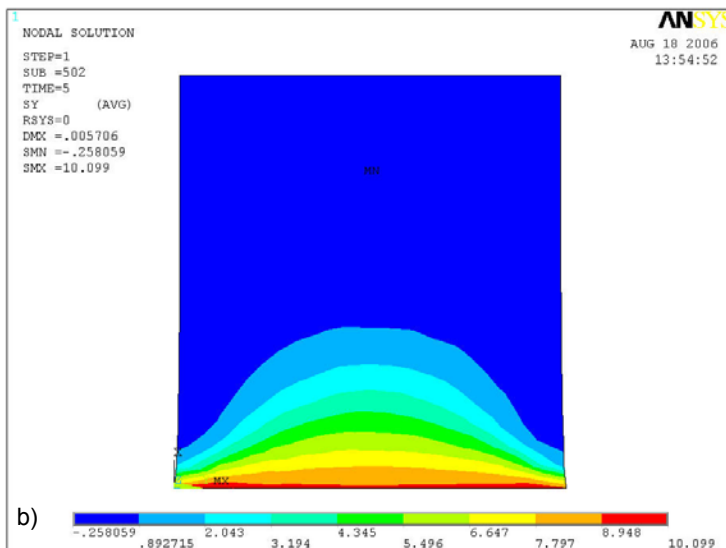


a)

Abb. 4.35 zeigt die Normalspannungen in x- und y- Richtung ( $\sigma_{11}, \sigma_{22}$ ) sowie die der x-y-Ebene zugeordneten Schubspannungen ( $\sigma_{12} = \sigma_{21}$ ). Die aus der Belastung 4,95 kN/m ermittelte, auf den unverformten Querschnitt bezogene Normalspannung in x-Richtung beträgt:

$$\sigma_x = \frac{F}{A_0} = \frac{4,95}{100 \cdot 0,225} = 22,00 \frac{N}{mm^2} \quad (4.9)$$

Dieser Wert wird nach Abb. 4.35 (a) in der Mitte der Probe ( $x = l_0 / 2$ ) auch etwa erreicht. In den Eckbereichen der Einspannung ergibt sich jedoch der Maximalwert  $\max \sigma_x = 26,72 \text{ N} / \text{mm}^2$ . In y-Richtung ergeben sich nach Abb. 4.35 (b) an der Einspannung Normalspannungen bis  $\max \sigma_y = 10,90 \text{ N} / \text{mm}^2$ . Die



Normalspannungen in z-Richtung sind in der gesamten Probe Null (nicht abgebildet). Die Auswirkungen der behinderten Querkontraktion in der Ebene an der Einspannung sind deutlich zu erkennen, da sich dort ein mehrachsiger ebener Spannungszustand ausbildet. Dies wird auch durch die Schubspannungen deutlich, die in Abb. 4.35 (c) dargestellt sind. Sie betragen an der Einspannung  $\max \sigma_{xy} = 5,07 \text{ N} / \text{mm}^2$ .

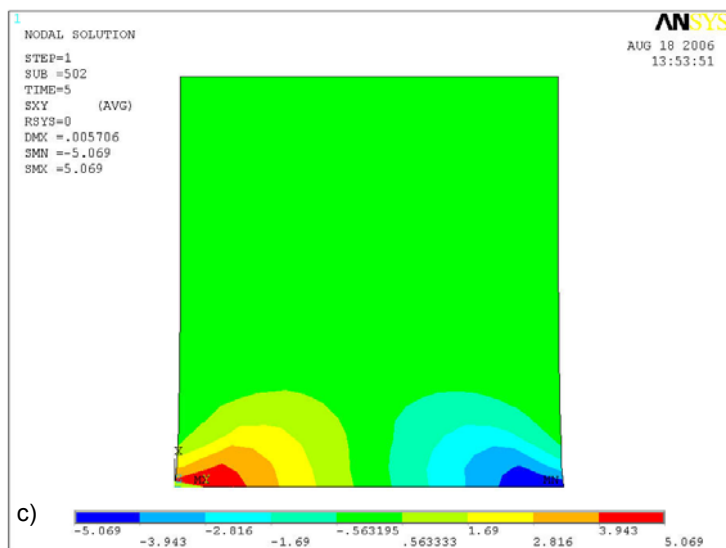


Abb. 4.35  
FE-Simulation eines monoaxialen Zugversuchs an breiten ETFE-Streifenproben, für  $F = 4,95 \text{ kN/m}$ ; Programm ANSYS:

- a) Normalspannung  $\sigma_{11} = \sigma_x$
  - b) Normalspannung  $\sigma_{22} = \sigma_y$
  - c) Schubspannung  $\sigma_{12} = \sigma_{21} = \sigma_{xy} = \sigma_{yx}$
- nicht abgebildet: Normalspannung  $\sigma_{33} = 0$

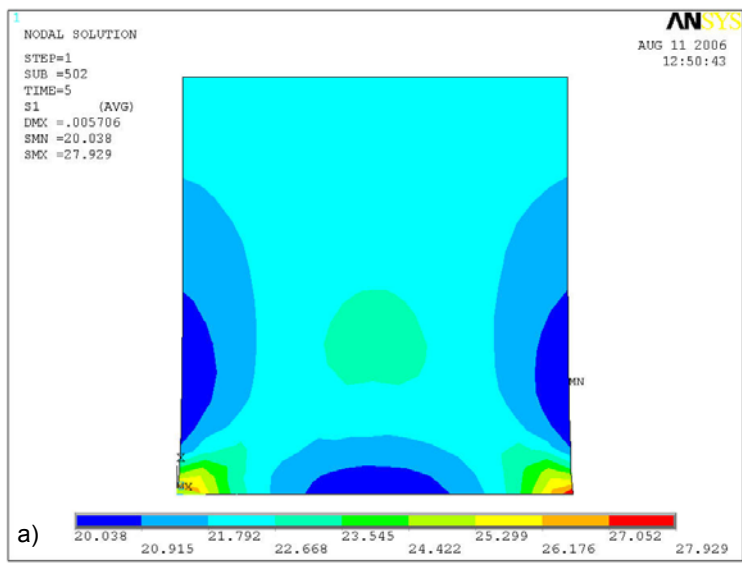
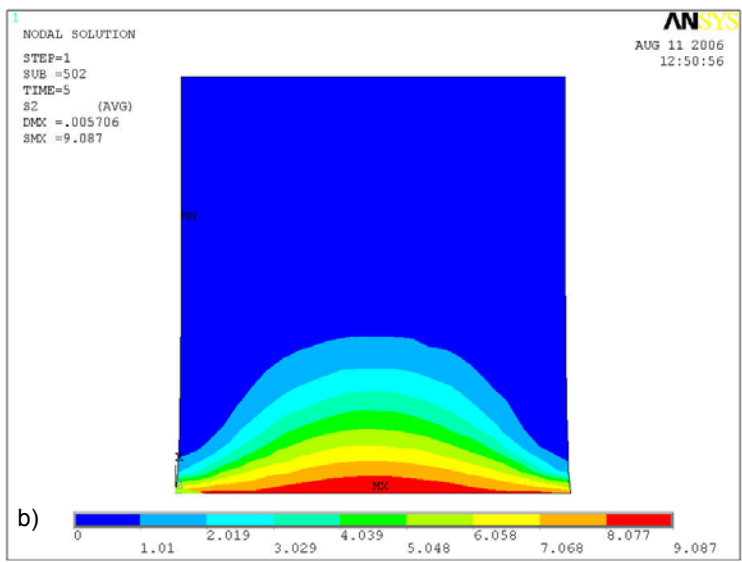


Abb. 4.36 zeigt die Hauptspannungen ( $\sigma_I, \sigma_{II}$ ) und die Vergleichsspannung nach VON MISES ( $\sigma_M$ ). Die Spitzenwerte treten jeweils in den Ecken der Einspannstelle des Probekörpers auf, also dort, wo Probekörper mit einem großen Breiten-Längenverhältnis im Normalfall auch versagen. Der Maximalwert der beiden Hauptspannungen beträgt:

$$\max \sigma = \max \sigma_I = 27,93 \text{ N/mm}^2.$$

Er ist somit etwas größer als die maximale Normalspannung nach Abb. 4.35 ( $\max \sigma_x = 26,72 \text{ N/mm}^2$ ).



Der Maximalwert der Vergleichsspannung nach VON MISES beträgt  $\max \sigma_M = 24,97 \text{ N/mm}^2$ .

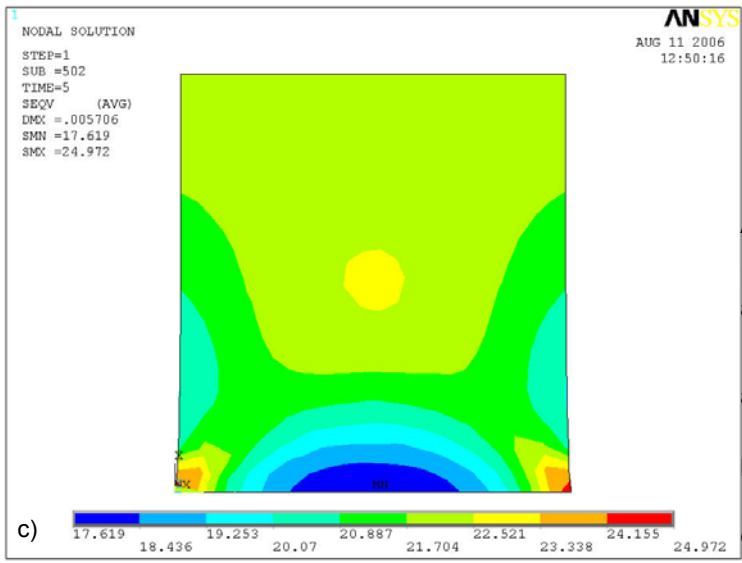


Abb. 4.36  
FE-Simulation eines monoaxialen Zugversuchs an breiten ETFE-Streifenproben, für  $F = 4,95 \text{ kN/m}$ ; Programm ANSYS:

- a) Hauptspannung  $\sigma_I$
- b) Hauptspannung  $\sigma_{II}$
- c) Vergleichsspannung nach VON MISES  $\sigma_M$

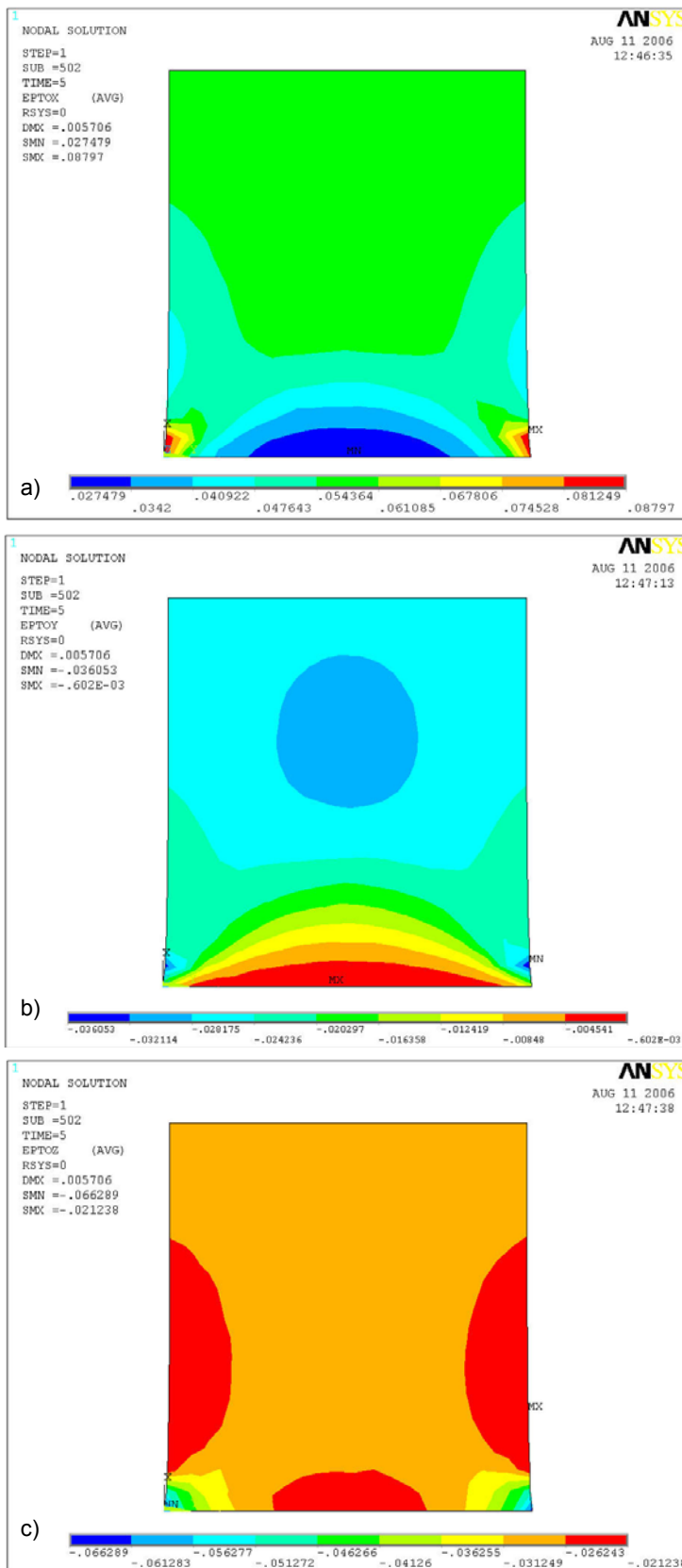


Abb. 4.37 zeigt die Dehnungen in x-, y- und z-Richtung ( $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{33}$ ). Die Dehnungen in Probenmitte des verformten Systems ( $x = l_v / 2$ , Index v = verformt) ergeben sich näherungsweise zu:

$$\varepsilon_{x(x=l_v/2)} \cong +0,06, \quad \varepsilon_{y(x=l_v/2)} \cong -0,03 \quad \text{und} \quad \varepsilon_{z(x=l_v/2)} \cong -0,03.$$

Die Verhältnisse entsprechen der Querkontraktionszahl  $\nu = 0,45$ . Bezieht man die Spannung nicht auf den Ausgangsquerschnitt  $A_0 = b_0 \cdot d_0$ , sondern als Spannung, bezogen auf den Querschnitt am verformten System  $A_v = b_v \cdot d_v$ , ergibt sich mit den drei

Dehnungen (in x-, y- und z-Richtung) die rechnerische Normalspannung in Längsrichtung (x-Richtung) in Probenmitte  $\hat{\sigma}_{x(x=l_v/2)}$  zu:

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_x &= \frac{F}{A_v} = \frac{4,95}{(1 - 0,03)^2 \cdot 100 \cdot 0,225} \\ &= 23,38 \frac{N}{mm^2} \end{aligned} \quad (4.10)$$

Die Normalspannung  $\hat{\sigma}_{x(x=l_v/2)}$  ist in Probenmitte also etwa 6 % größer, als die auf den Ausgangsquerschnitt bezogene Normalspannung  $\sigma_{x(x=l_0/2)}$ . Im Eckbereich der

Einspannklemmen ergeben sich die größten Längszunahmen in x-Richtung und die größten Kontraktionen in y- und z-Richtung. Die Dehnungen betragen dort  $\max \varepsilon_x = +0,088$ ;  $\min \varepsilon_y = -0,036$ ,  $\min \varepsilon_z = -0,066$ . Alle drei Dehnungen sind dort deutlich größer als in Probenmitte, so dass hier auch die größten Spannungen auftreten und der Bruch erwartet werden kann.

Abb. 4.37: FE-Simulation eines monoaxialen Zugversuchs an breiten ETFE-Streifenproben, für  $F = 4,95$  kN/m; Programm ANSYS:

- a) Dehnung in x-Richtung  $\varepsilon_{11}$
- b) Dehnung in y-Richtung  $\varepsilon_{22}$
- c) Dehnung in z-Richtung  $\varepsilon_{33}$

Die FE-Vergleichsrechnungen zeigen, dass sich aufgrund der Behinderung der Querkontraktion an den Einspannungen inhomogene mehrachsige ebene Spannungszustände ausbilden, die je nach Probengeometrie und Spannungsniveau in die Fläche hineinwirken. Die in den Probekörperecken auftretenden Maxima der Hauptspannungen können wesentlich höher sein, als die Normalspannung in Probenmitte. Die Reduktion der Probendicke in den Ecken der Einspannungen ( $\varepsilon_z \neq 0$ ) forciert die Zunahme der tatsächlichen Spannungen.

In wie weit das Verhältnis von Probenbreite  $b_0$  zu Probenlänge  $l_0$  einen Einfluss auf die Fließ- und Bruchspannungen im Versuch hat, wäre in quantitativer Hinsicht noch im Versuch zu zeigen. Bisher durchgeführte Versuche lassen aber erkennen, dass breitere Proben (bei gleicher Probenlänge und Prüfungsgeschwindigkeit) eine geringere, auf den Ausgangsquerschnitt bezogene Bruchspannung erreichen, als schmale Proben.

Folgerichtig versagen breitere Proben eher an der Einspannung und erreichen eine geringere Gesamtdehnung. Schmale Proben reißen im Normalfall in der ungestörten (monoaxial beanspruchten) Probenmitte nach der Ausbildung einer ausgeprägten Fließzone in diesem Bereich. Dies deutet darauf hin, dass bei einem großen Verhältnis  $b_0/l_0$  in den Ecken bereits die Bruchspannung erreicht wird, bevor sich in der ungestörten Probenmitte eine Fließzone ausbilden kann.

Es sei angemerkt, dass die Berechnungen nicht dem Nachfahren von aufgezeichneten Spannungs-Dehnungsbeziehungen bis zum Bruch dienen. Es sei aber angemerkt, dass das FE-Programm ANSYS diese Möglichkeit auch für den materiell nichtlinearen Bereich bietet.

Abb. 4.38 zeigt die Ergebnisse aus der rechnerischen Simulation für unterschiedliche Verhältnisse von Probenbreite  $b_0$  zu Probenlänge  $l_0$  für die Belastung  $F = 3,00 \text{ kN/m}$ . Abb. 4.38 (a) zeigt die Maxima der Hauptspannungen ( $\sigma_I, \sigma_{II}$ ), der Normalspannungen ( $\sigma_x, \sigma_y$ ), der Schubspannungen  $\tau_{xy}$  und der Vergleichsspannungen nach VON MISES  $\sigma_M$ . Zum Vergleich wurde die (auf den verformten Querschnitt bezogene Normalspannung) in Zugrichtung in Probenmitte  $\sigma_{x(x=l_0/2)}$  aufgetragen. Sie entspricht der auf den Ausgangsquerschnitt bezogenen Normalspannung:

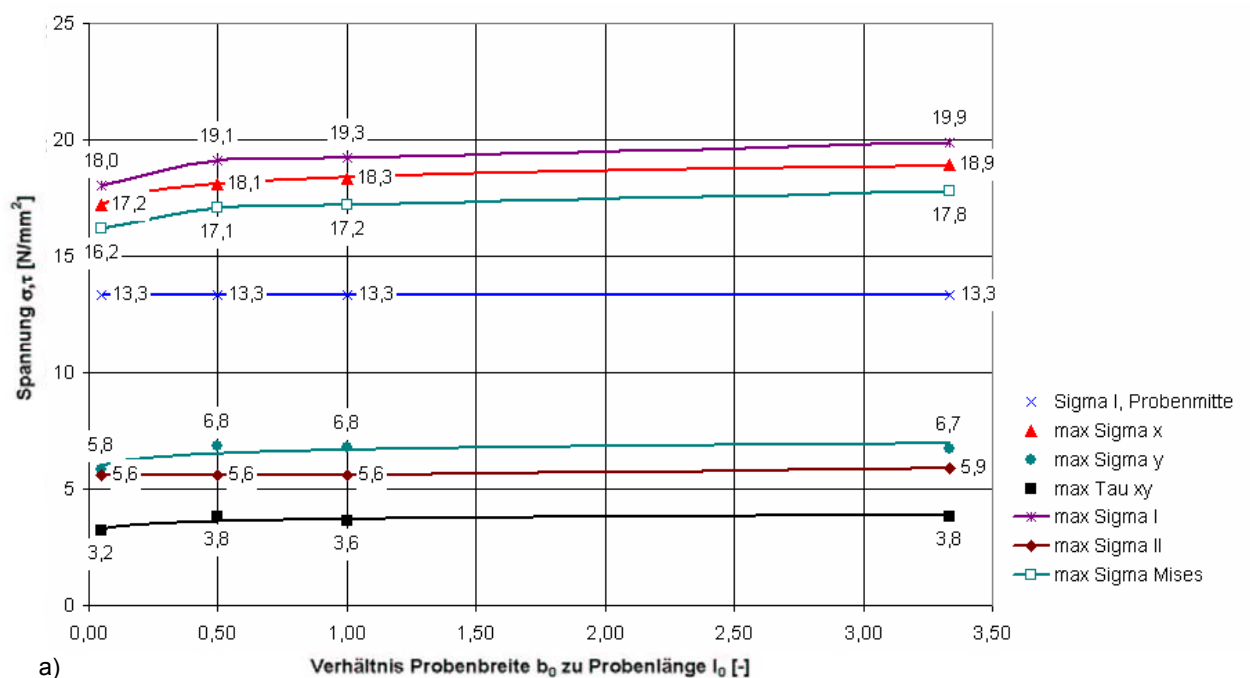
$$\sigma = \frac{N}{A_0} = \frac{3,0 \text{ kN/m}}{0,25 \text{ mm}} = 13,33 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (4.11)$$

Aus den Diagrammen ist ablesbar, dass der Maximalwert der Hauptspannung  $\sigma_I$  immer größer ist, als die Normalspannung in Probenmitte. Mit zunehmendem Verhältnis  $b_0/l_0$  nimmt die Abweichung zu, allerdings ab dem Verhältnis  $b_0/l_0 \cong 0,5$  nur noch mit geringer Steigung.

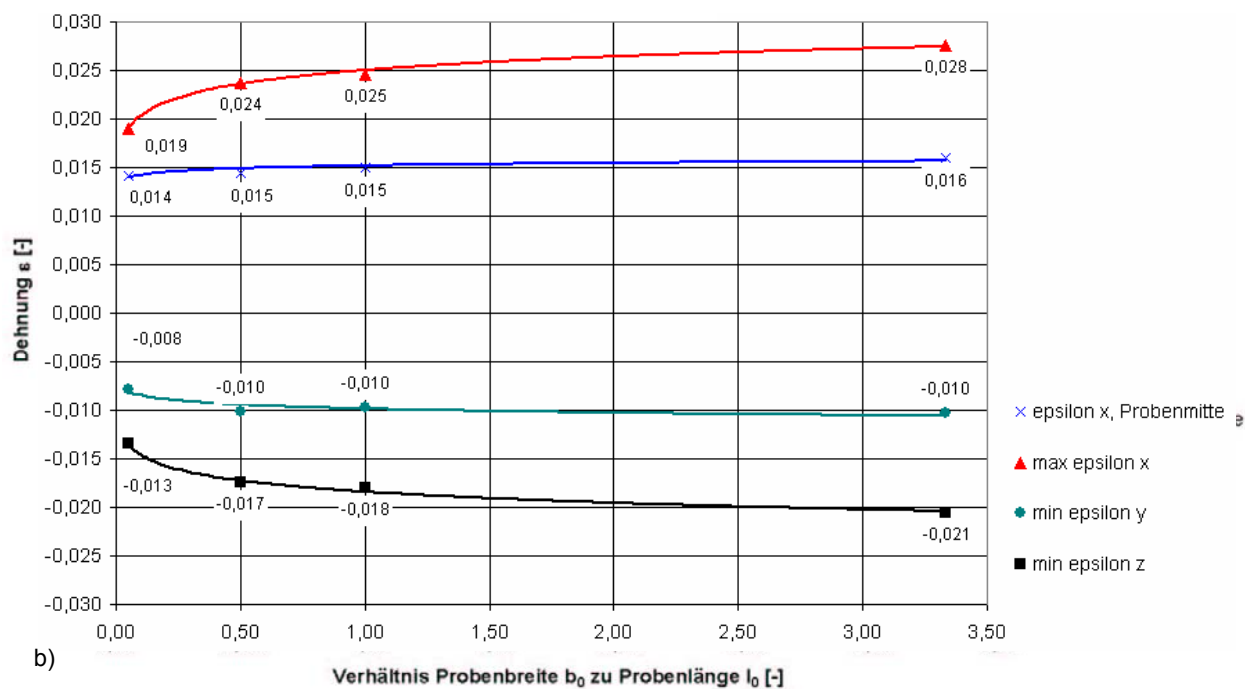
Abb. 4.38 (b) zeigt die Maxima und Minima der drei Dehnungen  $\varepsilon_x, \varepsilon_y$  und  $\varepsilon_z$ . Auch bei der Dehnung ist eine Abhängigkeit vom Verhältnis  $b_0/l_0$  erkennbar. Die Differenz der Dehnungen zum Vergleichswert in Probenmitte  $\varepsilon_x(x=l_0/2)$  verhält sich analog zu den Spannungen.

Um dem einachsigen Spannungszustand möglichst nahe zu kommen, ist demnach das Verhältnis von Probenbreite zu Probenlänge  $b/l_0$  möglichst klein zu wählen. Von breiteren Streifenproben, als in DIN ISO 527 empfohlen, ist auch aus Gründen der Vergleichbarkeit von Versuchsergebnissen abzusehen.





a)



b)

- $\text{Sigma}_{I,II}$  =  $\sigma_{I,II}$  (Hauptspannungen I und II)
- $\text{Sigma}_{x,y}$  =  $\sigma_{x,y}$  (Normalspannungen in x- und y-Richtung)
- $\text{Tau}_{xy}$  =  $\tau_{xy}$  (Schubspannungen in x-y-Ebene)
- $\text{Sigma}_{Mises}$  =  $\sigma_M$  (Vergleichsspannung nach VON MISES)
- $\text{Epsilon}_{x,y,z}$  =  $\epsilon_{x,y,z}$  (Dehnungen in x-, y und z-Richtung)

Abb. 4.38 Ergebnisse aus FE-Vergleichsrechnung eines Monoaxialversuchs mit dem Programm ANSYS;  $F = 3,00 \text{ kN/m}$ ;  $d = 225 \text{ }\mu\text{m}$ : a) auf den Verformten Querschnitt bezogene Spannungen und b) Dehnungen für verschiedene Verhältnisse  $b_0 / l_0$ .

## 4.4 Biaxiale Kurzzeitzugversuche

### 4.4.1 Allgemeines

Biaxiale Kurzzeitzugversuche dienen der Ermittlung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens von Gewebemembranen und Folien bei unterschiedlichen ebenen Spannungszuständen ( $\sigma_I : \sigma_{II} = 1:1, 2:1, 3:1, 4:1$  etc.). Nach SAXE und KOENEN 1991 [164] wurde bereits im Jahr 1913 von HAAS in Berlin eine Arbeit vorgelegt, in der zweiachsige Messungen für beschichtete Gewebe im Ballon- und Luftschiffbau beschrieben werden.

Bislang gibt es keine spezielle Norm für Biaxialversuche. Die Versuche können kraft- oder weggesteuert durchgeführt werden. Die Dehnungen werden sowohl über die Messung des Traversenweges der Zugvorrichtung als auch über mittig auf die Probe aufgebrachte induktive Wegaufnehmer, externe Laserabtastung oder mit einem Infrarot-Kamerasystem in Kombination mit entsprechend reflektierenden Markierungen auf dem Probekörper erfasst. Mittels einer Temperierkammer können die Versuche bei verschiedenen Temperaturen gefahren werden.

Die Bruchgrenze der Folie ist mit derartigen Biaxialversuchen nicht messbar, da die Arme, an welchen die Spannvorrichtungen angreifen, vorzeitig fließen und die ausgerundeten Ecken aufgrund des lokalen mehrachsigen Spannungs- und Dehnungszustandes frühzeitig versagen.

Die vier Arme der kreuzförmigen Proben werden normalerweise geschlitzt, damit die Kräfte möglichst achsenparallel und ohne Dehnungsbehinderung in Querrichtung in das mittig angeordnete Messfeld eingeleitet werden.

In Deutschland gibt es viele Labors, die über biaxiale Messtische verfügen, aber nur wenige sind auf das bei Folien sehr geringe Spannungsniveau bei hohen Dehnungen eingestellt und haben die erforderliche Antriebs-, Mess- und Regeltechnik. Zudem bedarf es entsprechender Erfahrung bei der Prüfung und Interpretation der Versuche an den schubsteifen Folienmembranen. Abb. 4.39 zeigt zwei biaxiale Messtische mit unterschiedlichen Probengeometrien und differenter Antriebs-, Mess- und Regeltechnik.

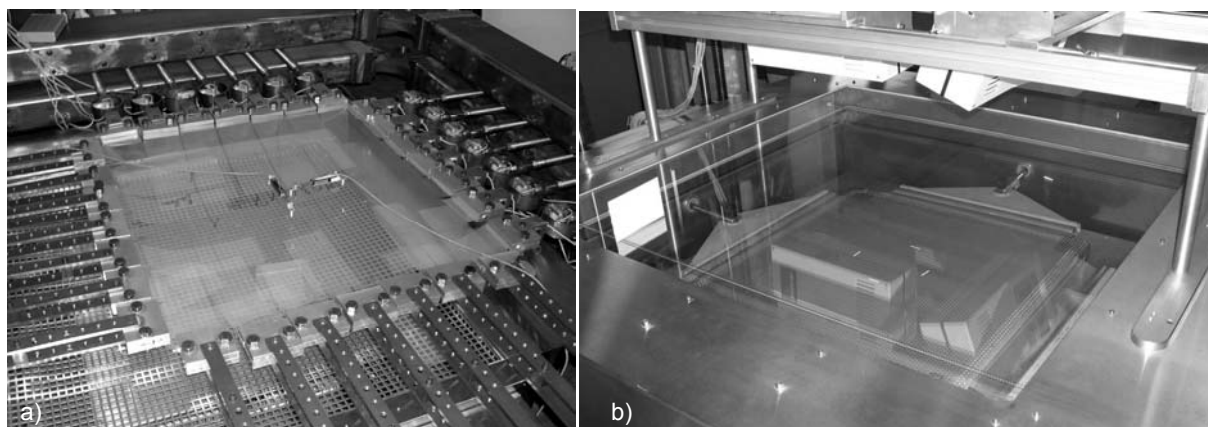


Abb. 4.39 Versuchseinrichtungen (Biaxialtische) zur Messung mehrachsiger ebener Spannungszustände von Membranen: a) LABOR DR. BLUM, Stuttgart, Foto: R. BLUM, 2004; b) BAUER MEMBRANBAU, Rimsting, Foto: K. MORITZ, 2005

#### 4.4.2 Aufbau und Auswertung der Versuche

Die biaxialen Kurzzeitzugversuche an ETFE-Kreuzproben wurden mit der Folie<sup>®</sup> ASAHI FLUON NJ 250  $\mu\text{m}$  im Labor des konstruktiven Ingenieurbaus, Fachbereich 10 – Bauwesen, der Universität Duisburg-Essen, unter der Leitung von Herrn Dipl.-Ing. Klaus SAXE durchgeführt (s. Kap. 4.1). Die Steuerung erfolgte mit konstanter Kraftaufbringung pro Zeiteinheit. Die Probengeometrie ist in Abb. 4.40 skizziert.

Die im folgenden dargestellten Auswertungen beziehen sich nur auf einen Teil der von SAXE gewonnenen Rohdaten, da im Hinblick auf den begrenzten Umfang der Arbeit hier im wesentlichen die Zeit- und Temperaturabhängigkeit der Werkstoffeigenschaften und Bemessungskennwerte herausgearbeitet werden soll. Die Auswertung basiert auf der Basis der in Anhang D dargestellten mechanischen Grundlagen.

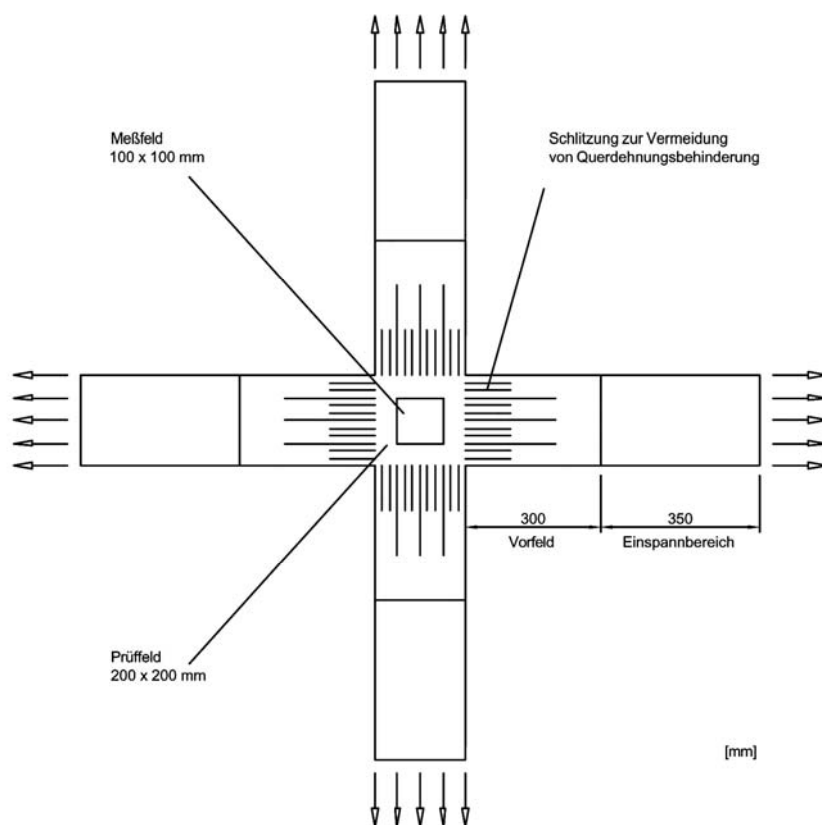


Abb. 4.40

Prinzipielle Probengeometrie, bestehend aus Messfeld, Prüffeld, Vorfeld mit Schlitzung und Einspannbereich; Labor des konstruktiven Ingenieurbaus, Fachbereich 10 – Bauwesen, Universität Duisburg-Essen; Quelle: BAUMANN 2002 [216] (s. auch SAXE und BAIER 1998 [163] (vgl. auch REINHARDT 1975 [151])

Die Messgrößen sind die mittels Infrarotkamera aufgenommenen Verschiebungen der 4 Eckpunkte des Messfeldes in der x-y-Ebene. Aus den gemessenen Verschiebungen wurden durch die Messtechnik je Eckpunkt zwei Dehnungsdaten ( $\varepsilon_x$  und  $\varepsilon_y$ ), bezogen auf die Ausgangslängen ermittelt.

Es stellt sich im Versuch ein ebener symmetrischer Spannungszustand ein, in dem die beiden Achsenrichtungen x und y die Hauptspannungsrichtungen I und II darstellen ( $\tau = 0, \gamma = 0$ ). Bei symmetrischer Krafteinleitung sowie isotropem und homogenem Verhalten des Probekörpers sind die beiden Dehnungen in einer Achsenrichtung idealerweise identisch. Auftretende Differenzen wurden gemittelt.

Die aufgebrachte Belastung  $F$  [kN/m] wurde unter Bezug auf den Ausgangsquerschnitt  $A_0$  in die Spannung  $\sigma = F/A_0$  umgerechnet. Die Berechnung der Steifigkeitsgrößen (Sekantenmodul  $E_S$  und Querkontraktionszahl  $\nu$ ) erfolgte mit den Gleichungen des ebenen Spannungszustandes für linear elastisches Werkstoffverhalten nach den Gleichungen für die beiden Hauptspannungsrichtungen I und II. Wie in Anhang D beschrieben, darf nach GRELLMANN 2005 [66] das HOOKE'sche Gesetz auch zur Beschreibung des linear viskoelastischen Verhaltens herangezogen werden.

$$\text{Hauptspannung 1} \quad \sigma_I = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_I + \nu \varepsilon_{II}) \quad (\text{s. 4.12})$$

$$\text{Hauptspannung 2} \quad \sigma_{II} = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_{II} + \nu \varepsilon_I) \quad (\text{s. 4.13})$$

$$\Rightarrow \text{Querkontraktionszahl} \quad \nu = \frac{(\varepsilon_I/\sigma_I) - (\varepsilon_{II}/\sigma_{II})}{(\varepsilon_I/\sigma_{II}) - (\varepsilon_{II}/\sigma_I)} \quad (\text{s. 4.14})$$

$$\Rightarrow \text{E-Modul (Sekantenmodul)} \quad E = \frac{1-\nu^2}{\varepsilon_I + \nu \varepsilon_{II}} \cdot \sigma_I = \frac{1-\nu^2}{\varepsilon_{II} + \nu \varepsilon_I} \cdot \sigma_{II} \quad (\text{s. 4.15})$$

### 4.4.3 Zyklische biaxiale Versuche bei verschiedenen Temperaturen

#### 4.4.3.1 Versuchsbedingungen

Die hier ausgewerteten biaxialen Kurzzeitzugversuche mit zyklischer Lastaufbringung (s. Kap. 4.1.3) wurden am Folienmaterial<sup>®</sup> ASAHI FLUON ETFE NJ ( $d = 250 \mu\text{m}$ ) durchgeführt. Die Auswertung dient der Ermittlung des Einflusses der Temperatur auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten der Folie bis zur Fließgrenze bzw. etwas darüber hinaus. Der untersuchte mehrachsige ebene Spannungszustand (biaxiales Beanspruchungsverhältnis 3:1) orientierte sich an dem aus einer Vorbemessung [133] für das Foliendach der AWD-Arena resultierenden Spannungsverhältnis an Orten maximaler Spannungen.

Die im Labor des konstruktiven Ingenieurbaus der Universität Duisburg-Essen (s. Kap. 4.2) durchgeführten Versuche erfolgten für 4 Temperaturstufen ( $-25^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $+23^{\circ}\text{C}$  und  $+35^{\circ}\text{C}$ ) um den Einfluss verschiedener Temperaturen auf den Werkstoff und seine Kennwerte zu erfassen. Die erhöhten und abgesenkten Temperaturen wurden mit einer im o.g. Labor vorhandenen Temperierkammer geregelt und konstant gehalten. Der damit berücksichtigte Temperaturbereich wurde zwischen den Projektbeteiligten unter Berücksichtigung der nach Normung anzusetzenden Temperaturen, der möglichen Überlagerung von Windkräften und Temperaturbeanspruchungen sowie der im Labor realisierbaren Prüfbedingungen vereinbart. Es erfolgten noch eine Reihe weiterer Versuche, die aus Anlass des Projektes AWD Arena am o.g. Labor durchgeführt wurden, deren Auswertung hier jedoch nicht dargestellt ist.

Die zyklische Belastung ist hier für acht Lastniveaus bei jeweils konstantem biaxialen Belastungsverhältnis dargestellt. Einige der Versuche wurden auf einem geringeren Lastniveau begonnen, was hier aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit der Temperaturstufen nicht dargestellt ist. Darüber hinaus wurden von SAXE et. al. im Anschluss an das hier ausgewertete Lastprogramm die Rückdehnungen über einen längeren Zeitraum aufgezeichnet und die Proben anschließend noch einmal zyklisch belastet. Dieses zweite Lastprogramm diente der Messung der Steifigkeitsänderung nach der Entlastungsphase. Im Hinblick auf das primäre Ziel, die Einflüsse von Temperatur und Prüf- bzw. Dehngeschwindigkeit auf das Werkstoffverhalten zu erfassen und zu separieren, sowie im Hinblick auf den zu begrenzenden Umfang der vorliegenden Arbeit wurde hier auf die Darstellung dieses zweiten Teiles der Versuche verzichtet.

Die Bezeichnungen der beiden Hauptachsen I und II weichen hier von der konventionellen Bezeichnung ab: Achse II (Querrichtung) ist hier die Hauptbeanspruchungsrichtung, Achse I (Extrusionsrichtung) die weniger beanspruchte Richtung. Die Lastschritte wurden von SAXE (in Abstimmung mit dem Tragwerksplaner der seilgestützten ETFE-Folie und anderen Projektbeteiligten) unter Berücksichtigung der in situ auftretenden Gebrauchs- und Bemessungsspannungen in einem Prüfprogramm festgelegt. Die Last- und Spannungsstufen sind in Tab. 4.7, die Versuchsbedingungen in Tab. 4.8 dargestellt. Die einzelnen Schritte der Lastspannungen sind in Abb. 4.41 dargestellt.

Last- und Spannungsstufen		1	2	3	4	5	6	7	8
Belastung Achse I (Extrusionsrichtung)	$F_I \left[ \frac{\text{kN}}{\text{m}} \right]$	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
	$\sigma_I \left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$	3,2	3,6	4,0	4,4	4,8	5,2	5,6	6,0
Belastung Achse II (Querrichtung)	$F_{II} \left[ \frac{\text{kN}}{\text{m}} \right]$	2,4	2,7	3,0	3,3	3,6	3,9	4,2	4,5
	$\sigma_{II} \left[ \frac{\text{kN}}{\text{lm}} \right]$	9,6	10,8	12,0	13,2	14,4	15,6	16,8	18,0

Tab. 4.7 8 Laststufen, zyklischer Biaxialversuch, Spannungsverhältnis 3:1, ®ASAHI ETFE-Folie FLUON NJ, d = 250 µm

Spannungsstufen 1 - 8

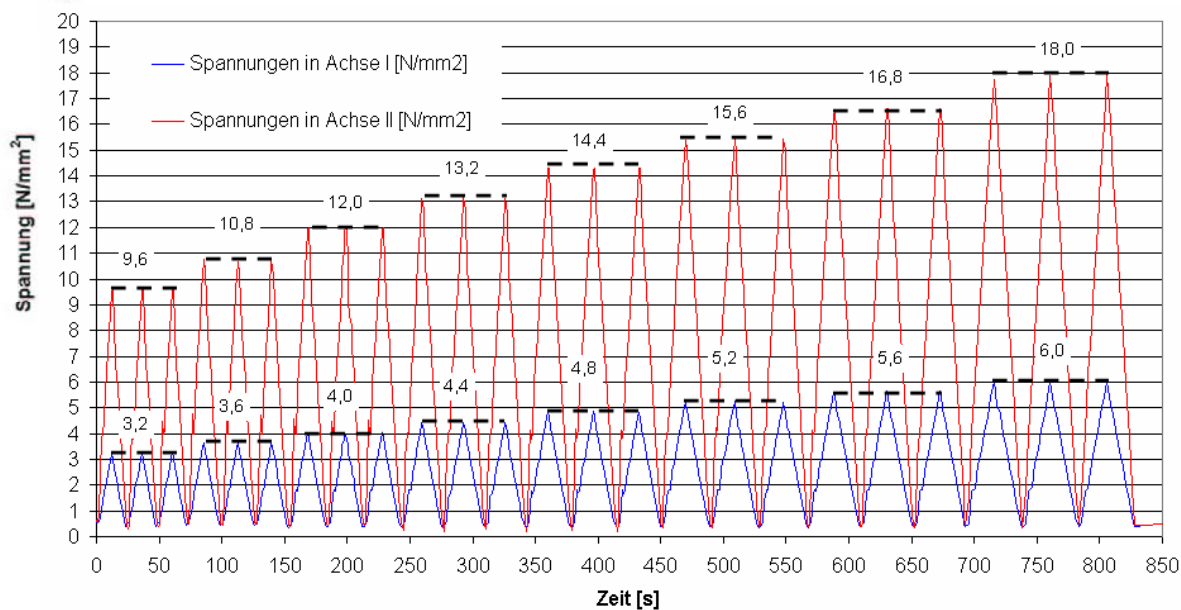


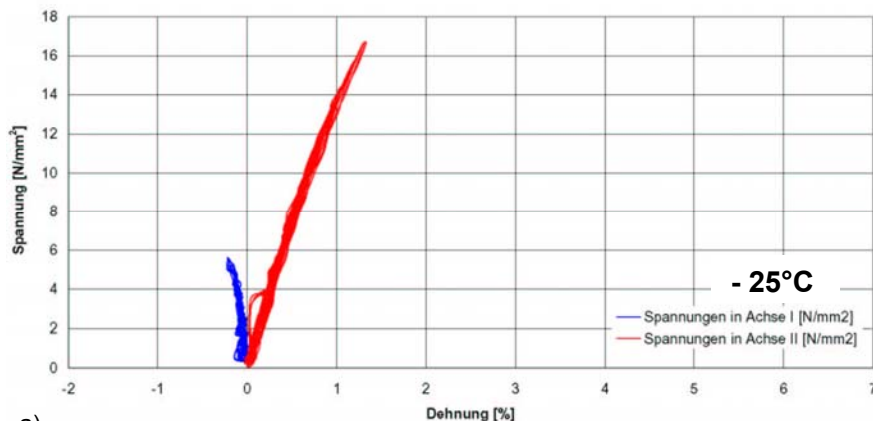
Abb. 4.41 Spannung-Zeit-Diagramm bei +23°C (t = 0 – 850 s): 8 Lastzyklen à 3 Belastungen; Laststeigerungsraten: Achse I: 0,4 N/mm<sup>2</sup>, Achse II: 1,2 N/mm<sup>2</sup>; Prüfgeschwindigkeiten: Achse I:  $V_{T,I} \approx 0,07 \text{ kN} / \text{m} / \text{s}$ ; Achse II  $V_{T,II} = 0,2 \text{ kN} / \text{m} / \text{s}$ ; Achse I = Extrusionsrichtung; Achse II = Querrichtung, ®ASAHI ETFE-Folie FLUON NJ, d = 250 µm

Auf jeder Laststufe wurde dreimal bis zu den eingestellten Kräften be- und entlastet. Die Laststeigerung von Stufe zu Stufe erfolgte in 0,3 kN/m-Schritten mit einer in der Hauptbeanspruchungsrichtung (Achse II)  $v_{t,II} = 0,20$  kN/m/s. Da beide Beanspruchungsrichtungen ihre Maximalbeanspruchung gleichzeitig erreichen sollten, ergibt sich die Prüfgeschwindigkeit in Achse I zu  $v_{t,I} \cong 0,07$  kN/m/s. Die Prüfgeschwindigkeiten liegen zwischen den in situ erwarteten Dehngeschwindigkeiten der ETFE-Folie bei maximalen Windböen- und Schneebelastungen.

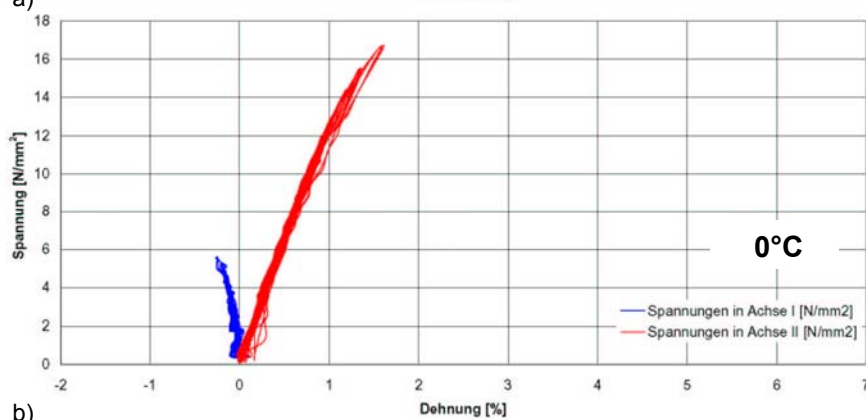
<b>Folienhersteller</b>	®ASAHI GLASS Co., Japan
<b>Material</b>	®ASAHI ETFE-Folie FLUON NJ, transparent
<b>Ort der Prüfung, Datum</b>	Universität Duisburg-Essen, 2004
<b>Prüfart / Norm</b>	biaxial, zyklisch / -
<b>Maschine</b>	Eigenbau; Universität Duisburg-Essen
<b>Prüfer</b>	SAXE, KNOP
<b>Probendicke d</b>	250 $\mu\text{m}$
<b>Abmessungen Messfeld <math>L_M \times L_M</math></b>	100 x 100 mm
<b>Abmessungen Prüffeld <math>L_P \times L_P</math></b>	200 x 200 mm
<b>Prüfgeschwindigkeit <math>v_T</math></b>	$v_{T,II} = 0,2$ (kN/m)/s ; $v_{T,I} \cong 0,07$ (kN/m)/s
<b>Temperaturstufen T</b>	-25° C, 0° C, +23, +35
<b>Lastzyklen (Laststufen)</b>	8
<b>Belastungen <math>n_B</math> pro Laststufe <math>n_Z</math></b>	3
<b>Belastungsverhältnis <math>F_{II} : F_I</math> (<math>\sigma_{II} : \sigma_I</math>)</b>	3:1 (Hinweis: $F_{II} > F_I$ bzw. $\sigma_{II} > \sigma_I$ )
<b>max Belastungshöhe <math>F_{II}</math></b>	2,4 bis 4,5 kN/m (Laststufen siehe Tabelle 4.13)
<b>max Spannungshöhe <math>\sigma_{II}</math></b>	9,6 bis 18,0 N/mm <sup>2</sup> (Spannungsstufen siehe Tabelle 4.13)
<b>Anzahl Proben <math>n_{-25}</math>, <math>n_0</math>, <math>n_{+23}</math>, <math>n_{+35}</math></b>	3, 3, 5, 5 (bei - 25°C, 0°C, + 23°C (Raumtemperatur), + 35°C)

Tab. 4.8 Probekörperabmessungen und Versuchsbedingungen, zyklischer biaxialer Zugversuch, ®ASAHI ETFE-Folie FLUON NJ, 250  $\mu\text{m}$ , transparent

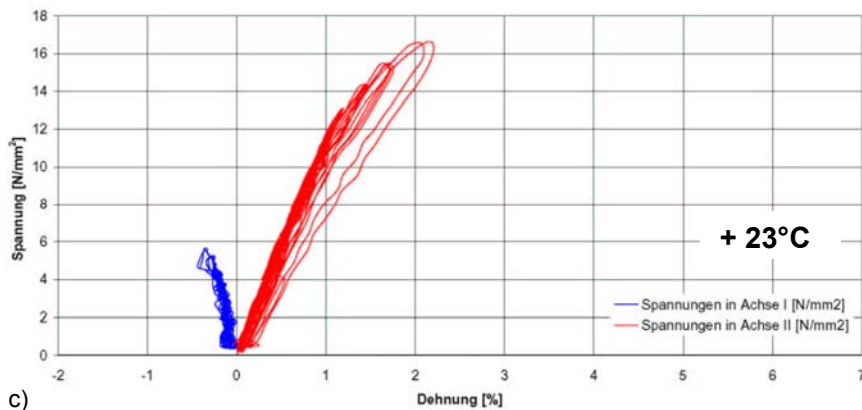
4.4.3.2 Versuchsauswertung



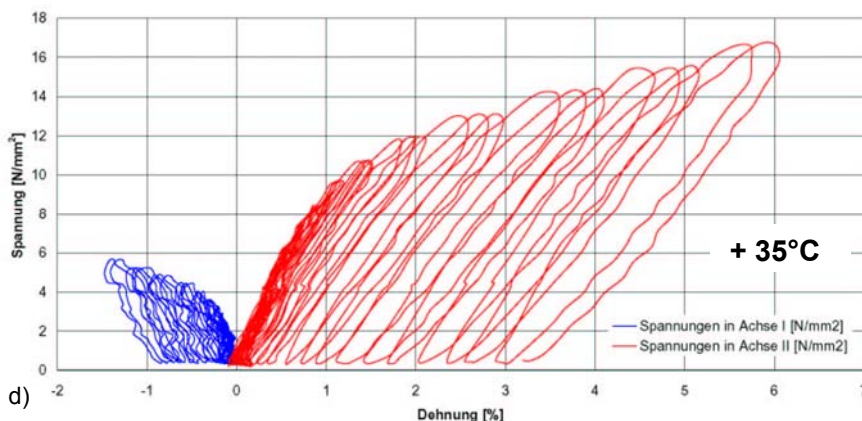
a)



b)



c)



d)

Nebensiehende Abbildungen zeigen aus den von SAXE gemessenen Rohdaten (Messdaten der Kraft und der Dehnung) berechnete Spannungs-Dehnungsdiagramme (jeweils eine charakteristische Kurve je Temperaturstufe). Es zeigt sich bei ansteigender Temperatur in beiden Achsrichtungen eine Zunahme der Hysterese. Die erzeugten Dehnungen gehen bei erhöhten Temperaturen nicht sofort bei der Entlastung zurück.

Abb. 4.42

**Spannungs-Dehnungs-Diagramme  $\sigma - \epsilon$**

für alle 8 Belastungsstufen à 3 Belastungen

Achse II (rot)

Achse I (blau)

zyklische Biaxialversuche,  
®ASAHI ETFE-Folie FLUON  
NJ, d=250  $\mu\text{m}$

Temperaturen:

a) - 25°C

b) 0°C

c) + 23°C

d) + 35°C



### Zyklenbezogene und ursprungsbezogene Beschreibung der Spannungs-Dehnungsbeziehung

Die Belastung der Proben erfolgte im vorliegenden Fall zyklisch, d.h. sie wurde nicht stetig bis zu einem Maximalwert der Spannung (oder Dehnung) gesteigert, sondern zwischenzeitlich entlastet und wieder belastet. Die Vorteile dieses Verfahrens wurden zu Beginn des Kapitels beschrieben. Durch die zyklischen Belastungen werden bei den viskoelastischen Werkstoffen je nach Temperatur und Dehngeschwindigkeit Hysteresen erzeugt, die eine differenzierte Auswertung der Spannungs-Dehnungs-Kennlinien ermöglichen und auch erfordern.

Eine zyklenbezogene Beschreibung der Spannungs-Dehnungsbeziehung erhält man, indem man die Vordehnungen jeder Spannungs-Dehnungslinie eliminiert (s. Abb. 4.43 a). Man setzt also alle ersten, zweiten oder dritten Belastungen der verschiedenen Laststufen aneinander, so dass eine zusammengesetzte Spannungs-Dehnungskurve entsteht. Die Kurven der Achse I sind nach rechts, der Achse II nach links, zu verschieben, bis die jeweils vorhergehende Kurve berührt wird. Verbindet man dann die den jeweiligen Spannungsmaxima zugeordneten Punkte der verschobenen Spannungs-Dehnungskurven, erhält man eine ideelle Spannungs-Dehnungsbeziehung, welche die Dehnungen aus der Belastungsgeschichte nicht berücksichtigt. Diese Beschreibung erlaubt die Einschätzung des Spannungs-Dehnungsverhaltens bzw. der Steifigkeit der Folie im Anschluss an eine Belastungs(vor)geschichte. Die sich auf die Erst-, Zweit- oder Drittbelastung im Zyklus beziehenden Werte werden im folgenden als zyklenbezogen bezeichnet. Sie sind mit dem Index z versehen.

Eine ursprungsbezogene Beschreibung der Spannungs-Dehnungsbeziehung erhält man, indem man die den jeweiligen Spannungsmaxima zugeordneten Punkte der nicht verschobenen Spannungs-Dehnungskurven verbindet (s. Abb. 4.43 b). Jeder so ermittelte Spannungs-Dehnungs-Punkt und jede damit ermittelte Steifigkeit, ist ein Wert, der die aufgebrachte Belastungsgeschichte berücksichtigt. Ursprungsbezogene Werte erlauben beispielsweise die Einschätzung einer Gesamtdehnung, die durch eine vorgegebene Belastungsfolge erwartet werden darf. Die sich auf den Ursprung beziehenden Werte werden im folgenden als ursprungsbezogen bezeichnet. Sie sind mit dem Index 0 versehen.

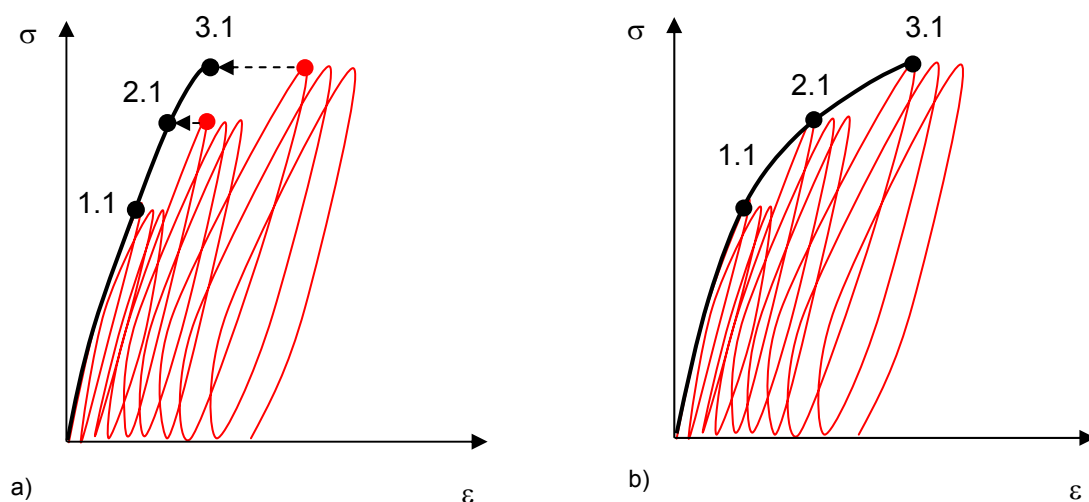
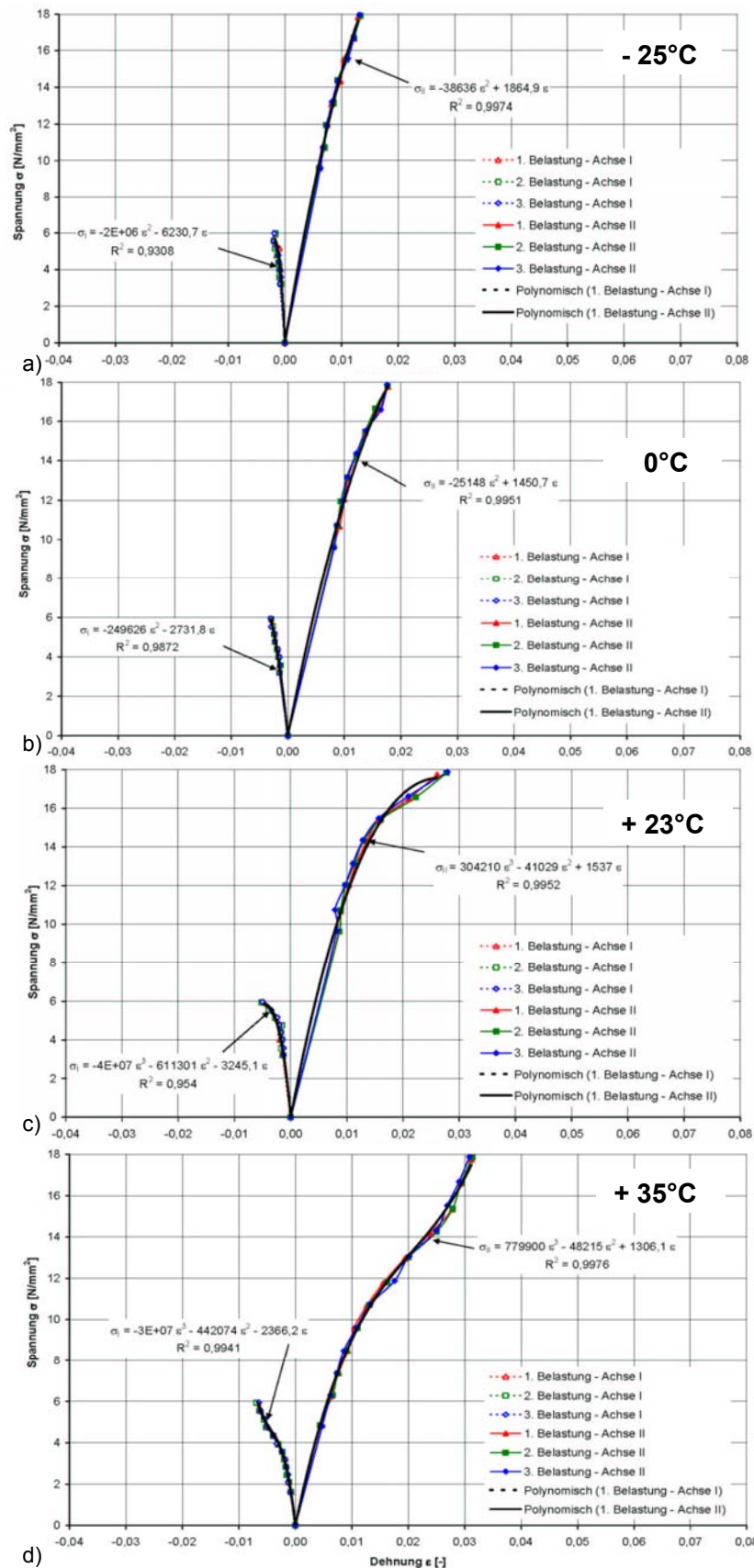


Abb. 4.43 a) Prinzip der zyklenbezogenen Auswertung der Spannungs-Dehnungsbeziehung in der Hauptbeanspruchungsrichtung in zyklischen Zugversuchen; b) Prinzip der ursprungsbezogenen Auswertung; 1. Ziffer = Laststufe; 2. Ziffer: Reihenfolge der Belastung auf der Laststufe



Nebenstehende Abbildungen zeigen die zyklusbezogenen biaxialen Spannungs-Dehnungs-Linien für die unterschiedlichen Temperaturstufen. Die Kurven wurden erzeugt, indem die nach jeder Belastung verbleibende Restdehnung eliminiert wurde, wodurch die einzelnen Spannungs-Dehnungskurven in den Ursprung verschoben wurden.

Abb. 4.44

**Spannungs-Dehnungs-Diagramme  $\sigma_Z - \epsilon_Z$ ,**

zyklusbezogen, jeweils für die

1. Belastung (rot)
2. Belastung (grün)
3. Belastung (blau)

im Zyklus. Die Approximations-Funktionen beziehen sich auf die erste Belastung im Zyklus.

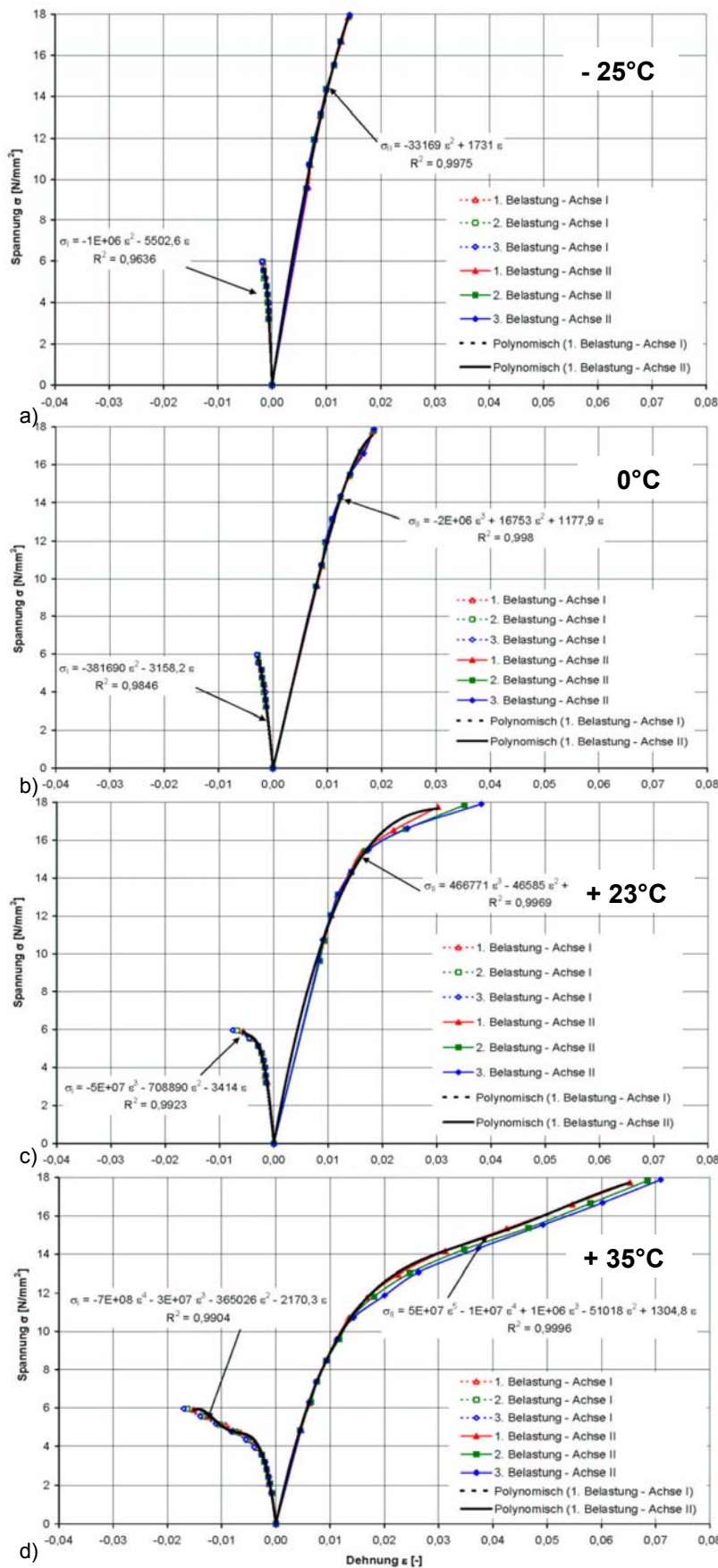
Achse II ( $\sigma_{II}$ )

Achse I ( $\sigma_I$ )

zyklische Biaxialversuche,  
®ASAHI ETFE-Folie FLUON NJ, d=250  $\mu$ m

Temperaturen:

- a) - 25°C
- b) 0°C
- c) + 23°C
- d) + 35°C



Nebenstehende Abbildungen zeigen die ursprungsbezogenen biaxialen Spannungs-Dehnungs-Linien für die unterschiedlichen Temperaturstufen. Die Kurven wurden erzeugt, indem die Punkte der Spannungsmaxima miteinander verbunden wurden.

Abb. 4.45

**Spannungs-Dehnungs-Diagramme**  $\sigma_0 - \epsilon_0$ ,  
 ursprungsbezogen, jeweils für die

1. Belastung (rot)
  2. Belastung (grün)
  3. Belastung (blau)
- im Zyklus.

Die Approximations-Funktionen beziehen sich auf die erste Belastung im Zyklus.

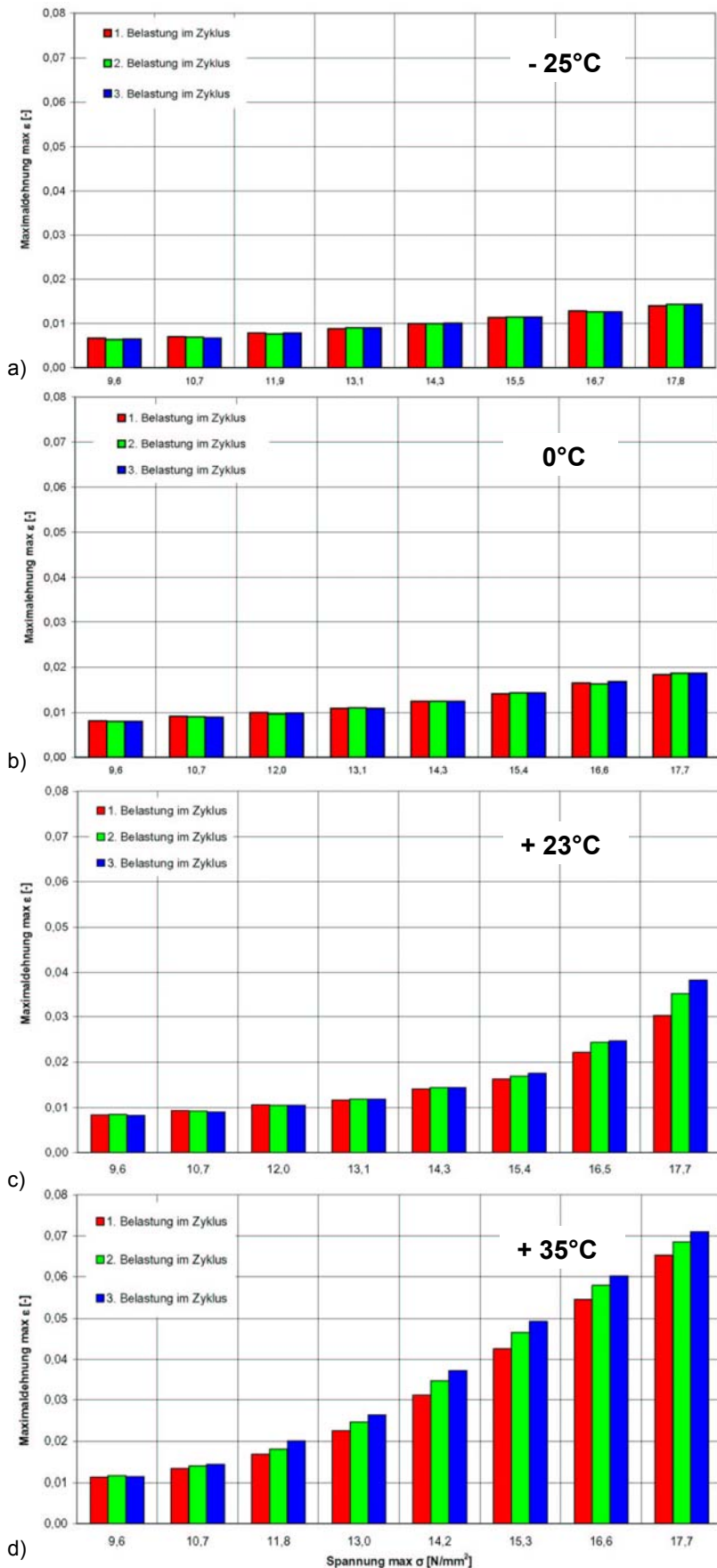
Achse II ( $\sigma_{II}$ )

Achse I ( $\sigma_I$ )

zyklische Biaxialversuche,  
 ®ASAHI ETFE-Folie FLUON  
 NJ, d=250  $\mu\text{m}$

Temperaturen:

- a) - 25°C
- b) 0°C
- c) + 23°C
- d) + 35°C



Nebenstehende Abbildungen zeigen die ursprungsbezogenen Maximalwerte der Dehnung für jede Belastung, Laststufe und Temperaturstufe. Mit steigender Temperatur nimmt die Maximaldehnung bei einer Laststeigerung überproportional zu.

Abb. 4.46

**Maximaldehnung in Achse**

$\epsilon_{\max, 0, II}$

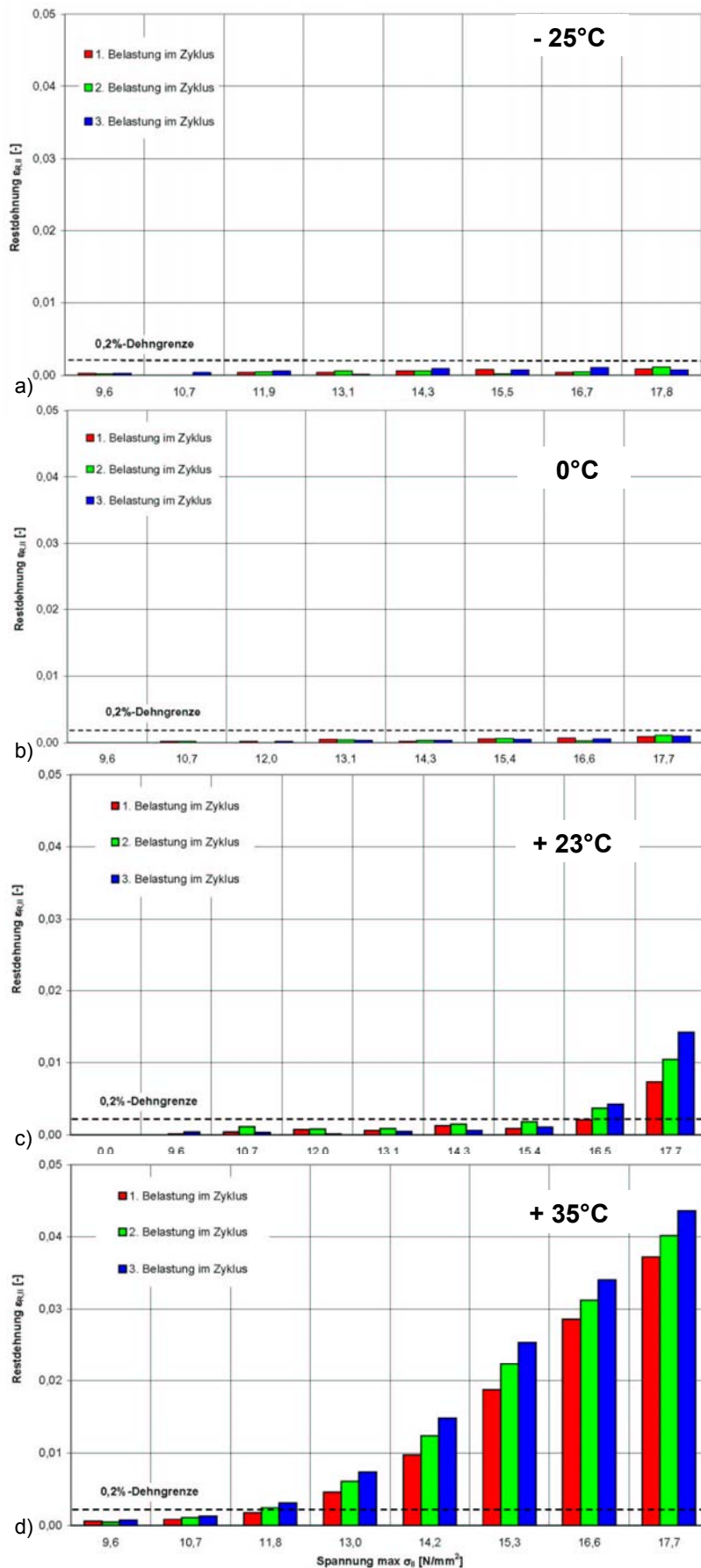
ursprungsbezogen, in Abhängigkeit von der Spannung  $\sigma_{II}$ , jeweils für die

1. Belastung (rot)
2. Belastung (grün)
3. Belastung (blau)

zyklische Biaxialversuche,  
 ®ASAHI ETFE-Folie FLUON  
 NJ, d=250  $\mu\text{m}$

Temperaturen:

- a) - 25°C
- b) 0°C
- c) + 23°C
- d) + 35°C



Nebenstehende Abbildungen zeigen die direkt nach jeder Entlastung gemessenen Restdehnungen (minimale ursprungsbezogene Dehnungswerte) für jede Belastung, Laststufe und Temperaturstufe. Mit steigender Temperatur nimmt die Restdehnung bei einer Laststeigerung überproportional zu. (gestrichelte Linie = 0,2 %-Dehngrenze)

Abb. 4.47

**Restdehnung in Achse II**

$\epsilon_{R,II}$  (spontan gemessen direkt nach der Entlastung), ursprungsbezogen, in Abhängigkeit von der vorherigen Spannung  $\sigma_{II}$ , jeweils für die

1. Belastung (rot)
2. Belastung (grün)
3. Belastung (blau)

zyklische Biaxialversuche, ®ASAHI ETFE-Folie FLUON NJ, d=250 µm

Temperaturen:

- a) - 25°C
- b) 0°C
- c) + 23°C
- d) + 35°C

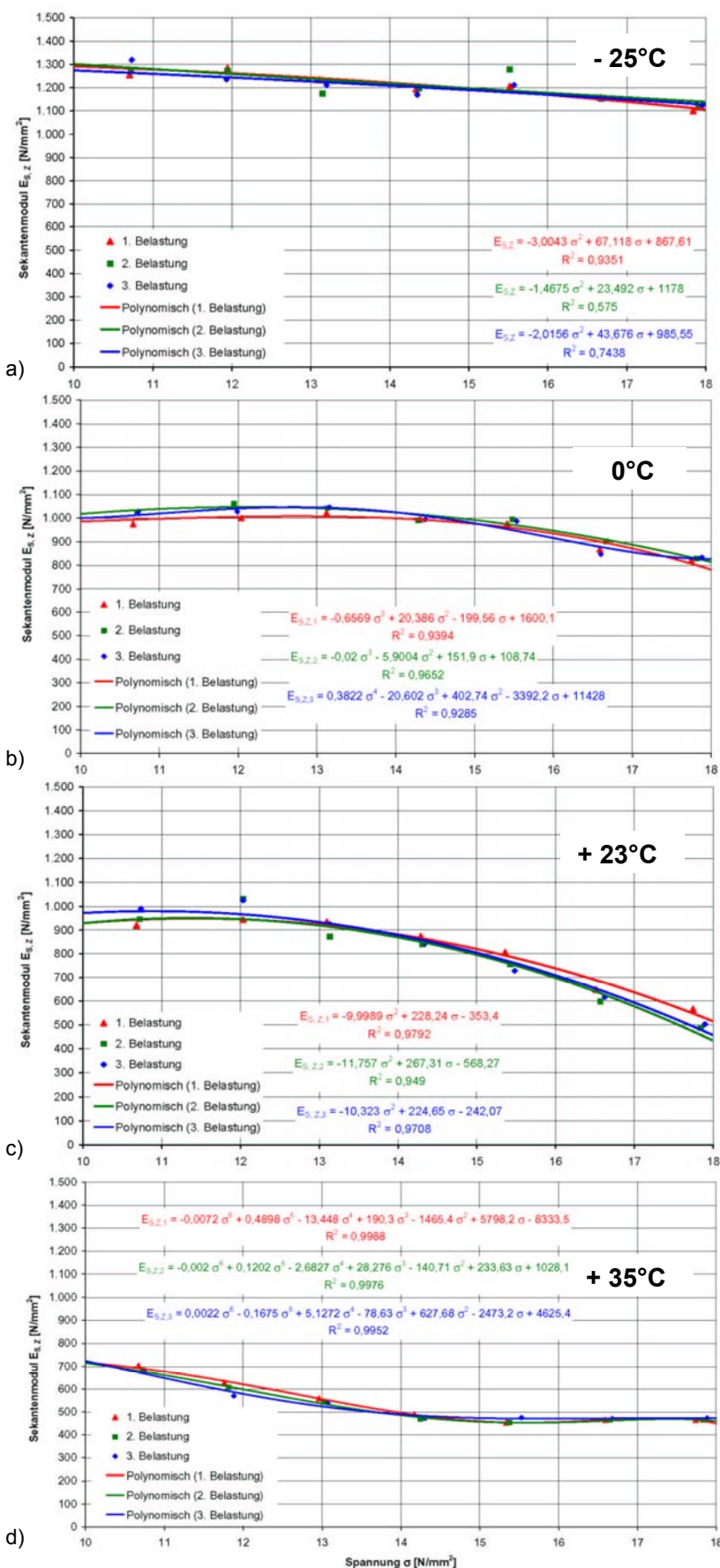


Abb. 4.48

**Sekantenmodul  $E_{S,Z}$** ,  
zyklenbezogen, in  
Abhängigkeit von der  
Spannung  $\sigma_{II}$

jeweils für die

- 1. Belastung (rot)
- 2. Belastung (grün)
- 3. Belastung (blau)

zyklische Biaxialversuche,  
®ASAHI ETFE-Folie FLUON  
NJ, d=250 μm

Temperaturen:

- a) - 25°C
- b) 0°C
- c) + 23°C
- d) + 35°C

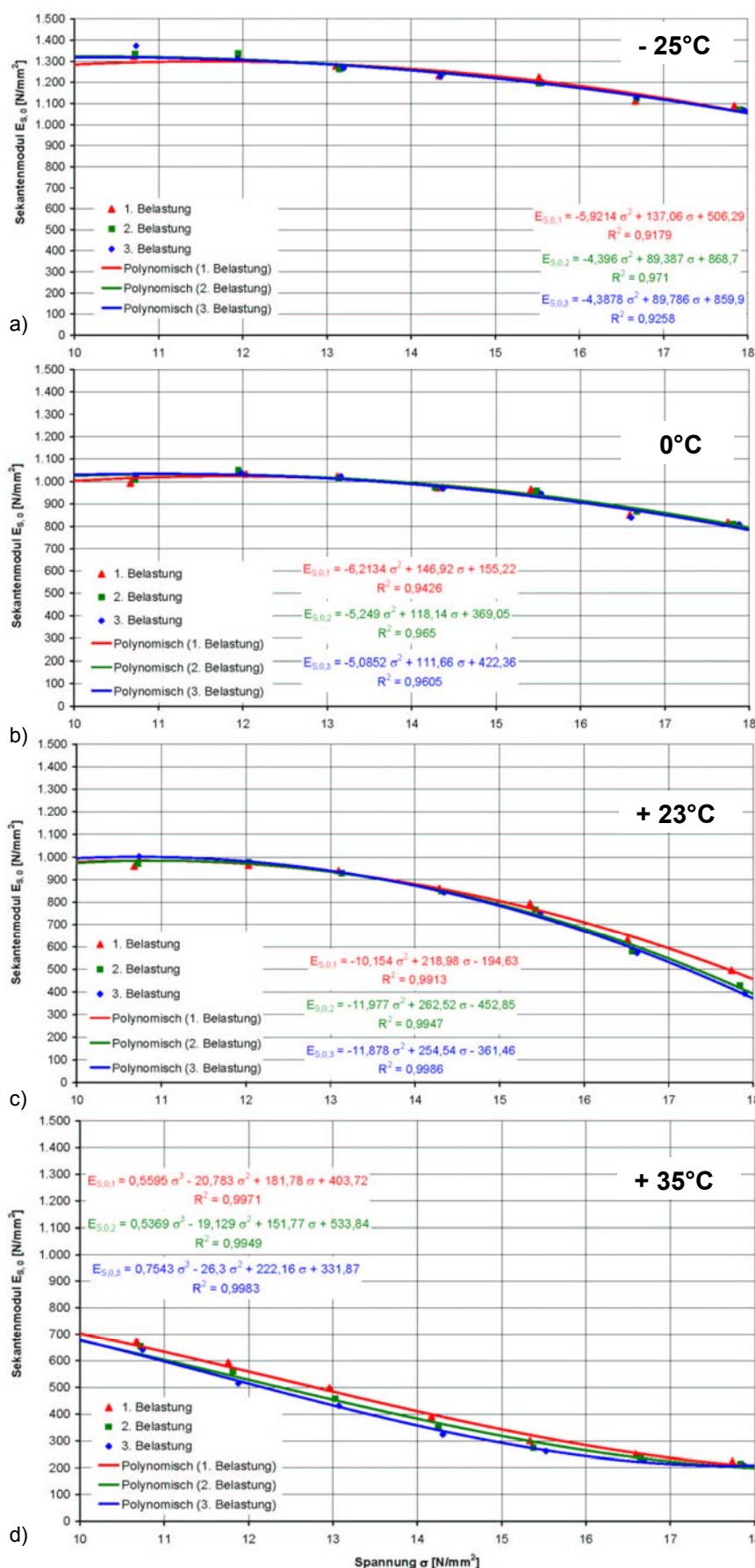


Abb. 4.49

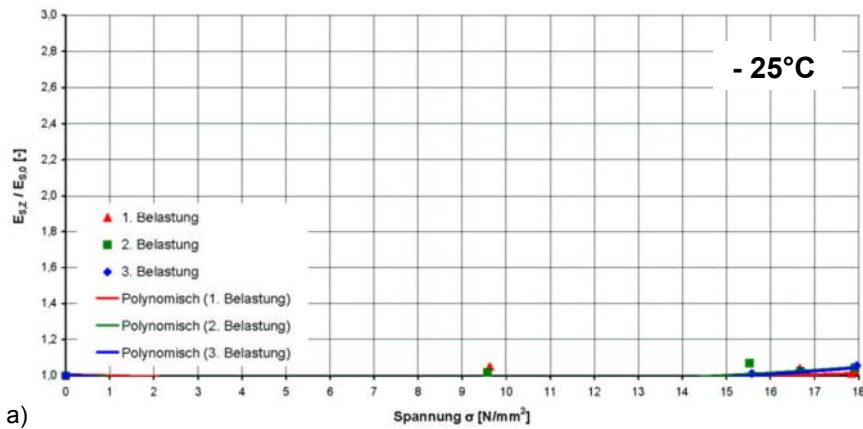
**Sekantenmodul  $E_{S,0}$ ,**  
ursprungsbezogen, in  
Abhängigkeit von der  
Spannung  $\sigma_{II}$ , jeweils für  
die

1. Belastung (rot)
2. Belastung (grün)
3. Belastung (blau)

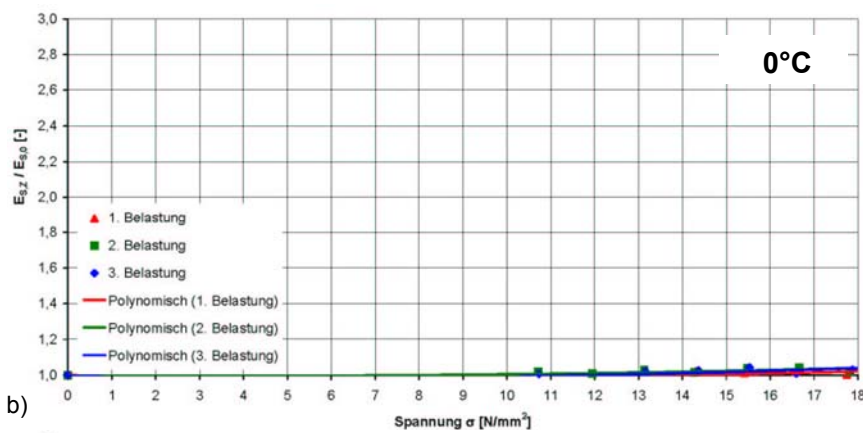
zyklische Biaxialversuche,  
®ASAHI ETFE-Folie FLUON  
NJ, d=250  $\mu\text{m}$

Temperaturen:

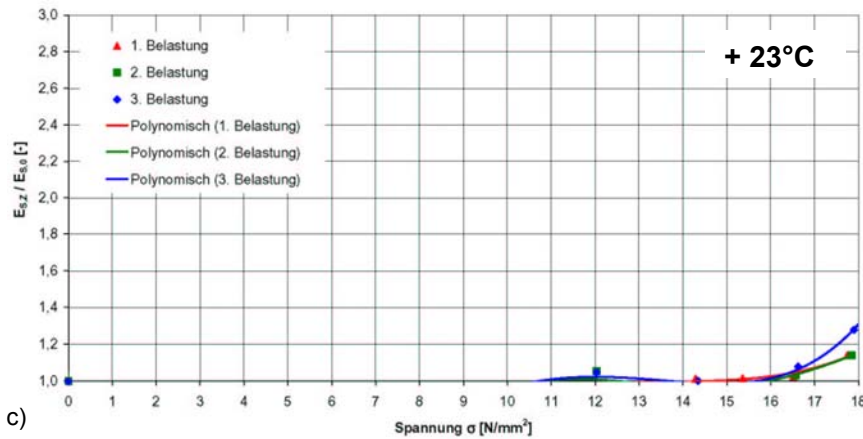
- a) - 25°C
- b) 0°C
- c) + 23°C
- d) + 35°C



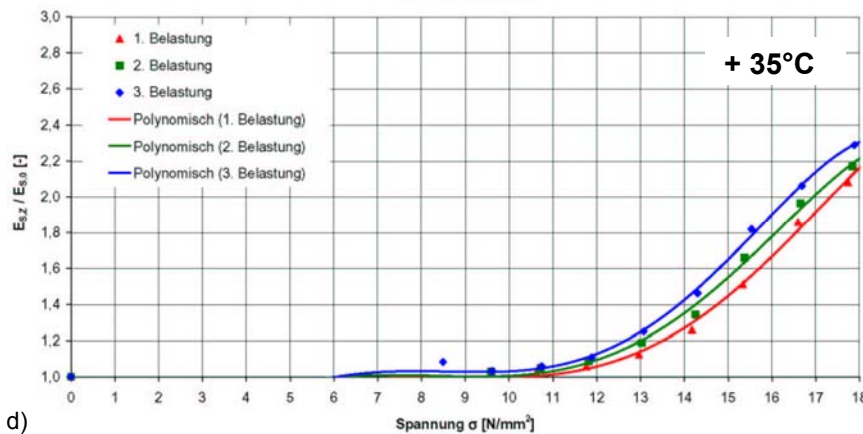
a)



b)



c)



d)

Abb. 4.50

**Quotient der Sekantenmodul**

$E_{S,Z} / E_{S,0}$  in Abhängigkeit von der Spannung, jeweils für die

1. Belastung (rot)
2. Belastung (grün)
3. Belastung (blau)

zyklische Biaxialversuche,  
 ®ASAHI ETFE-Folie FLUON  
 NJ, d=250 μm

Temperaturen:

- a) - 25°C
- b) 0°C
- c) + 23°C
- d) + 35°C



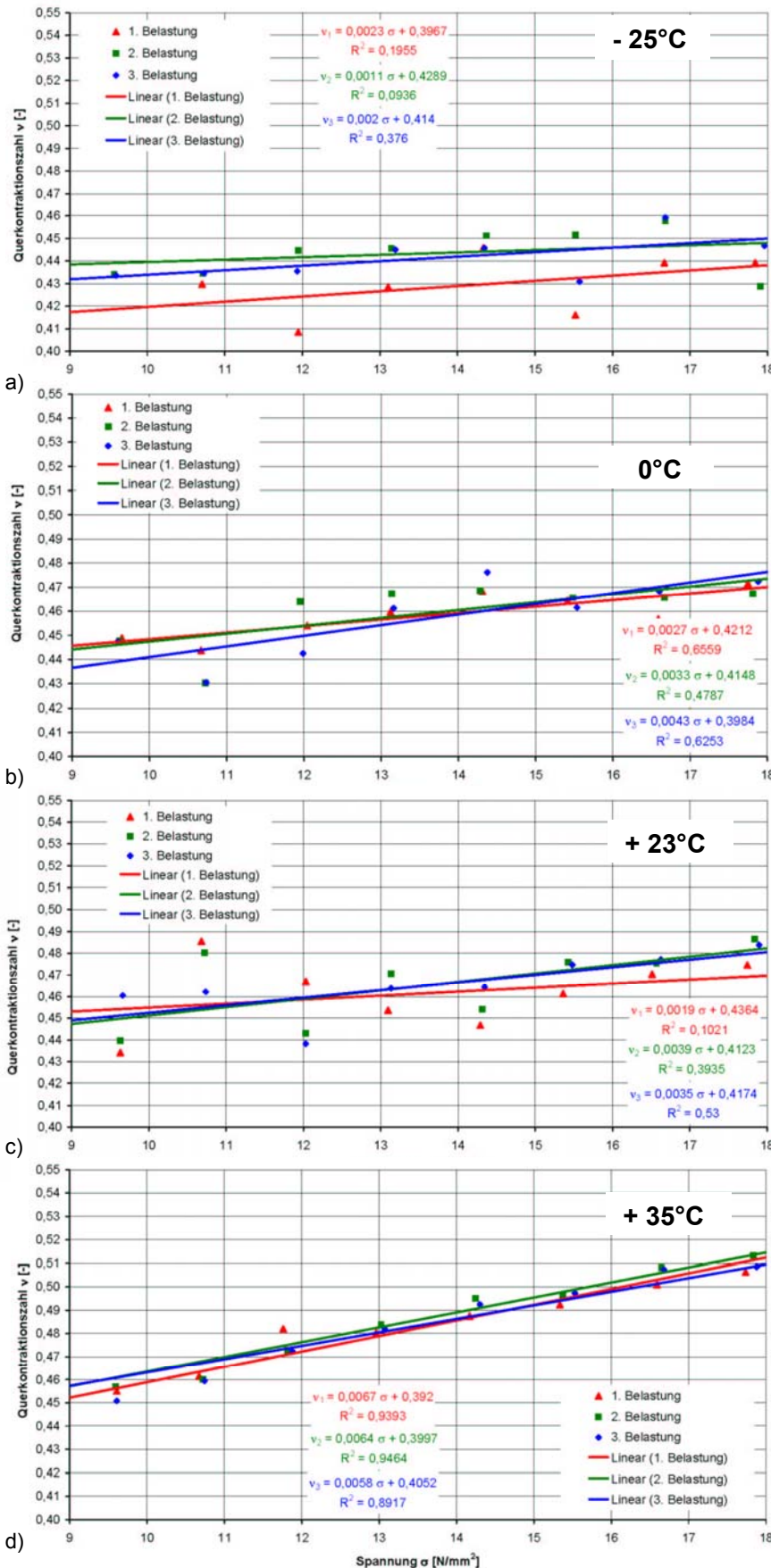


Abb. 4.51

Querkontraktionszahl  $v_z$ ,  
zyklenbezogen, in  
Abhängigkeit von der  
Spannung  $\sigma_{II}$ , jeweils für die

1. Belastung (rot)
2. Belastung (grün)
3. Belastung (blau)

zyklische Biaxialversuche,  
®ASAHI ETFE-Folie FLUON  
NJ,  $d=250 \mu\text{m}$

Temperaturen:

- a) - 25°C
- b) 0°C
- c) + 23°C
- d) + 35°C

### 4.4.3.3 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse

#### Einfluss der Temperatur auf die Dehngeschwindigkeit

Bei kraftgeregelten Versuchen hat die Temperatur einen Einfluss auf die Dehngeschwindigkeit. Die beiden Diagramme in Abb. 4.52 zeigen die Dehngeschwindigkeiten für die Achsen I und II, gemessen im jeweiligen Intervall zwischen der minimalen und der maximalen Dehnung im Zyklus:  $\dot{\epsilon} = (\epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}) / \Delta t(\epsilon_{\max} - \epsilon_{\min})$ . Die Größenordnung liegt in Achse I bei  $\max \dot{\epsilon}_I \cong -2 \text{ \% / min}$  und in Achse II bei  $\max \dot{\epsilon}_{II} \cong 10 \text{ \% / min}$ . Höhere Temperaturen führen zumindest bis zur Fließgrenze zu höheren Dehngeschwindigkeiten und umgekehrt.

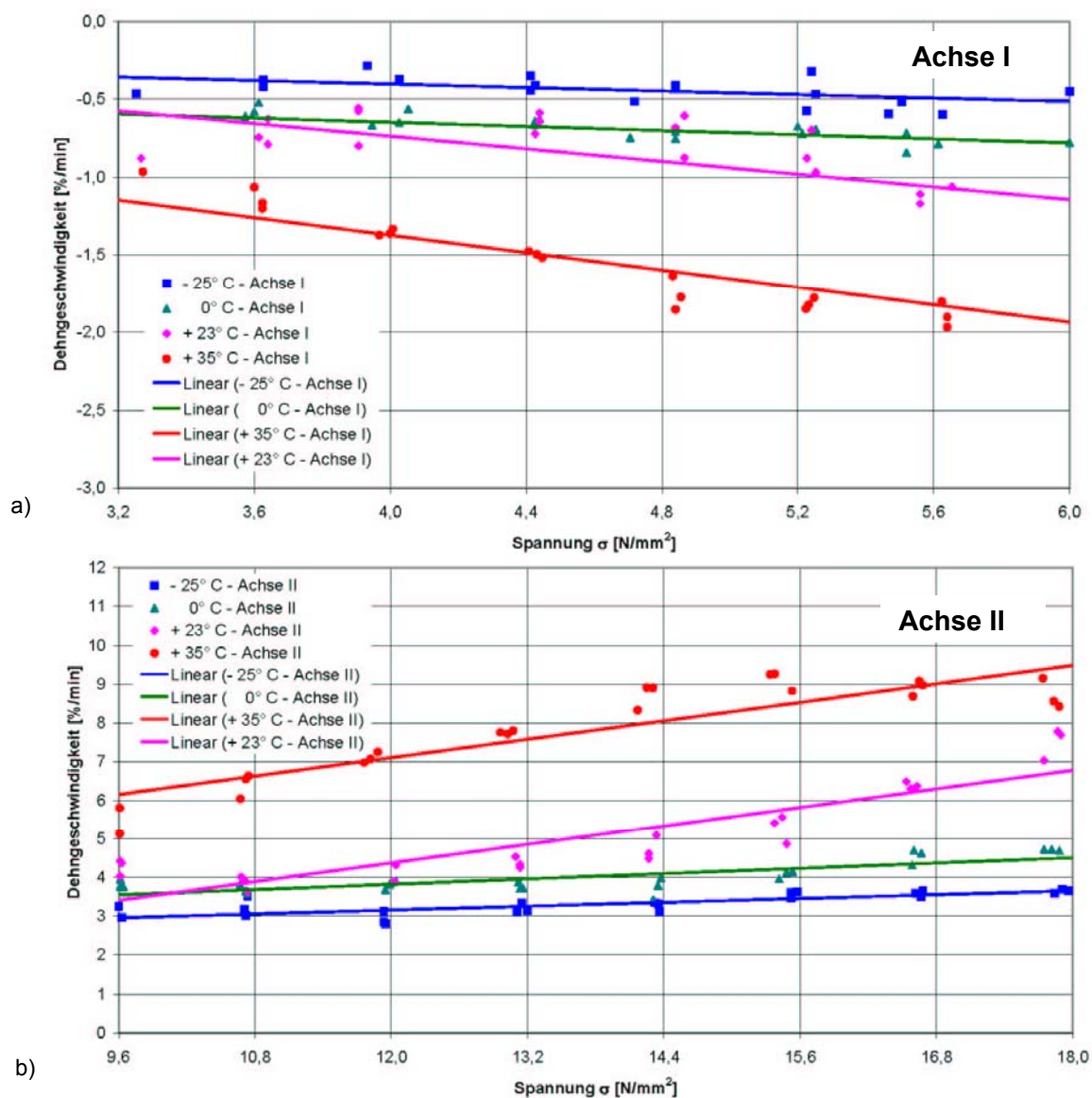
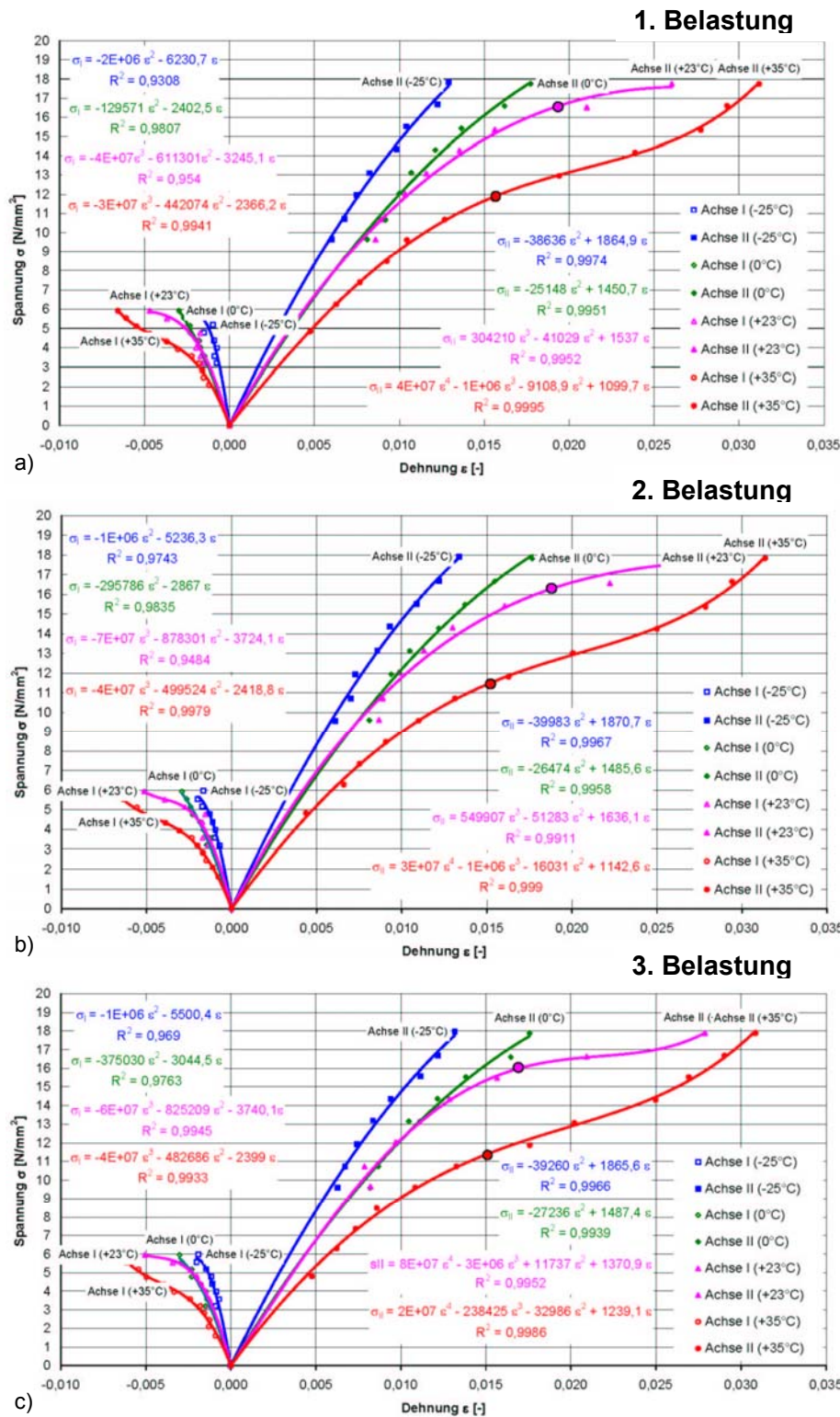


Abb. 4.52 **Dehngeschwindigkeit**  $\dot{\epsilon} = (\epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}) / \Delta t(\epsilon_{\max} - \epsilon_{\min})$  **in Abhängigkeit von der Spannung**  $\sigma$  :  
 a) Achse I (Querrichtung) und b) Achse II (Extrusionsrichtung); für die Temperaturstufen -25°C, 0°C, +23°C und +35°C, zyklische Biaxialversuche 3:1, ®ASAHI ETFE-Folie FLUON NJ, d=250  $\mu\text{m}$

**Einfluss der Temperatur auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten**



Nebenstehende Abbildungen zeigen die Mittelwerte der Spannungen  $\sigma_I$ ,  $\sigma_{II}$  für die 4 Temperaturstufen, aufgetragen über die Dehnung  $\epsilon$ .

Abb. 4.53 Spannung  $\sigma_{I,II}$  in Abhängigkeit von der Dehnung  $\epsilon_{I,II}$

- jeweils für die
- a) 1. Belastung
- b) 2. Belastung
- c) 3. Belastung

im Zyklus  
 rot: T = +35°C  
 magenta: T = +23°C  
 grün: T = 0°C  
 blau: T = -25°C

zyklische Biaxialversuche,  
 ©ASAHI ETFE-Folie  
 FLUON NJ, d=250  $\mu$ m

### Einfluss der Temperatur auf den Elastizitätsmodul

Abb. 4.54 zeigt den Sekantenmodul  $E_{S,Z}$  (z: auf den Zyklus bezogen) für die 4 Temperaturstufen, aufgetragen über die Spannung  $\sigma_{II}$ . Für die Erstbelastung bewegt er sich in diesem Spannungsbereich zwischen  $E_{S,Z} \cong 400$  und  $1.350 \text{ N/mm}^2$ . Der Verlauf bei  $+35^\circ\text{C}$  weicht von den anderen drei Verläufen ab, da er z. T. bereits im Fließbereich liegt. Abb. 4.55 zeigt die entsprechenden 3D-Diagramme ( $E_{S,Z}, \sigma, T$ -Diagramme).

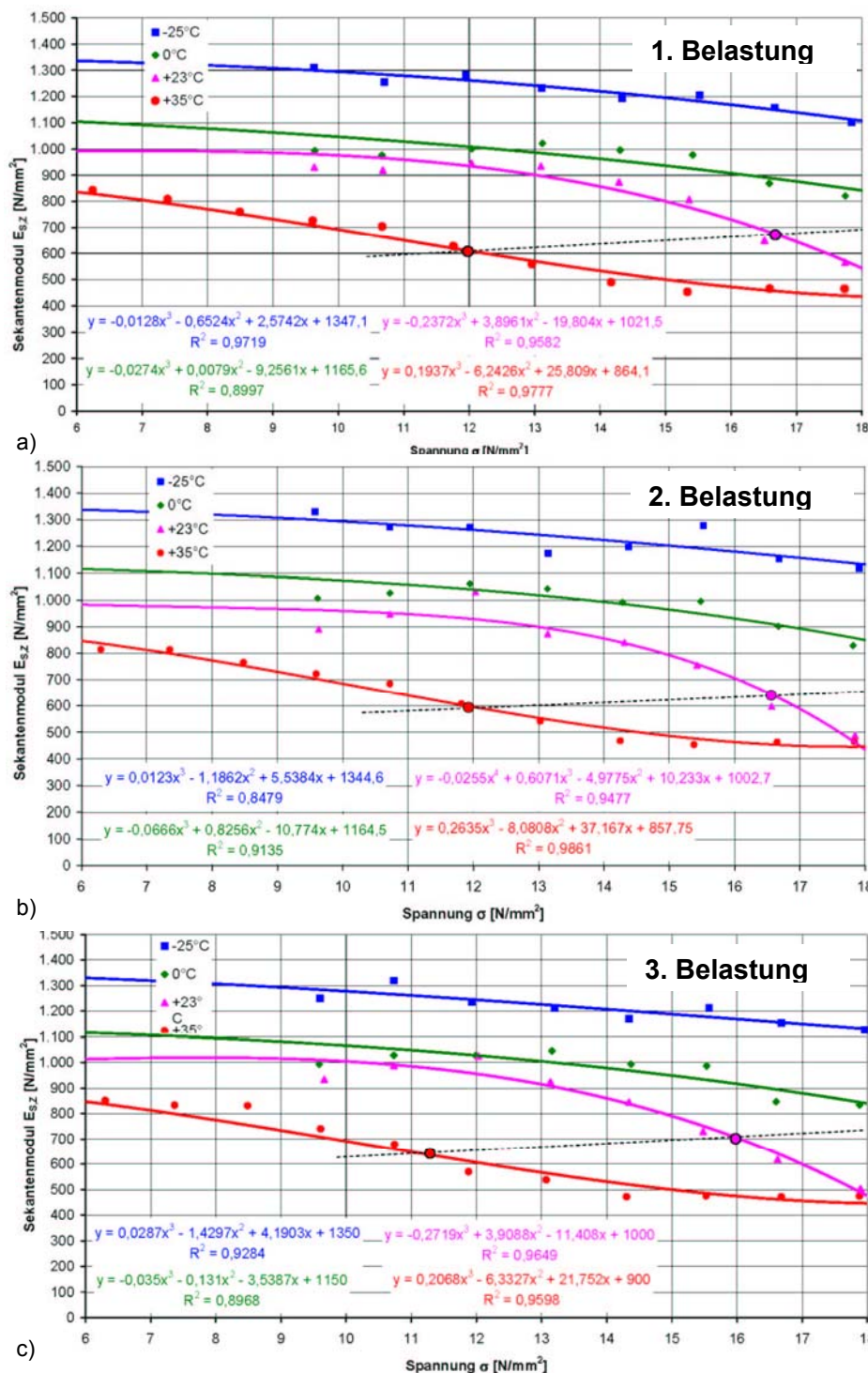


Abb. 4.54  
**Sekantenmodul  $E_{S,Z}$  in Abhängigkeit von der Spannung  $\sigma_{II}$**   
 jeweils für die  
 a) 1. Belastung  
 b) 2. Belastung  
 c) 3. Belastung  
 im Zyklus  
 rot:  $T = +35^\circ\text{C}$   
 magenta:  $T = +23^\circ\text{C}$   
 grün:  $T = 0^\circ\text{C}$   
 blau:  $T = -25^\circ\text{C}$   
 zyklische Biaxialversuche,  
 ®ASAHI ETFE-Folie  
 FLUON NJ,  $d=250 \mu\text{m}$

**Einfluss der Temperatur und der Spannung auf den Elastizitätsmodul**

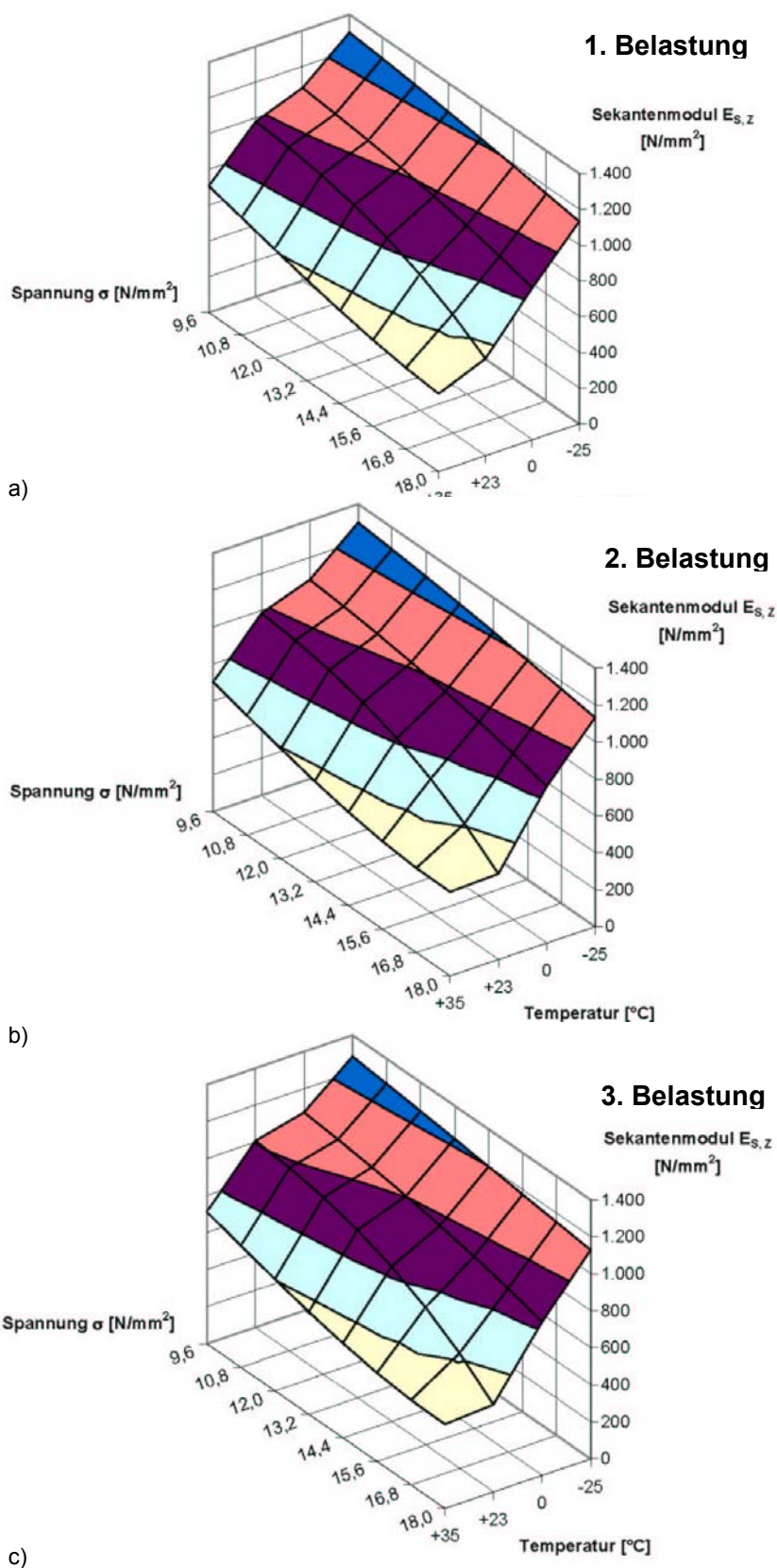


Abb. 4.55

**Sekantenmodul  $E_{S,z}$  in Abhängigkeit von der Spannung  $\sigma_{II}$  und der Temperatur  $T$**

jeweils für die  
 a) 1. Belastung  
 b) 2. Belastung  
 c) 3. Belastung  
 im Zyklus

zyklische  
 Biaxialversuche,  
 ©ASAHI ETFE-Folie  
 FLUON NJ,  $d=250 \mu\text{m}$

### Einfluss der Temperatur auf die Querkontraktionszahl

Abb. 4.56 zeigt die Querkontraktionszahl  $\nu_Z$  (z: auf den Zyklus bezogen) für die 4 Temperaturstufen, aufgetragen über die Spannung  $\sigma_{II}$ . Für die Erstbelastung bewegt sie sich in diesem Spannungsbereich zwischen  $\nu_Z \cong 0,42$  bis  $0,51$ , also nahe der Volumenkonstanz ( $\nu = 0,5$ ). Bei tiefen Temperaturen steigt sie über den betrachteten Spannungsbereich moderater, als bei hohen Temperaturen. Abb. 4.57 zeigt die entsprechenden 3D-Diagramme ( $\nu, \sigma, T$ -Diagramme).

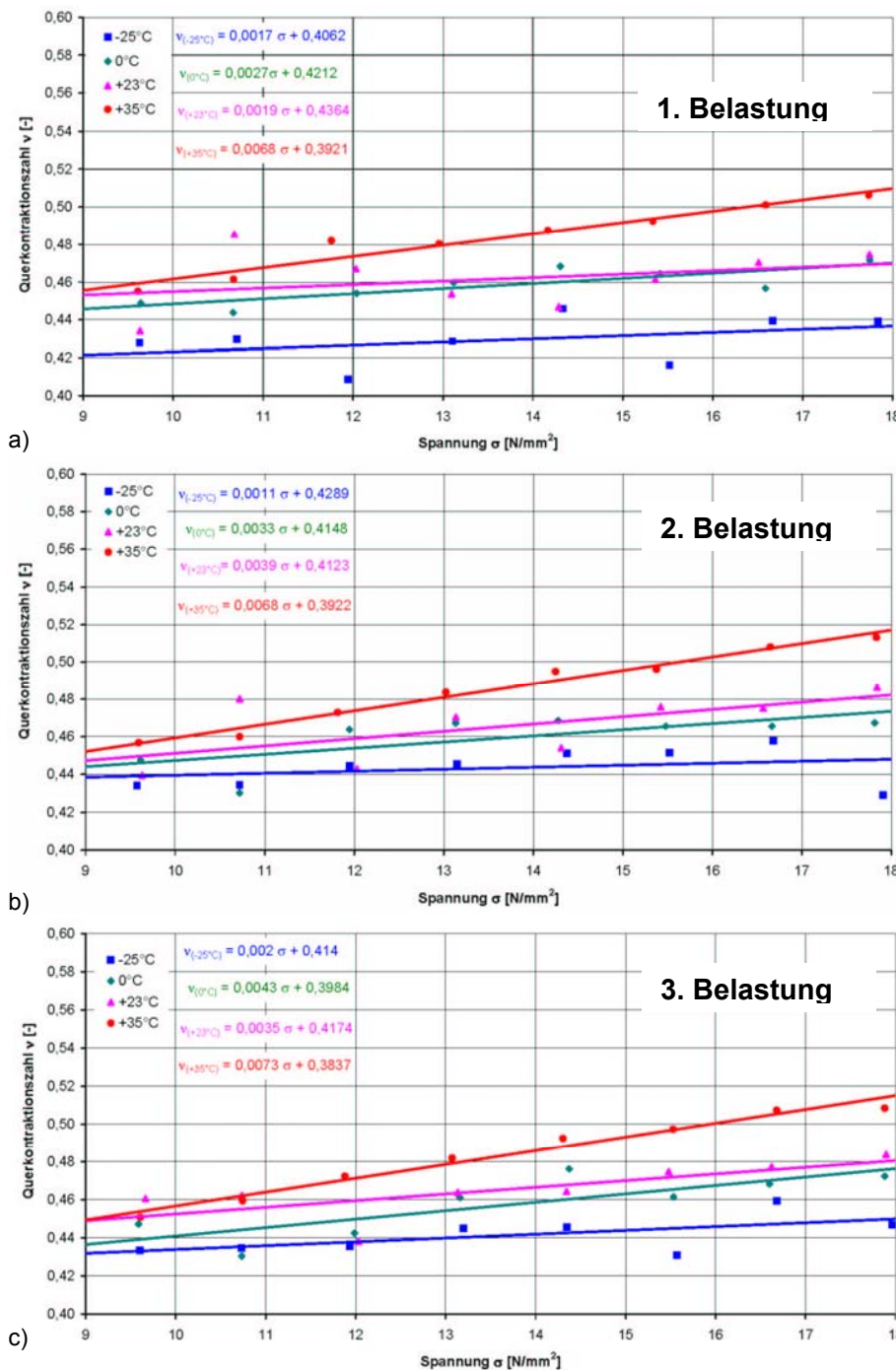


Abb. 4.56  
**Querkontraktionszahl  $\nu_Z$  in Abhängigkeit von der Spannung  $\sigma_{II}$**   
 jeweils für die  
 a) 1. Belastung  
 b) 2. Belastung  
 c) 3. Belastung  
 im Zyklus  
 rot: T = +35°C  
 magenta: T = +23°C  
 grün: T = 0°C  
 blau: T = -25°C  
 zyklische  
 Biaxialversuche,  
 ©ASAHI ETFE-Folie  
 FLUON NJ, d=250  $\mu\text{m}$

**Einfluss der Temperatur und der Spannung auf die Querkontraktionszahl**

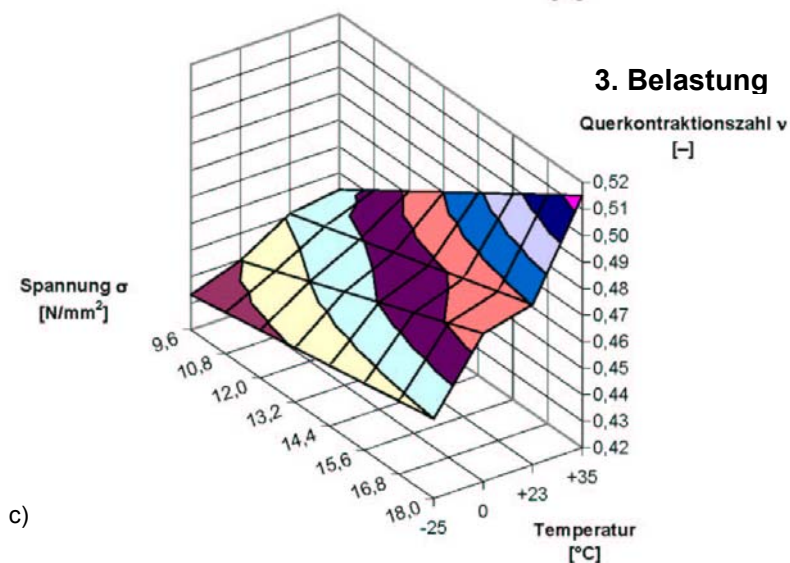
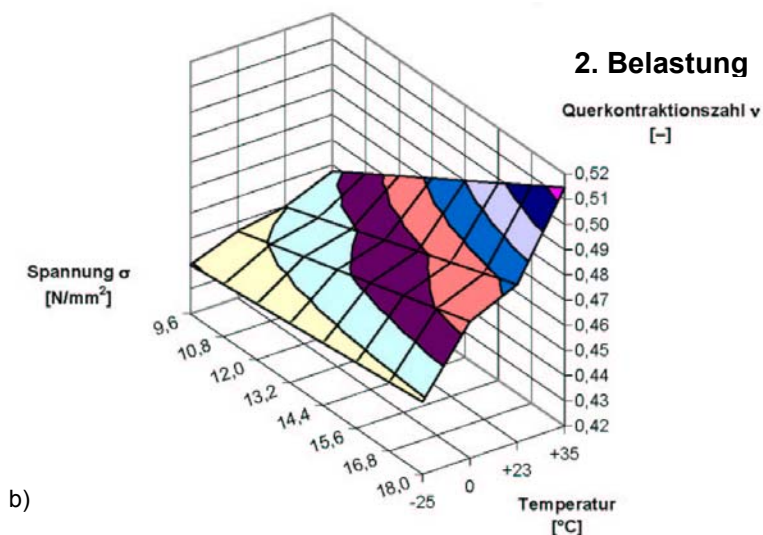
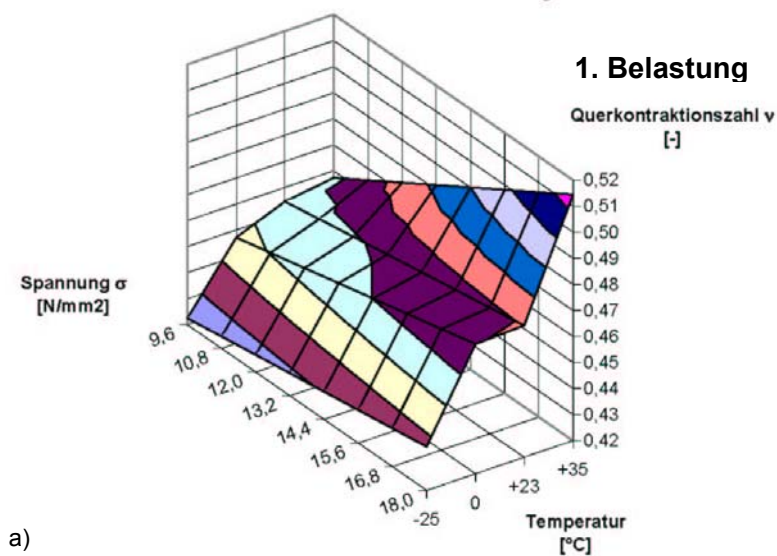


Abb. 4.57

**Querkontraktionszahl  $\nu$  in Abhängigkeit von der Spannung  $\sigma_{II}$  und der Temperatur T**

jeweils für die

- a) 1. Belastung
- b) 2. Belastung
- c) 3. Belastung

im Zyklus

zyklische  
Biaxialversuche,  
®ASAHI ETFE-Folie  
FLUON NJ, d=250  $\mu\text{m}$

## Einfluss der Temperatur auf die Fließspannung und die Fließdehnung

Die Fließgrenze definiert den Beginn plastischer Dehnungsanteile. Durch die relativ feine Abstufung der Laststufen in 0,3 kN/m-Schritten und die dreimalige Belastung in einem Zyklus konnte die Fließgrenze in den Versuchen relativ genau bestimmt werden. Ein Indiz für den Fließbeginn war die deutlich erkennbare Zunahme der Restdehnung  $\varepsilon_R$  zwischen der ersten und der dritten Belastung innerhalb eines Zyklus. Diese Zunahme äußert sich zwangsläufig auch im Quotienten, der aus den Sekantenmoduln  $E_{S,Z}$  und  $E_{S,0}$  gebildet wird, da sich  $E_{S,Z}$  auf den Zyklus (bei Elimination der Restdehnungen aus der Belastungsgeschichte) und  $E_{S,0}$  auf den Ursprung (mit Restdehnungen) bezieht. Bei Fließeintritt divergieren die beiden Modulkurven deutlich.

Die Fließgrenze wird hier nach den Ausführungen in Anhang D durch das Erreichen der bei der Entlastung gemessenen Restdehnung  $\varepsilon_R = 0,2\%$  definiert. Da die Be- und die Entlastungskurven nicht linear sind, kann dieser Wert von der konstruktiv, d.h. über die Parallele zur HOOKE'schen Geraden (durch den Punkt  $\sigma = 0,00$  [N/mm<sup>2</sup>];  $\varepsilon = 0,002$  [-]) ermittelten 0,2 %-Dehngrenze etwas abweichen. Abb. 4.58 zeigt die bei der Entlastung gemessenen Restdehnungen  $\varepsilon_R$  für die vier Temperaturstufen sowie die 0,2 %-Dehngrenzenlinie. Die in den Versuchen aufgebrachte Maximalbelastung entspricht ca. 18 N/mm<sup>2</sup>. Daher mussten die Kurven bei -25°C und 0°C extrapoliert werden, um eine Überschreitung der 0,2 %-Dehngrenzlinie abschätzen zu können.

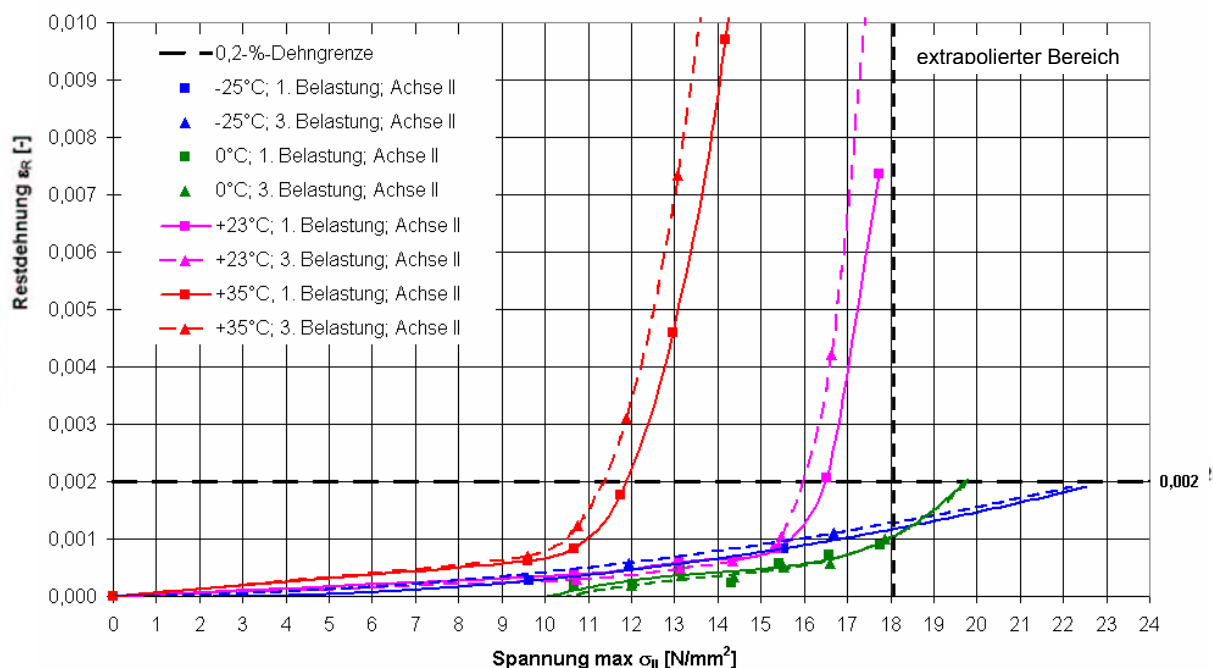


Abb. 4.58 Restdehnung  $\varepsilon_{R,II}$  in Achse II nach der 1. und nach der 3. Entlastung im Zyklus in Abhängigkeit von der vorherigen Lastspannung  $\max \sigma_S$  für die 4 Temperaturstufen; zyklische Biaxialversuche, ©ASAHI ETFE-Folie FLUON NJ,  $d=250 \mu\text{m}$  (Prognose für  $\sigma \geq 18 \text{ N/mm}^2$ , extrapoliertes Bereich)



Abb. 4.59 zeigt die über die 0,2 %-Dehngrenze (Restdehnung) definierte Fließspannung und die zugehörige Fließdehnung in Abhängigkeit von der Temperatur im betrachteten Bereich zwischen  $-25^{\circ}\text{C}$  und  $+35^{\circ}\text{C}$ . Die Fließspannung und die Fließdehnung fallen mit zunehmender Temperatur ab. Während die Fließdehnung-Temperatur-Kurve einen nahezu linearen Verlauf über den Temperaturbereich zeigt, fällt die Fließspannung-Temperatur-Kurve zwischen  $+23^{\circ}\text{C}$  und  $+35^{\circ}\text{C}$  stärker und nicht linear ab.

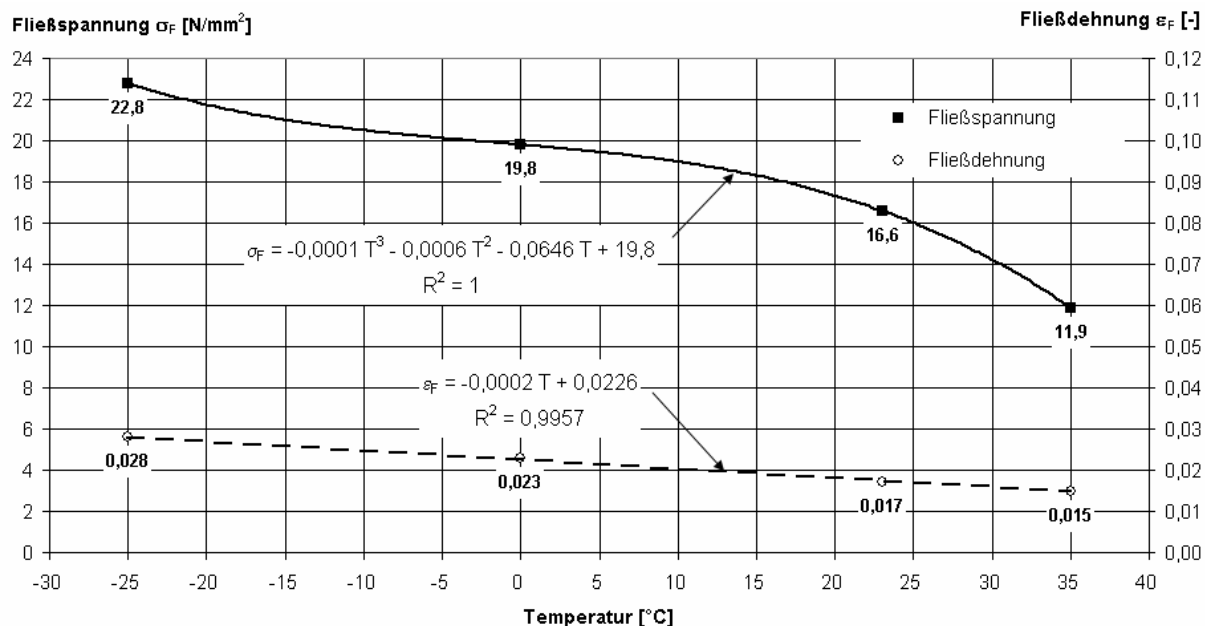


Abb. 4.59 **Fließspannung  $\sigma_{II,F}$  und Fließdehnung  $\varepsilon_{II,F}$  in Achse II, in Abhängigkeit von der Temperatur  $T$** ; definiert durch das Erreichen einer spontan gemessenen Restdehnung von 0,2 % bei der Entlastung nach der 1. Belastung im Zyklus; zyklische Biaxialversuche, ©ASAHI ETFE-Folie FLUON NJ,  $d=250\ \mu\text{m}$

Mit den in Abb. 4.59 dargestellten Fließspannungen erhält man unter Anwendung der VON-MISES'schen Fließbedingung (s. Anhang D, Kap. D 6.2.1) das in Abb. 4.60 dargestellte Diagramm für den ebenen Spannungszustand eines homogenen und isotropen Werkstoffes mit den darin enthaltenen 4 Fließellipsen für die 4 Temperaturstufen. Da die VON-MISES'sche Fließbedingung bei duktilen (zähen) Werkstoffen Anwendung findet, erreicht man mit ihr auch bei den, zumindest bis zur Fließgrenze, duktilen ETFE-Folien gute Ergebnisse bzgl. der Prognose der Fließspannungen für die verschiedenen ebenen Spannungszustände. Bei isotropen Werkstoffen ist die VON-MISES-Fließellipse zur Winkelhalbierenden im I und III Quadranten des  $\sigma_I - \sigma_{II}$  - Koordinatensystems symmetrisch. Ist das Spannungs-Dehnungsverhalten bei Druck- und bei Zugbeanspruchung gleich, ist die Ellipse zur Winkelhalbierenden im II und IV Quadranten symmetrisch. Die VON-MISES'sche-Fließbedingung erfasst nicht die Abhängigkeiten von der Zeit und von der Temperatur eines Werkstoffes. Nach KARA 2005 [91] beinhaltet nur die Theorie der gespeicherten Gestaltänderungsenergie von REINER und WEISSENBERG 1939 [149] eine Zeitabhängigkeit (s. Anhang D, Kap. D 6.4). Die Anwendung dieser lange bekannten Theorie auf ETFE-Folien ist jedoch noch nicht erfolgt. Sie ist aber auch nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

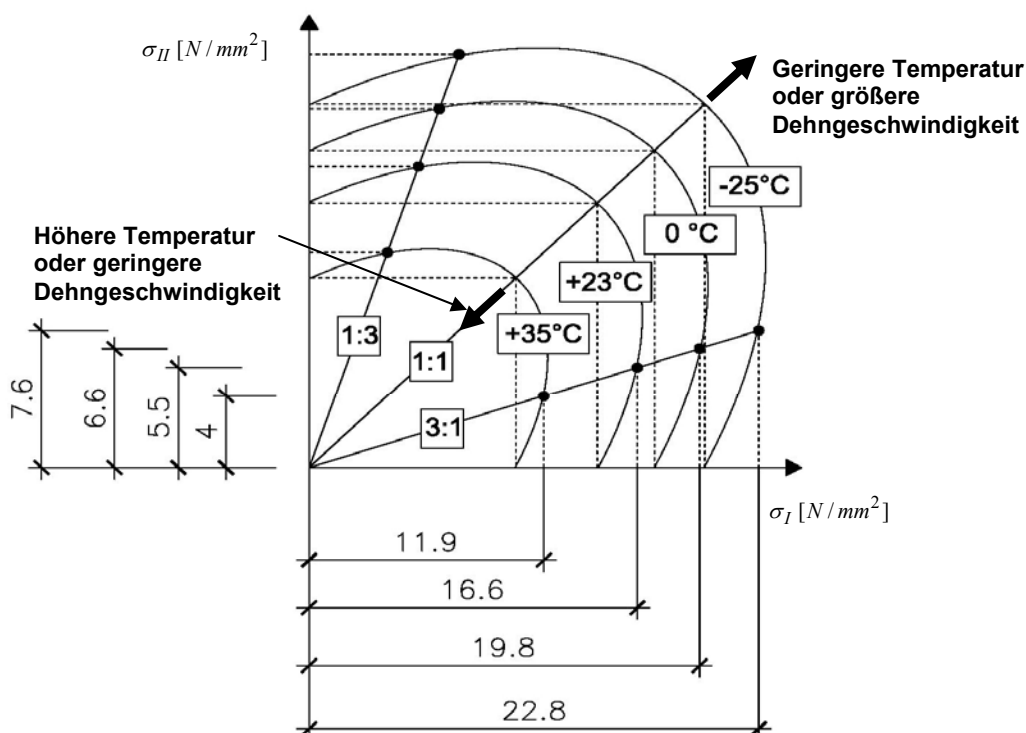


Abb. 4.60 Hypothetische Fließspannungskurven für die Temperaturstufen  $-25^\circ C$ ,  $0^\circ C$ ,  $+23^\circ C$  und  $+35^\circ C$  in Abhängigkeit von den Hauptspannungen  $\sigma_I$ ;  $\sigma_{II}$  (mit  $\sigma_I > \sigma_{II}$ ); Größenordnung der Dehngeschwindigkeit bis zur Fließgrenze:  $\dot{\epsilon} \cong 10^1 \% / \text{min}$ , zyklische Biaxialversuche, ©ASAHI ETFE-Folie FLUON NJ,  $d=250 \mu\text{m}$

Die in dem Diagramm eingezeichneten Ellipsen markieren den Fließeintritt in der Hauptspannungsebene  $\sigma_I$ ;  $\sigma_{II}$  für die vier betrachteten Temperaturstufen. Die Ellipsenkrümmungen sind bislang noch nicht durch Parameterstudien umfassend belegt. Mit jeweils einem Fließpunkt pro Temperaturstufe und dem (bei isotropem Verhalten) ableitbaren Spiegelpunkt lässt sich ebenfalls noch kein eindeutiger Ellipsenverlauf bestimmen. Jedoch zeigen weitere, hier nicht dargestellte Versuche bei  $23^\circ C$ , dass die Fließspannung auch bei anderen Spannungsverhältnissen auf oder nahe der dargestellten Ellipse liegt. Auch die anfangs dargestellten Monoaxialversuche bei  $23^\circ C$  in Extrusions- und in Querrichtung liegen sehr nahe an der Ellipse. Es ist hierbei aber zu beachten, dass sich Fließpunkte nur dann in Bezug zueinander setzen lassen, wenn zum einen die Dehngeschwindigkeiten gleich sind oder zumindest in der gleichen Größenordnung (d.h. Zehnerpotenz) liegen, und zum anderen, wenn dasselbe Fließkriterium (z.B. die 0,2%-Dehngrenze) angewendet wird.

Das Diagramm basiert auf dem Fließkriterium der 0,2 %-Dehngrenze, bei der die Restdehnung direkt bei der Entlastung gemessen wird. Da nicht nur die Belastungs- sondern auch die Entlastungskurve nichtlinear ist, liefert diese Methode etwas höhere Fließspannungen, als die konstruktiv ermittelte 0,2 %-Dehngrenze. Die Dehngeschwindigkeiten  $\dot{\epsilon}$  liegen hier in der Größenordnung  $10^1 \% / \text{min}$ .

Ob die elliptische Fließbedingung nach VON MISES auch für sehr hohe und sehr niedrige Temperaturen eine sichere Abschätzung des Fließeintritts erlaubt, konnte bislang noch nicht gezeigt werden.

### Elastizitätsmodul, Schubmodul und Querkontraktionszahl an der Fließgrenze sowie zwischen den Dehngrenzen nach DIN EN ISO 527

Abb. 4.61 (a) zeigt die aus den zyklischen Versuchen gewonnenen (zyklenbezogenen) Kennwerte E-Modul  $E$ , Schubmodul  $G$  (jeweils als Sekantenmoduln) und Querkontraktionszahl  $\nu$  an der jeweiligen Fließgrenze (Index F, Fließen). Abb. 4.61 (b) zeigt die entsprechenden Kennwerte, nach DIN EN ISO 527 definiert zwischen den Dehngrenzen  $\varepsilon_1 = 0,0005$  und  $\varepsilon_2 = 0,0025$  (Index t, tension), jeweils aufgetragen über die Temperatur.

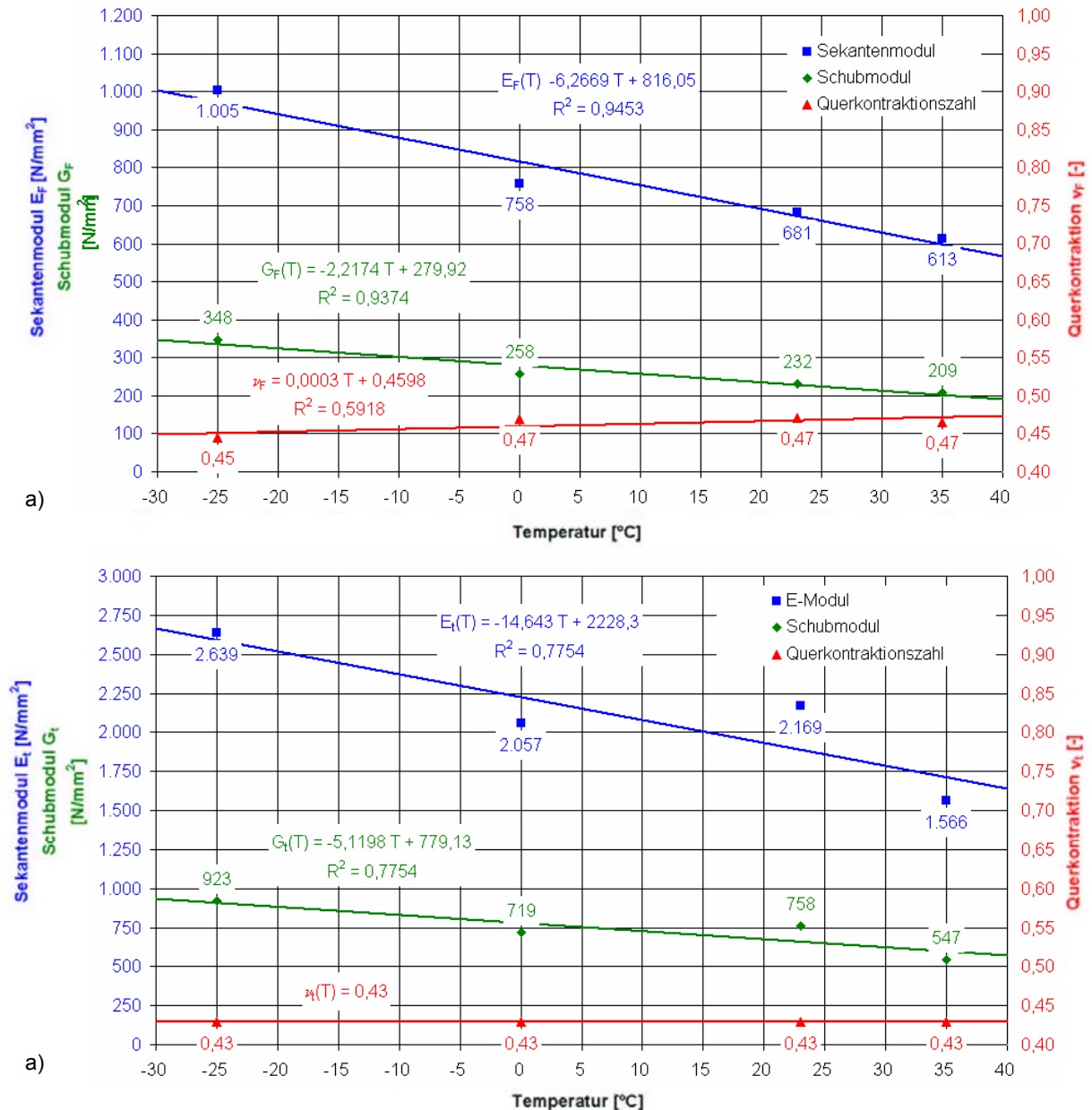


Abb. 4.61 a) Sekantenmodul  $E_F$ , Schubmodul  $G_F$  und Querkontraktionszahl  $\nu_F$  (zyklenbezogen) an der Fließgrenze; b) E-Modul  $E_t$ , Schubmodul  $G_t$  und Querkontraktionszahl  $\nu_t$  zwischen den Dehngrenzen  $\varepsilon_1 = 0,0005$  und  $\varepsilon_2 = 0,0025$ , jeweils in Abhängigkeit von der Temperatur; zyklische Biaxialversuche, ®ASAHI ETFE-Folie FLUON NJ, d=250  $\mu\text{m}$

## Abschätzung der Einflüsse aus Lastwiederholung und temperaturabhängiger Dehngeschwindigkeit auf die Ergebnisse

Die dargestellten Versuche dienen, wie bereits zu Beginn des Kapitels 4.4 beschrieben, der Messung des Temperatureinflusses auf das Werkstoffverhalten und auf die einzelnen Bemessungskennwerte. Um auszuschließen, dass sich verschiedene Einflüsse überlagern, sind folgende Überlegungen erforderlich:

Abschätzung des Einflusses der Lastwiederholung: Jede Belastungsstufe wurde dreimal aufgebracht, so dass der Probekörper bei acht Belastungsstufen innerhalb von etwa 15 Minuten 24 mal be- und entlastet wurde. Es ist zu erwarten, dass sich der Probekörper aufgrund der Dissipationsenergie bei wiederholter Belastung erwärmt.

Nach MENGES, HABERSTROH, MICHAELI und SCHMACHTENBERG 2002 (S. 217) [111] lässt sich die Eigenerwärmung bei schwingender Belastung mit elastischen Deformationen für dünnwandige Platten oder Schalen ( $s \ll b < 10 \text{ mm}$ ) folgendermaßen berechnen:

$$\Delta T = E_{(T)} \cdot \varepsilon_a^2 \cdot d_{(T)} \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{s}{\alpha} \quad 4.16$$

mit

- $\Delta T$  = Temperaturerhöhung im Werkstoff durch schwingende Beanspruchung
- $E_{(T)}$  = Modul für die wirkende Werkstofftemperatur
- $\varepsilon_a$  = Schwingungsamplitude
- $d_{(T)}$  = Dämpfung für die wirkende Werkstofftemperatur
- $f$  = Frequenz, mit der die Lastschwingung einwirkt
- $s$  = Wanddicke
- $\alpha$  = Wärmeübergangskoeffizient für den Wärmeaustausch

Nach [111] gilt:

$$\Delta T \sim \frac{\alpha(T)}{E(T)} \quad 4.17$$

Mit den Größenordnungen  $E_{(T)} \cong 10^3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  und  $\alpha \cong 10^1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$  lässt sich abschätzen, dass die an die Umgebung abzuführende Eigenerwärmung der 0,25 mm dünnen ETFE-Folie vernachlässigbar ist. Somit wird ein signifikanter Einfluss des Effektes auf die Ergebnisse bis zur Fließgrenze nicht angenommen.

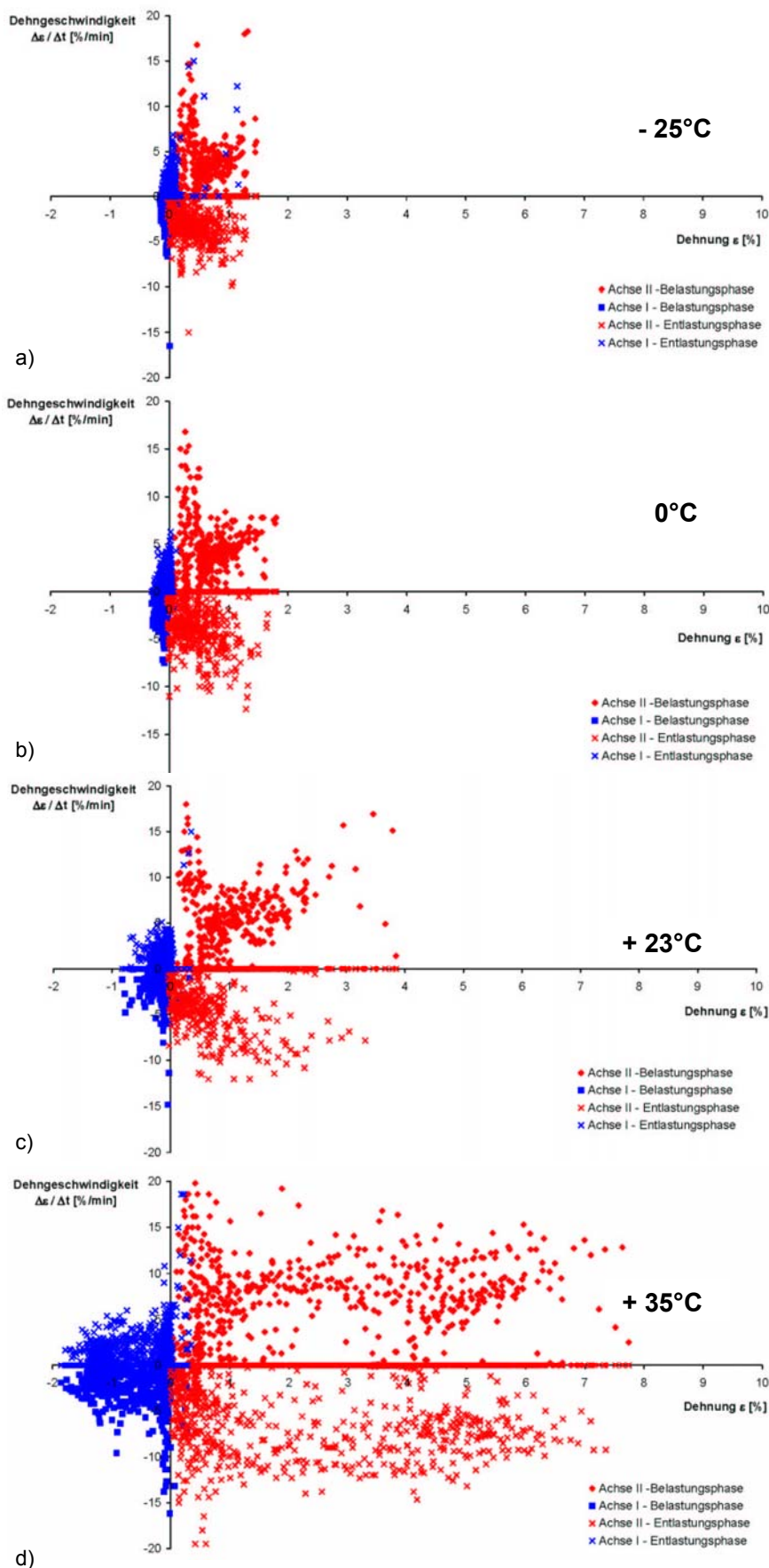
Abschätzung des Einflusses der Dehngeschwindigkeit: Bei Kraftsteuerung, d.h. bei konstanter Kraftsteigerung pro Zeiteinheit (Traversengeschwindigkeit  $v_{T,II} = 0,2 \text{ (kN/m)/s}$ ;  $v_{T,I} \cong 0,07 \text{ (kN/m)/s}$ ) ist die Dehnung des Probekörpers von seiner Steifigkeit abhängig. Da auch die Steifigkeit temperaturabhängig ist, ergeben sich bei kraftgesteuerten Versuchen mit konstanter Kraftsteigerung pro Zeiteinheit grundsätzlich differente Dehngeschwindigkeiten für unterschiedliche Temperaturen.

Abb. 4.62 zeigt die Dehngeschwindigkeiten  $\dot{\varepsilon} = \Delta\varepsilon/\Delta t$ , bezogen auf das jeweils kleinste gemessene Zeitintervall für alle Messungen eines Versuchs, dargestellt in jeweils einem

Diagramm für eine Temperaturstufe. Das jeweils gemessene Zeitintervall der Versuche bei 0°C bis +35°C betrug  $\Delta t = 0,5 \text{ s}$ . Abweichend hiervon, musste versuchsbedingt bei -25°C ein größeres Zeitintervall  $\Delta t = 1,0 \text{ s}$  gewählt werden, da die Dehnungsantwort mit abnehmender Temperatur zunehmend zeitverzögert erfolgt, und bei  $\Delta t = 0,5 \text{ s}$  nicht mehr im gleichen Intervall gelegen hätte. Dieses Phänomen zeigt, dass die kraftgesteuerten Versuche bei viskoelastischen Werkstoffen nur eine begrenzte Interpretation der Ergebnisse ermöglichen. Dehngeschwindigkeitsgesteuerte Kurzzeitzugversuche mit konstanter Dehngeschwindigkeit sind daher bei viskoelastischen Werkstoffen vorzuziehen.

Abb. 4.63 zeigt die Dehngeschwindigkeit  $\dot{\varepsilon} = \Delta\varepsilon/\Delta t$  für ein größeres Intervall, und zwar für das Dehnungsintervall  $\varepsilon_{\min}$  bis  $\varepsilon_{\max}$  (gemessen zwischen der minimalen Dehnung und der maximalen Dehnung zwischen zwei Lastpeaks), aufgetragen für alle Laststufen, dargestellt in jeweils einem Diagramm für eine Temperaturstufe. Die Schwankungsbreite ist bei dem großen Intervall erwartungsgemäß deutlich geringer.

Die Punktwolken in den o.g. Abbildungen zeigen, dass sowohl für kleine als auch große Intervalle die Dehngeschwindigkeiten für alle Temperaturen in derselben Größenordnung (Zehnerpotenz) liegen:  $\dot{\varepsilon}_{-25^\circ\text{C}} \approx \dot{\varepsilon}_{0^\circ\text{C}} \approx \dot{\varepsilon}_{+23^\circ\text{C}} \approx \dot{\varepsilon}_{+35^\circ\text{C}} \cong 10^1 \text{ \%}/\text{min}$ . Da, wie in der Literatur beschrieben und später noch gezeigt wird, Temperaturdifferenzen einen wesentlich stärkeren Einfluss auf die Eigenschaften viskoelastischer Polymerwerkstoffe haben, als die Dehngeschwindigkeit, werden die Differenzen der Ergebnisse für die einzelnen Temperaturstufen maßgeblich auf die Änderung der Temperatur zurückgeführt.



Die nebenstehenden Abbildungen zeigen die errechneten Dehngeschwindigkeiten, bezogen auf jedes gemessene Zeitintervall, in Abhängigkeit der Dehnung:

Abb. 4.62

**Dehngeschwindigkeiten**  
 $\dot{\varepsilon} = \Delta\varepsilon / \Delta t$  im gemessenen Zeitintervall

$\Delta t = 0,5 \text{ bis } 1,0 \text{ s}$ ,

Belastungsphasen (i.d.R. im I. und III. Quadranten), Entlastungsphasen i.d.R. im II. und IV. Quadranten) in Abhängigkeit von der Dehnung

Achse I (blau)

Achse II (rot)

zyklische Biaxialversuche,  
 ®ASAHI ETFE-Folie FLUON NJ,  $d=250 \mu\text{m}$

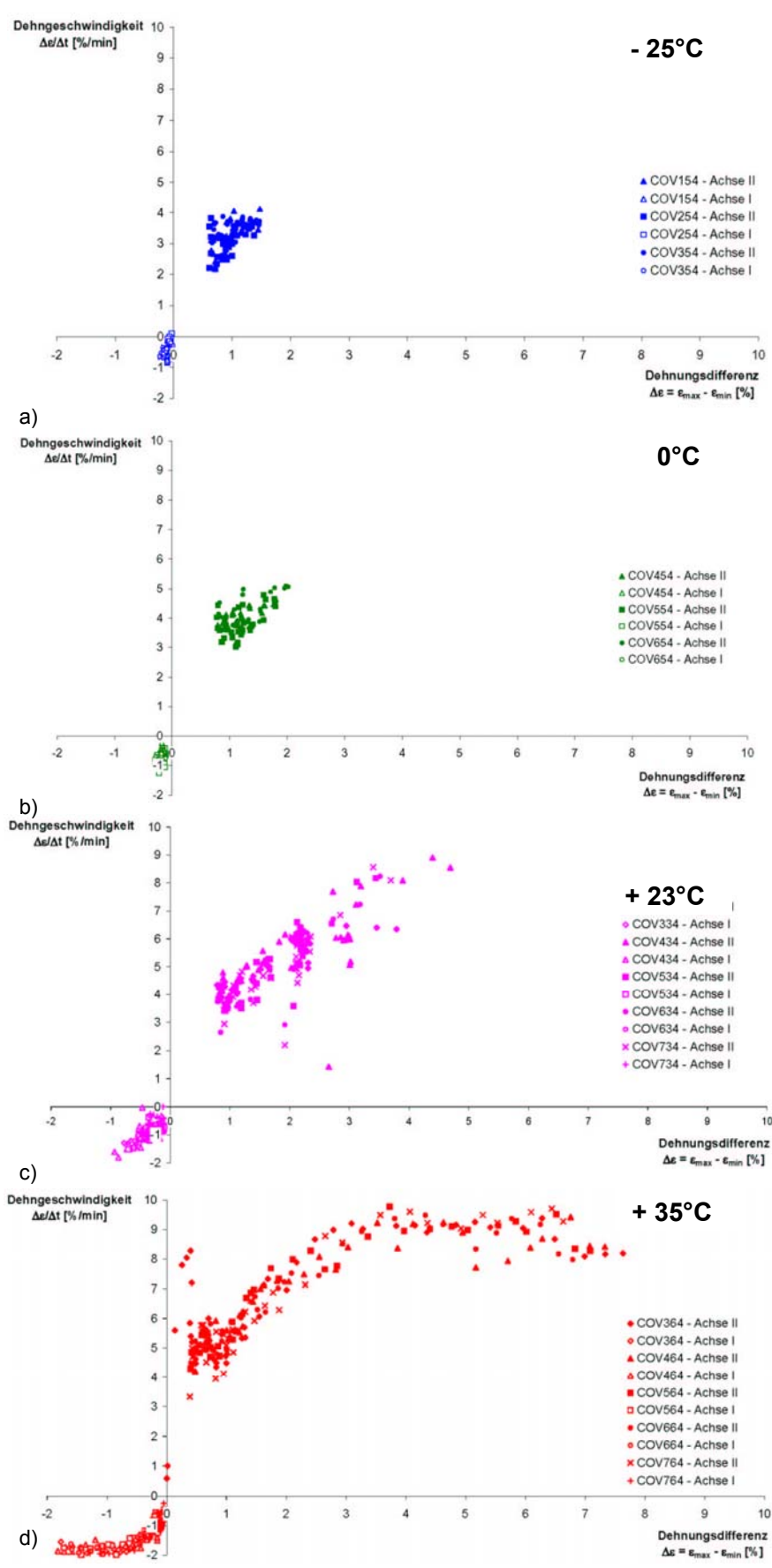
Temperaturen:

a) - 25°C;  $\Delta t = 1,0 \text{ s}$

b) 0°C;  $\Delta t = 0,5 \text{ s}$

c) + 23°C;  $\Delta t = 0,5 \text{ s}$

d) + 35°C;  $\Delta t = 0,5 \text{ s}$



Die nebenstehenden Abbildungen zeigen die Dehngeschwindigkeiten, die sich durchschnittlich in einer Belastungsphase ergeben. Sie sind aufgetragen über die Dehnungsdifferenz zwischen jeder Entlastung und der folgenden Belastung:

Abb. 4.63

**Dehngeschwindigkeiten**  
 $\dot{\epsilon} = (\epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}) / \Delta t$  **in der Belastungsphase zwischen zwei Lastpeaks**

Achse II (im I Quadranten),  
 Achse I (im III Quadranten)

zyklische Biaxialversuche,  
 ®ASAHI ETFE-Folie FLUON NJ, d=250 μm

Temperaturen:

- a) - 25°C
- b) 0°C
- c) + 23°C
- d) + 35°C

#### 4.4.4 Zyklische biaxiale Versuche bei verschiedenen Prüfgeschwindigkeiten

##### 4.4.4.1 Versuchsbedingungen

Die hier ausgewerteten Versuche wurden ebenfalls im Labor des konstruktiven Ingenieurbaus, Fachbereich 10 – Bauwesen, der Universität Duisburg-Essen, unter der Leitung von Herrn Dipl.-Ing. Klaus SAXE durchgeführt (s. Kap. 4.2).

Anlass der Versuche war das Projekt AWD-Arena in Hannover (s. Anhang A). Das eingesetzte und untersuchte Material ist die ETFE-Folie <sup>®</sup>ASAHI FLUON ETFE NJ ( $d = 250 \mu\text{m}$ ). Die Versuche dienen der Abschätzung des Einflusses der Prüfgeschwindigkeit auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten der Folie. Das biaxiale Beanspruchungsverhältnis beträgt auch bei diesem kraftgesteuerten Versuch (konstante Laststeigerung pro Zeiteinheit) 3:1 (vgl. Kap. 4.4.3). Er beinhaltet die zyklische Beanspruchung mit drei unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten (Traversengeschwindigkeiten). Die Probe wurde mit jeder der drei Prüfgeschwindigkeiten dreimal bis zu einem konstanten Maximalwert bei Raumtemperatur ( $T \cong 23^\circ\text{C}$ ) belastet. Die Prüfparameter sind in Tab. 4.9 dargestellt:

<b>Folienhersteller</b>	®ASAHI GLASS Co., Japan
<b>Material</b>	®ASAHI ETFE-Folie FLUON NJ, transparent
<b>Ort der Prüfung, Datum</b>	Universität Duisburg-Essen, 2004
<b>Prüfart / Norm</b>	biaxial, zyklisch / -
<b>Maschine</b>	Eigenbau; Universität Duisburg-Essen
<b>Prüfer</b>	SAXE, KNOP
<b>Probendicke d</b>	250 $\mu\text{m}$
<b>Abmessungen Messfeld <math>L_M \times L_M</math></b>	100 x 100 mm
<b>Abmessungen Prüffeld <math>L_P \times L_P</math></b>	200 x 200 mm
<b>Prüfgeschwindigkeiten Achse II: <math>v_{T,II,1}; v_{T,II,2}; v_{T,II,3}</math></b>	0,02; 0,2; 0,96 (kN/m)/s
<b>Prüfgeschwindigkeiten Achse I: <math>v_{T,I,1}; v_{T,I,2}; v_{T,I,3}</math></b>	~ 0,007; 0,07; 0,32 (kN/m)/s
<b>Temperatur T</b>	+23° C
<b>Lastzyklen <math>n_Z</math>; Belastungen pro Zyklus <math>n_B</math></b>	3; 3
<b>Belastungsverhältnis <math>F_{II} : F_I</math> (<math>\sigma_{II} : \sigma_I</math>)</b>	3:1 (~3:1)
<b>max. Belastungshöhe <math>F_{II}</math> (<math>\sigma_{II}</math>); <math>F_I</math> (<math>\sigma_I</math>)</b>	3,90 kN/m (15,6 N/mm <sup>2</sup> ); 1,3 kN/m (5,2 N/mm <sup>2</sup> )
<b>Anzahl Proben n</b>	1

Tab. 4.9 Probekörperabmessungen und Versuchsbedingungen, zyklischer biaxialer Zugversuch, <sup>®</sup>ASAHI ETFE-Folie FLUON NJ, 250  $\mu\text{m}$ , transparent



#### 4.4.4.2 Versuchsauswertung

##### Einfluss der Dehngeschwindigkeit auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten

Der Probekörper wurde mit der jeweiligen Prüfgeschwindigkeit je dreimal bis zum Lastniveau  $\max F_I = 1,36 \text{ kN/m}$ ;  $\max F_{II} = 3,90 \text{ kN/m}$  belastet und anschließend auf  $\min F_I = 0,13 \text{ kN/m}$ ;  $\min F_{II} = 0,10 \text{ kN/m}$  wieder entlastet, so dass drei Zyklen mit je drei Lastpeaks, also insgesamt neun Belastungen innerhalb von etwa 21 Minuten gefahren wurden. Die Dehnungen und die aus den Belastungen berechneten (technisch definierten) Spannungen, aufgetragen über die Zeit, ergeben sich aus Abb. 4.64.

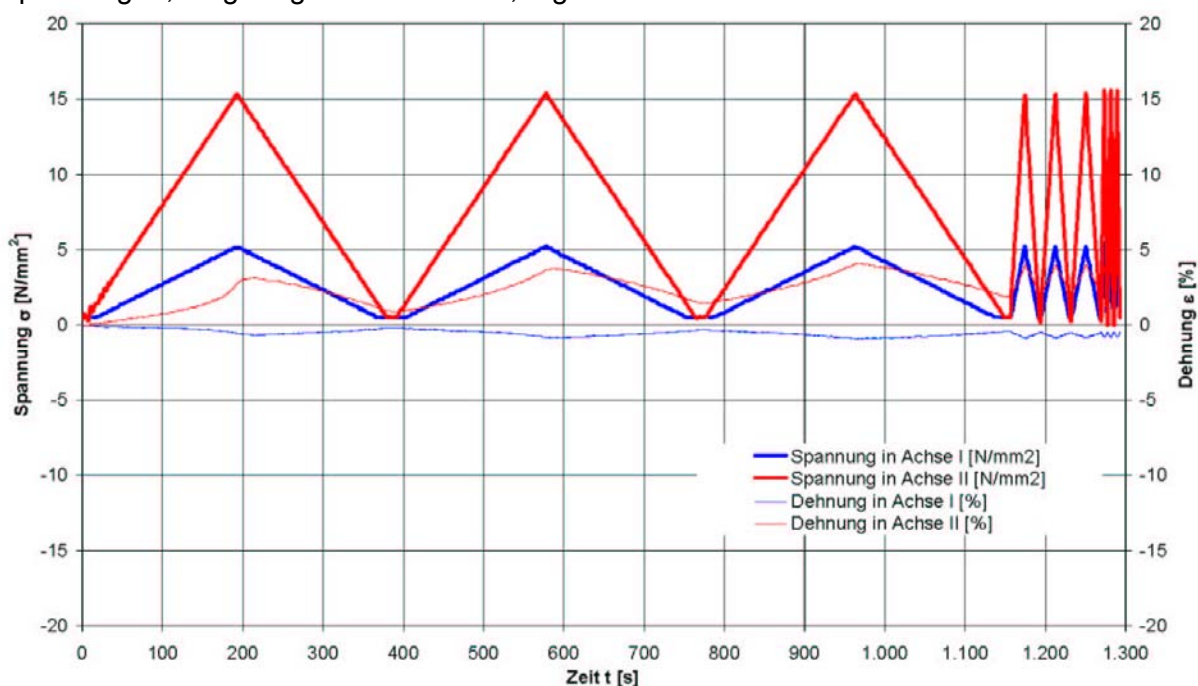


Abb. 4.64 **Spannung-Dehnungs-Zeit-Diagramm:**  $T = +23^\circ\text{C}$ ,  $t = 0 - 1.300 \text{ s}$ ; 3 Lastzyklen à 3 Belastungen mit  $\max \sigma_I = 1,36 \text{ kN/m}$ ;  $\max F_{II} = 3,90 \text{ kN/m}$  und  $\min F_I = 0,13 \text{ kN/m}$ ;  $\min F_{II} = 0,10 \text{ kN/m}$  (Achse I = Extrusionsrichtung / Achse II = Querrichtung), <sup>®</sup>ASAHI ETFE-Folie FLUON NJ,  $d = 250 \mu\text{m}$

Durch die konstante Kraftaufbringung pro Zeiteinheit ist die Dehngeschwindigkeit über die Spannung und über die Dehnung veränderlich. Abb. 4.65 zeigt die Dehngeschwindigkeiten  $\dot{\epsilon} = \Delta\epsilon/\Delta t$  in den Achsen I und II, bezogen auf das jeweilige Zeitintervall ( $\Delta t_{(v1)} = 2,5 \text{ s}$ ;  $\Delta t_{(v2)} = 1,0 \text{ s}$  und  $\Delta t_{(v3)} = 0,2 \text{ s}$ ), in Abhängigkeit von der Spannung  $\sigma_{I,II}$ . Während sich für die beiden Dehngeschwindigkeiten  $v_1 = 0,02 \text{ kN/m/s}$  und  $v_2 = 0,2 \text{ kN/m/s}$  eine annähernd konstante Dehngeschwindigkeit bis zur Maximallast ergibt, weist  $v_3 = 0,96 \text{ kN/m/s}$  große Schwankungen auf. Im Mittel ergeben sich in der Belastungsphase folgende genäherte Dehngeschwindigkeiten in den beiden Achsen:

Achse I:  $\dot{\epsilon}_{I, v1(MW)} = -0,2 \text{ \%/min}$ ;  $\dot{\epsilon}_{I, v2(MW)} = -1,2 \text{ \%/min}$ ;  $\dot{\epsilon}_{I, v3(MW)} = -4,9 \text{ \%/min}$ .

Achse II:  $\dot{\epsilon}_{II, v1(MW)} = +0,9 \text{ \%/min}$ ;  $\dot{\epsilon}_{II, v2(MW)} = +6,5 \text{ \%/min}$ ;  $\dot{\epsilon}_{II, v3(MW)} = +27,9 \text{ \%/min}$ .

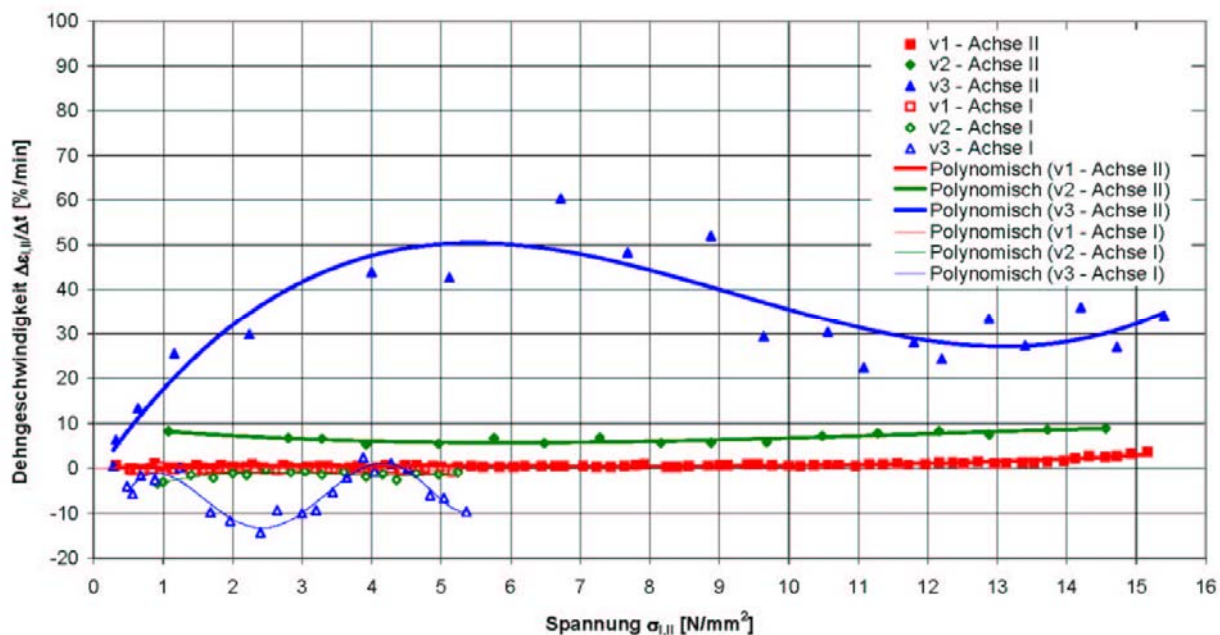


Abb. 4.65 **Dehngeschwindigkeiten  $\dot{\epsilon} = \Delta\epsilon / \Delta t$  der 1. Belastung im Zyklus** im gemessenen Zeitintervall ( $\Delta t_{(v1)} = 2,5 \text{ s}$ ;  $\Delta t_{(v2)} = 1,0 \text{ s}$  und  $\Delta t_{(v3)} = 0,2 \text{ s}$ ), in Abhängigkeit von der Spannung  $\sigma$ ;  $v_1 = 0,02 \text{ kN/m/s}$  (rot);  $v_2 = 0,2 \text{ kN/m/s}$  (grün) und  $v_3 = 0,96 \text{ kN/m/s}$  (blau); zyklische Biaxialversuche, <sup>®</sup>ASAHI ETFE-Folie FLUON NJ,  $d=250 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $T = +23^\circ\text{C}$

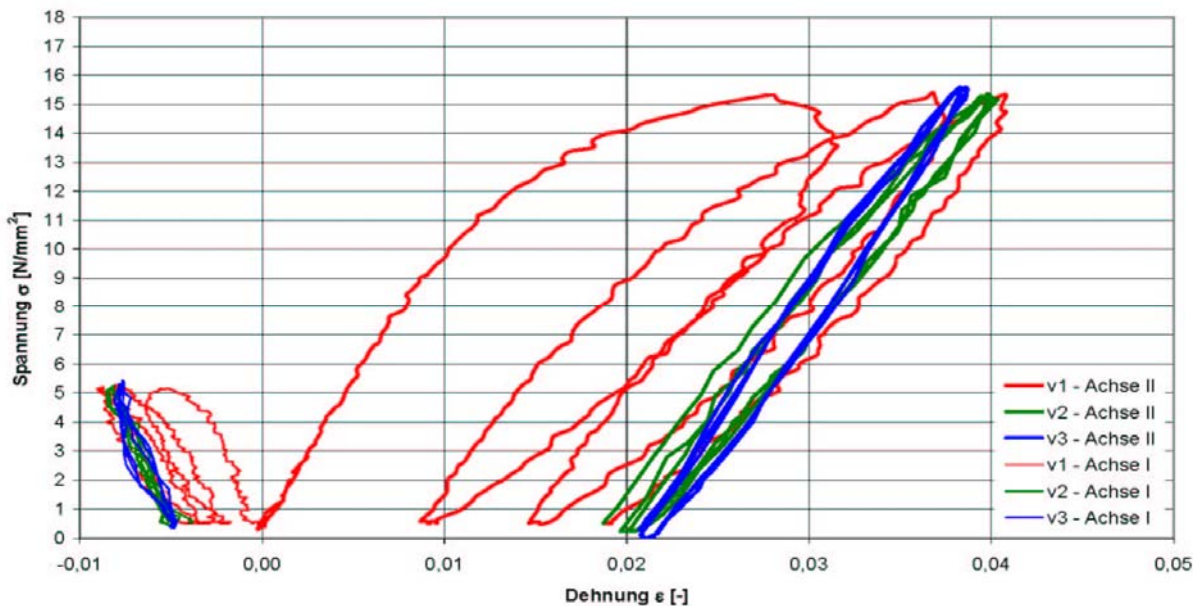


Abb. 4.66 Spannungs-Dehnungs-Diagramm  $\sigma - \epsilon$  für die 3 Lastzyklen à 3 Belastungen; Prüfgeschwindigkeiten (kraftgesteuert):  $v_1 = 0,02 \text{ kN/m/s}$  (rot);  $v_2 = 0,2 \text{ kN/m/s}$  (grün) und  $v_3 = 0,96 \text{ kN/m/s}$  (blau); Achse II (positive Dehnungen); Achse I (negative Dehnungen); zyklische Biaxialversuche, <sup>®</sup>ASAHI ETFE-Folie FLUON NJ,  $d=250 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $T = +23^\circ\text{C}$

In Abb. 4.66 sind die aus den Kräften berechneten (technisch definierten) Spannungen über die Dehnungen aufgetragen. Abb. 4.67 zeigt hingegen das zyklusbezogene Spannungs-Dehnungs-Diagramm für die drei Prüfgeschwindigkeiten jeweils für die 1. Belastung im Zyklus. Hierbei wurden die Restdehnungen aus der Belastungsgeschichte eliminiert, die Kurven also horizontal in den Ursprung verschoben.

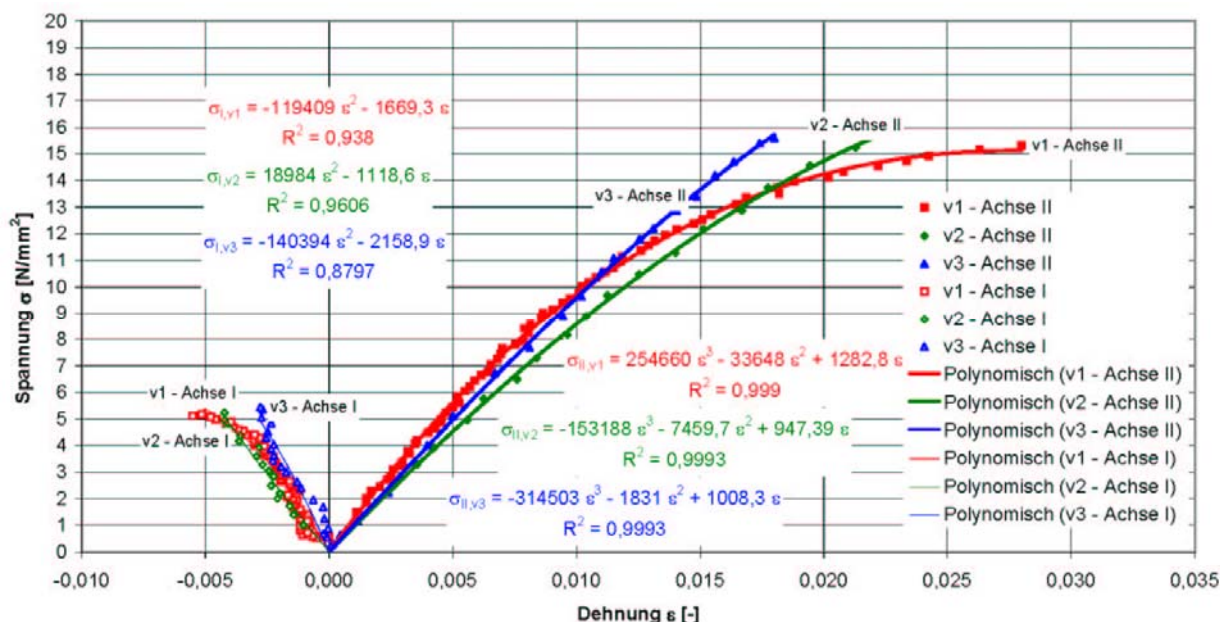


Abb. 4.67 Spannungs-Dehnungs-Diagramm für die jeweils 1. Belastung im Zyklus (zyklusbezogen, d.h. durch Elimination der Restdehnungen aus vorhergehenden Belastungen) zyklische Biaxialversuche, <sup>®</sup>ASAHI ETFE-Folie FLUON NJ, d=250  $\mu\text{m}$ , T = +23°C

Die Fließgrenze wird nur für die Prüfgeschwindigkeit  $v_1 = 0,02 \text{ kN/m/s}$  (rote Kurven) erreicht. Die beiden höheren Prüfgeschwindigkeiten ( $v_2 = 0,2 \text{ kN/m/s}$ ; grüne Kurven und  $v_3 = 0,96 \text{ kN/m/s}$ ; blaue Kurven) zeigen bis zur Maximalbeanspruchung in Achse II ( $\max \sigma_{II} = 15,6 \text{ N/mm}^2$ ) hingegen kein Fließverhalten.

Dadurch, dass die Fließgrenze bereits bei der ersten Belastung im ersten Zyklus überschritten wird, sind die Steifigkeiten der nachfolgenden Belastungen verändert und daher wenig aussagekräftig. Lediglich die erste Belastung mit der Prüfgeschwindigkeit  $v_1 = 0,02 \text{ kN/m/s}$  liefert daher eine Vergleichsmöglichkeit mit den zuvor dargestellten Temperaturversuchen, die mit der Prüfgeschwindigkeit  $v = 0,2 \text{ kN/m/s}$  gefahren wurden.

#### 4.4.4.3 Bestimmung eines Zeit-Temperatur-Verschiebungsfaktors

Abb. 4.68 zeigt die Spannungs-Dehnungs-Verläufe für die beiden Prüfgeschwindigkeiten  $v = 0,02 \text{ kN/m/s}$  (Belastungsgeschwindigkeitstest) und  $v = 0,2 \text{ kN/m/s}$  (Temperaturtest). Beide Proben wurden derselben Materialcharge entnommen und mit Ausnahme der Prüfgeschwindigkeit mit denselben Parametern durchgeführt ( $T = +23^\circ\text{C}$ , Spannungsverhältnis 3:1).

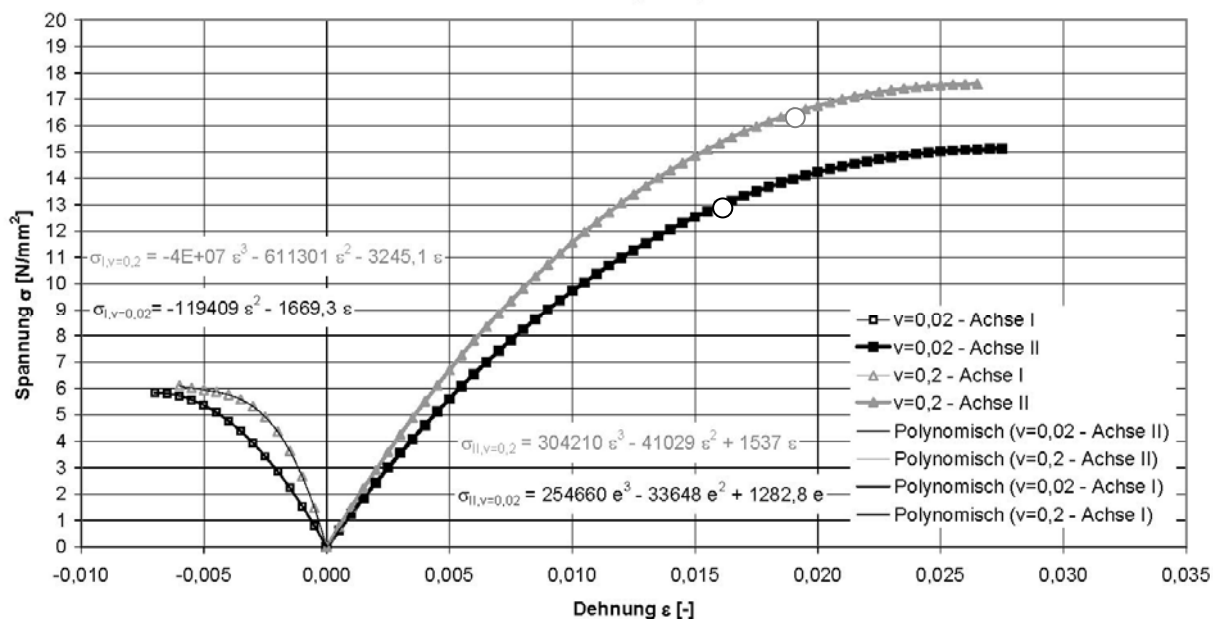


Abb. 4.68 Spannungs-Dehnungs-Diagramm, Vergleich zweier Prüfgeschwindigkeiten: schwarze Kurven  $v = 0,02 \text{ kN/m/s}$  (aus Belastungsgeschwindigkeitstest), graue Kurven:  $v = 0,2 \text{ kN/m/s}$  (aus Temperaturtest); zyklische Biaxialversuche, <sup>®</sup>ASAHI ETFE-Folie FLUON NJ,  $d=250 \mu\text{m}$ ,  $T = +23^\circ\text{C}$

Der Vergleich der beiden Kurven zeigt, dass sich eine Verringerung der Prüf- bzw. Dehngeschwindigkeit analog auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten auswirkt, wie eine Erhöhung der Temperatur. Die Reduzierung der Dehngeschwindigkeit führt ebenso wie eine Temperaturerhöhung zu einer geringeren Fließspannung, Fließdehnung und Steifigkeit. ETFE-Folie zeigt also ein typisches Verhalten viskoelastischer Polymerwerkstoffe. Es wird in der Literatur als **Zeit-Temperatur-Verschiebungsprinzip ZTV** (engl.: **time-temperature shift principle tts**) bezeichnet.

Bestimmt man die mittleren Dehngeschwindigkeiten für den Prüfgeschwindigkeitsversuch ( $T = +23^\circ\text{C}$ ,  $v = 0,02 \text{ kN/m/s}$ ) und für den Temperaturversuch ( $T = +23^\circ\text{C}$ ,  $v = 0,2 \text{ kN/m/s}$ ) so ergeben sich die beiden folgenden Werte:  $\dot{\epsilon}_{(v=0,02)} = 0,9 \text{ \%/min}$  und  $\dot{\epsilon}_{(v=0,2)} = 5,4 \text{ \%/min}$ . Dies

führt zu einem Verhältnis der beiden Dehngeschwindigkeiten von  $\frac{\dot{\epsilon}_{(v=0,2)}}{\dot{\epsilon}_{(v=0,02)}} \cong \frac{5,4}{0,9} = 6,0$ .

Nach Gleichung D 89 (s. Kapitel D) ergibt sich  $\log a_T = \log \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{ref}} \right) = \log(6,0) = 0,78$ .

Beim Temperaturversuch liegt die ermittelte Fließgrenze (0,2 %-Dehngrenze) bei  $\sigma_{F(v=0,2)} \cong 16,6 \text{ N/mm}^2$  und  $\varepsilon_{F(v=0,2)} \cong 0,0170 [-]$ . Aus dem Prüfgeschwindigkeitsversuch ( $v = 0,02 \text{ kN/m/s}$ ) kann sie mittels o.g. Diagramm (s. Abb. 4.68) abgeschätzt werden zu:

$\sigma_{F(v=0,02)} \cong 13,0 \text{ N/mm}^2$ ;  $\varepsilon_{F(v=0,02)} \cong 0,0155 [-]$ . Bei Anwendung des Zeit-Temperatur-Verschiebungsprinzips, sowie auf der Basis der dargestellten temperaturabhängigen Fließspannungs- und Fließdehnungskurve (s. Abb. 4.69 – Werte identisch mit Abb. 4.59), sollten die Verläufe der Spannungs-Dehnungskurven bei  $T = +23^\circ\text{C}$  und  $\dot{\varepsilon}_{(v=0,02)} \cong 0,9 \text{ \%/min}$  und bei  $T = +33^\circ\text{C}$  und  $\dot{\varepsilon}_{(v=0,2)} \cong 5,4 \text{ \%/min}$  gleich sein.

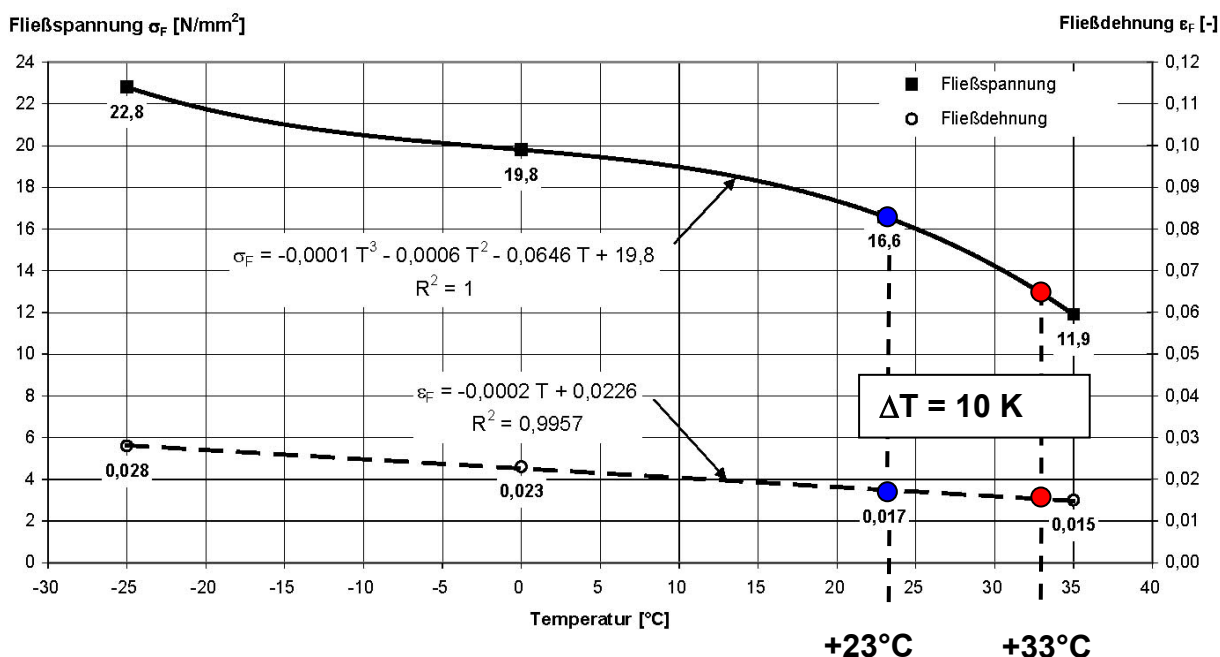


Abb. 4.69 **Fließspannung  $\sigma_{II,F}$  und Fließdehnung  $\varepsilon_{II,F}$  in Achse II, in Abhängigkeit von der Temperatur  $T$ , Spannungsverhältnis 3:1, <sup>®</sup>ASAHI ETFE-Folie FLUON NJ,  $d=250 \mu\text{m}$  (Werte identisch mit Abb. 4.59)**

Eine Verringerung der Dehngeschwindigkeit um den Faktor 6 wäre demnach gleichbedeutend mit einer Temperaturerhöhung um  $\Delta T \cong 10 \text{ Kelvin}$  und umgekehrt. Nach Gleichung D 89 (s. Anhang D) ergäbe sich dann der Aktivierungsfaktor  $k$  der ARRHENIUS-

Funktion zu:

$$\log a_T = \log \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{ref}} \right) = 0,78 = k \left( \frac{1}{296,15 \text{ K}} - \frac{1}{306,15 \text{ K}} \right) \Rightarrow k \cong 7072 [\text{K}]$$

Aufgrund der geringen Datenmenge, des Ansatzes der gemittelten Dehngeschwindigkeiten sowie der Abschätzung der Fließgrenze liefert die Berechnung nur einen Schätzwert für die Zeit-Temperatur-Verschiebung der Folie <sup>®</sup>ASAHI ETFE FLUON NJ,  $d=250 \mu\text{m}$ . In welchen Grenzen der abgeschätzte Verschiebungsfaktor gültig ist und wie genau er ist, wäre durch Parameterstudien auf der Basis wahrer und konstanter Dehngeschwindigkeiten zu klären. Darin wären die einzelnen Parameter Temperatur, Spannungsverhältnis und Dehngeschwindigkeit jeweils separat zu variieren bzw. konstant zu halten.

Zyklische Versuche, bei denen die Fließgrenze überschritten wird, sind in Bezug auf die Herausarbeitung der bis dorthin wirkenden Einflüsse eher ungeeignet, da das Spannungs-Dehnungsverhalten durch den Fließvorgang verändert wird. In der Praxis werden sie aber häufig durchgeführt, um Hinweise auf die Veränderung der Werkstoffeigenschaften durch in situ zu erwartende Beanspruchungssituationen zu gewinnen. Wenn der Zusammenhang zwischen monoaxialem und biaxialem Verhalten (unter mehrachsigen ebenen Spannungszuständen) in Bezug auf die Fließbedingungen, Bruchbedingungen und Steifigkeiten vervollständigt würde, könnte man sich weitgehend auf die Durchführung monoaxialer Versuche beschränken. Es ist dabei zu bedenken, dass die vorgestellten mechanischen Kurzzeitzugversuche nur begrenzte Möglichkeiten bieten, sich dem viskoelastischen Werkstoffverhalten der ETFE-Folie zu nähern. Insbesondere die im folgenden Kapitel angewendete Methode der **Dynamisch-Mechanischen Analyse DMA** (auch **Dynamisch-Thermisch-Mechanische Analyse DTMA** genannt), liefert weitere Erkenntnisse, die zudem einfacher zu gewinnen sind (vgl. auch Kapitel 3.3.4).

## **4.5 Dynamisch-Thermisch-Mechanische Analyse (DMA)**

### **4.5.1 Allgemeines**

Die Methode der DMA zur Erfassung der temperaturabhängigen Eigenschaften eines Werkstoffes ist in Kapitel 3.3.4 beschrieben. Aufgrund der Erkenntnisse aus der aufwändigen Auswertung der zyklischen biaxialen Kurzzeitzugversuche zum Zusammenhang von Zeit und Temperatur der ETFE-Folie, lag die Idee nahe, diese Abhängigkeit auch mit dynamischen Versuchen zu zeigen. Das Unternehmen <sup>®</sup>DYNEON hat dieses Vorhaben unterstützt, und daraufhin DMA-Versuche bei drei unterschiedlichen Frequenzen (1, 10 und 100 Hz) über den Temperaturbereich von 0 bis 250°C im unternehmenseigenen Labor durchgeführt und die Ergebnisse für diese Arbeit zur Verfügung gestellt. Sie sind als Diagramm in Abb. 4.70 dargestellt. Es beinhaltet die Messergebnisse des Speichermoduls  $E'$  und des Verlustfaktors  $\tan \delta$  für einen prismatischen Probekörper aus dem Granulat <sup>®</sup>DYNEON ET 6235.

### **4.5.2 Versuchsauswertung und Interpretation der Ergebnisse**

#### **Einfluss der Temperatur T auf E-Modul und Glasübergangstemperatur T<sub>g</sub>**

Entsprechend Kap. 3.3.4 setzt sich der so genannte komplexe Modul  $E^*$  (analog zu  $G^*$ ) aus dem Realteil  $E'$  (Speichermodul) und dem Imaginärteil  $i \cdot E''$  (Verlustmodul) zusammen.  $E^*$  ist bei HOOKE'schem Verhalten identisch mit dem E-Modul. Bei einem HOOKE'schen Festkörper ist die gesamte Energie als mechanische Arbeit im System gespeichert, so dass hier der Imaginärteil zu Null wird. (Bei einer reinen NEWTON'schen Flüssigkeit wäre hingegen der Realteil Null.) Bei Dehnungen im hier durchgeführten Zugschwingversuch im Dehnungsschwellbereich bis  $\varepsilon \cong 0,1$  % wird HOOKE'sches Verhalten angesetzt, so dass der gemessene Speichermodul  $E'$  mit hinreichender Genauigkeit dem E-Modul  $E$  entspricht:

$$E'' \cong 0 \Rightarrow E^*_{\text{Hooke}} = E \cong E' \quad (4.18)$$

Der Einfluss steigender Temperatur ist in dem Diagramm in Abb. 4.70 deutlich erkennbar. Bis etwa 70°C fällt der Modul bei gleicher Frequenz durchschnittlich um etwa 60 N/mm<sup>2</sup> pro 10 Kelvin ab, oberhalb von 70°C deutlich stärker. Ab der Glasübergangstemperatur wird der Temperatureinfluss schwächer. Bei etwa 270°C erreicht ETFE den Schmelzpunkt (s. Abb. 3.11). Der E-Modul geht dann gegen Null.

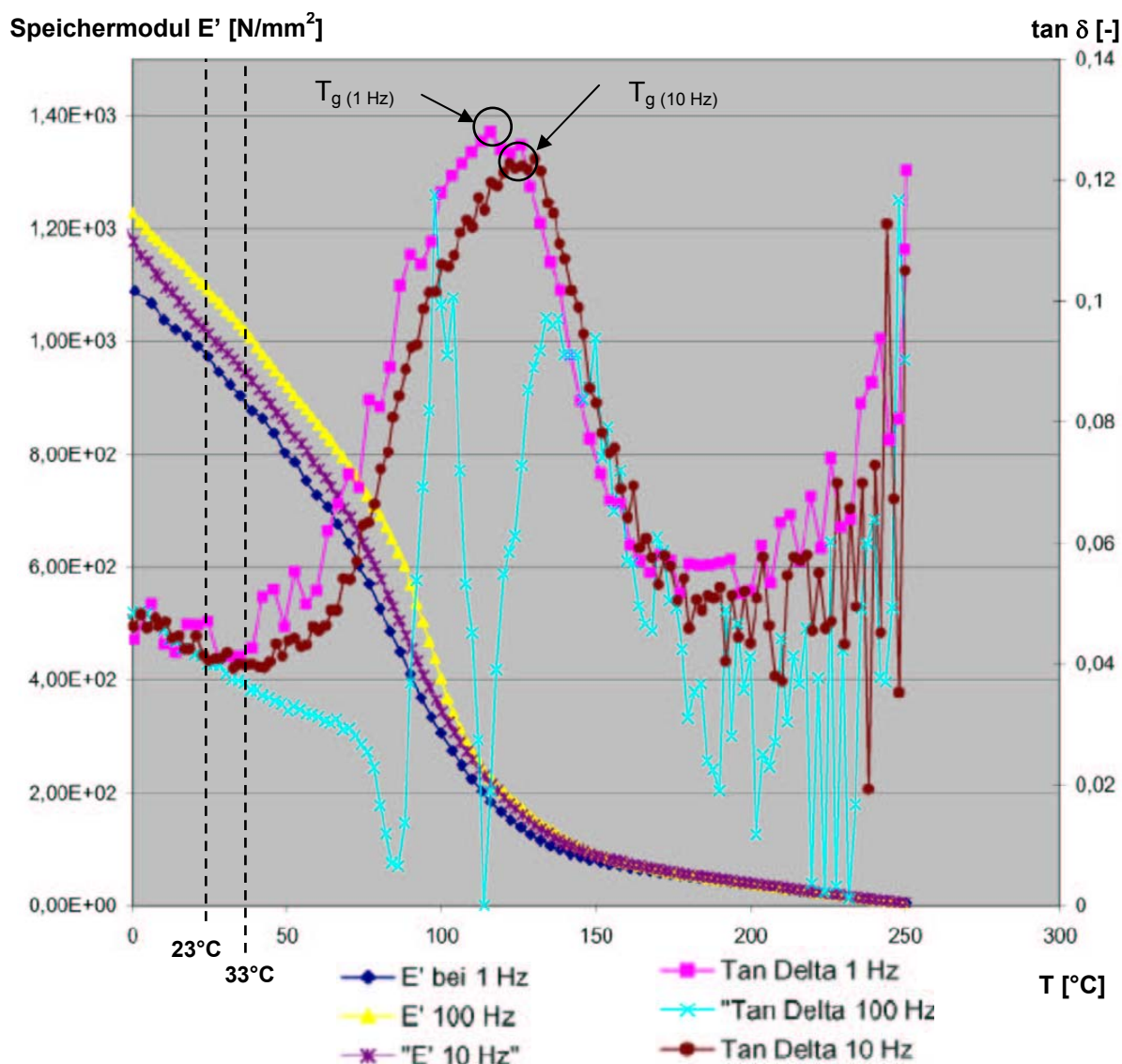


Abb. 4.70 Dynamisch-Thermisch-Mechanische Analyse (DMA): Zug-Schwingversuch mit sinusförmiger Beanspruchung (Frequenzen: 1 Hz, 10 Hz und 100 Hz) im elastischen Dehnungs-Schwellbereich ( $0,01 \leq \varepsilon \leq 0,1$  [%]); Temperatursteigerung  $T/t \cong 2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ; prismatischer Probekörper ( $b/d_0/l_0 = 1/2/25$  mm) aus Granulat  $^{\circ}\text{DYNEON ET 6235}$  (früher:  $^{\circ}\text{HOSTAFILON ET 6235}$ ); Messwerte: Speichermodul  $E' [\text{N/mm}^2] = [\text{MPa}]$  und mechanischer Verlustfaktor  $\tan \delta [-]$ , aufgetragen über die Temperatur ( $0^{\circ}\text{C} \leq T \leq 250^{\circ}\text{C}$ ), Herstellerangaben  $^{\circ}\text{DYNEON}$ , 2006; mit Einträgen, z.B. Glasübergangstemperatur  $T_g$  bei 1 Hz und 10 Hz (bei 100 Hz nicht definierbar)

Erweichungsgebiete, so auch die Glasübergangstemperatur  $T_g$ , sind nach Kap. 3.3.4 durch lokale Maxima des Verlustfaktors  $\tan \delta$  gekennzeichnet. Demnach ergibt sich hier die Glasübergangstemperatur je nach Frequenz der Sinusschwingung zu etwa  $115^{\circ}\text{C}$  (für  $f = 1$  Hz,  $\tan \delta \cong 0,129$ ) und zu etwa  $125^{\circ}\text{C}$  (für  $f = 10$  Hz,  $\tan \delta \cong 0,125$ ). Für  $f = 100$  Hz ist sie nicht eindeutig definierbar. Erregerfrequenz und Dehnungsantwort sind für diese Frequenz ab etwa  $T = +30^{\circ}\text{C}$  nicht mehr zuzuordnen, was sich auch in den großen Schwankungen der Modulkurve ausdrückt.

### Einfluss der Frequenz $f$ (Dehngeschwindigkeit $\dot{\epsilon}$ ) auf den Speichermodul $E'$ und die Glasübergangstemperatur $T_g$

Die Speichermodulkurven für die drei Frequenzen zeigen, dass auch die Geschwindigkeit einen Einfluss auf das Spannungs-Dehnungsverhalten hat. Abb. 4.71 zeigt den Ausschnitt der Modulkurve für den Temperaturbereich zwischen 0 und 70°C, sowie die linearen Regressionen, die eine gute Beschreibung der Kurven in diesem Bereich ermöglichen. Eine Erhöhung der Frequenz um eine Zehnerpotenz bewirkt hier eine Steigerung des Moduls um durchschnittlich etwa 60 N/mm<sup>2</sup>.

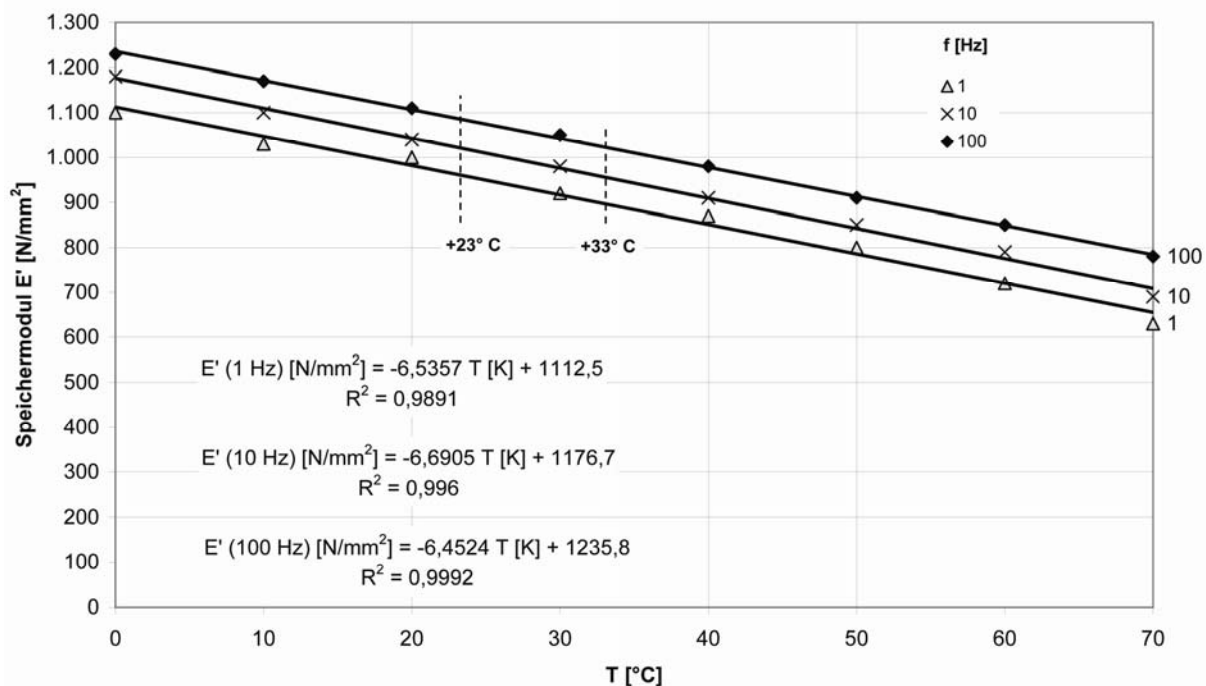


Abb. 4.71 DMA – Zugschwingversuch <sup>®</sup>DYNEON ET 6235: Speichermodul  $E' [N/mm^2]$  in Abhängigkeit von der Temperatur  $T [°C]$  für die drei Frequenzen  $f = 1, 10$  und  $100$  Hz

Abb. 4.72 zeigt den Speichermodul  $E'$  für jeweils eine Temperaturdekade zwischen 0 und 70°C, aufgetragen über den Frequenzbereich 1 - 100 Hz. Die lineare Regression bietet hier ebenfalls eine gute Approximation. Es zeigt sich, dass in diesem Bereich eine Frequenzerhöhung um eine Zehnerpotenz eine Veränderung des Speichermoduls  $E'$  um durchschnittlich 60 N/mm<sup>2</sup> bewirkt. Die Frequenzerhöhung um den Faktor 10 entspricht damit etwa der Veränderung, die durch eine Temperaturreduktion von 10 K hervorgerufen wird.

Abb. 4.70 zeigt, dass auch die Glasübergangstemperatur  $T_g$  von einer Frequenzveränderung beeinflusst wird. Mit fallender Frequenz wandert  $T_g$  nach links, d.h. die Glasübergangstemperatur ist geringer. Das Maximum des Verlustfaktors  $\tan \delta [-]$  ist hingegen etwas größer. Eine Verschiebung der Glasübergangstemperatur in den baupraktisch relevanten Temperaturbereich ist demnach erst bei sehr geringen Dehngeschwindigkeiten zu erwarten. Derartig geringe Dehngeschwindigkeiten fallen dann in den Bereich der Langzeitversuche, die in die Thematik des Kriechens und der Relaxation führen.



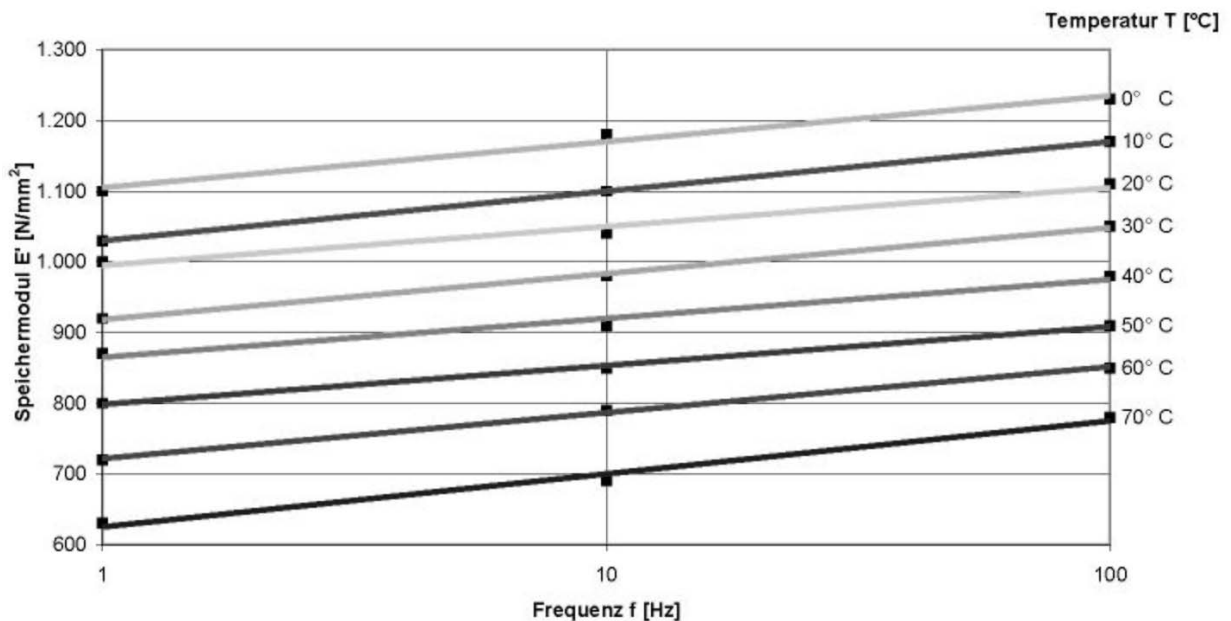


Abb. 4.72 DMA – Zugschwingversuch <sup>®</sup>DYNEON ET 6235: Speichermodul  $E' [N/mm^2]$  in Abhängigkeit von der Frequenz  $f [Hz]$  Temperaturstufen von  $0^\circ C - 70^\circ C$

Die ermittelte Größenordnung der Zeit-Temperatur-Verschiebung der Frequenz und der Temperatur ( $\Delta T = 1 \times 10 \text{ K}$  entspricht etwa  $\Delta f = 10^1 \text{ Hz}$ ) bezüglich dem Speichermodul (E-Modul im Dehnungsschwellbereich ( $0,01 \leq \varepsilon \leq 0,1 \%$ )) entspricht der Größenordnung der nach Kapitel 4.4 für die Fließgrenze ermittelten Zeit-Temperatur-Verschiebung. Sie entspricht auch der in der Literatur angegebenen Größenordnung des Zeit-Temperatur-Verschiebungsfaktors thermoplastischer Werkstoffe.

Abb. 4.73 zeigt in einem 3D-Diagramm die Einflüsse aus Temperatur und Frequenz auf den Speichermodul  $E'$  im Temperaturbereich  $T = 0$  bis  $100^\circ C$  und im Frequenzbereich  $1 - 100 \text{ Hz}$ . Da eine Frequenzerhöhung zu einer proportionalen Erhöhung der Dehngeschwindigkeit führt und bei HOOKE'schem Verhalten der Speichermodul gleich dem E-Modul ist, bildet dieses Diagramm die Zeit-Temperatur-Verschiebung bzgl. der Dehnsteifigkeit der untersuchten ETFE-Probekörper im betrachteten Bereich ab.

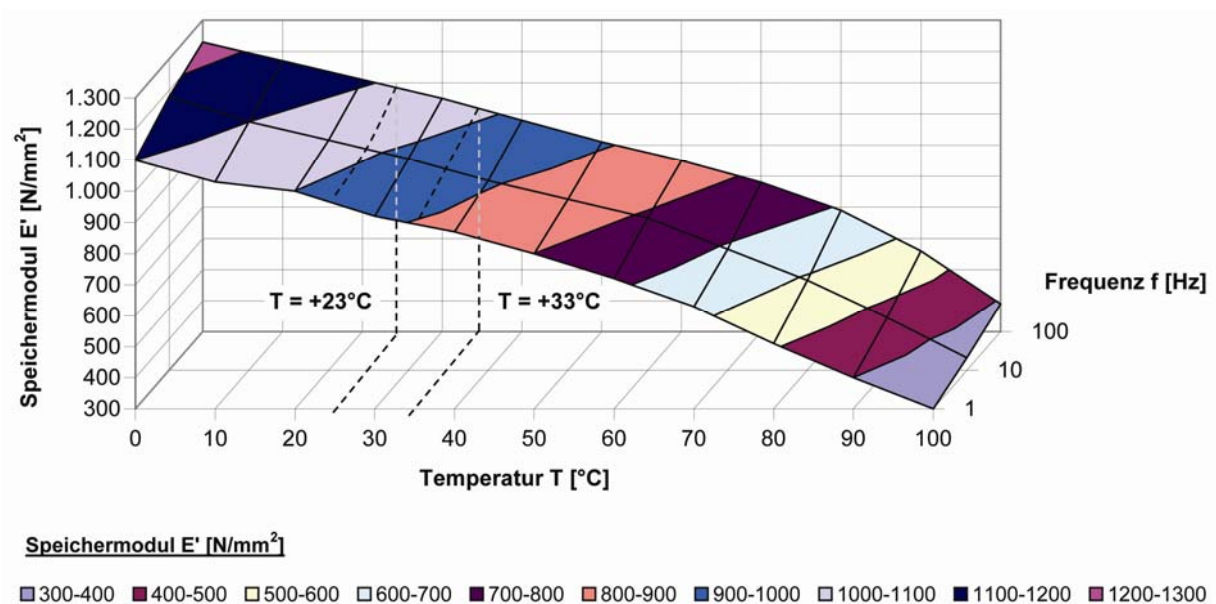


Abb. 4.73 3D-Diagramm; DMA – Zugschwingversuch <sup>®</sup>DYNEON ET 6235: Speichermodul  $E'$  [ $\text{N/mm}^2$ ] in Abhängigkeit von der Temperatur  $T$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] und der Frequenz  $f$  [ $\text{Hz}$ ]

### 4.5.3 Beispielrechnung

Die folgende Beispielrechnung soll den Bezug der Zeit-Temperatur-Verschiebung auf real existierende Bauwerke verdeutlichen:

Erreicht eine ETFE-Folienmembran unter einer Windböe eine maximale Dehnung von 2 % innerhalb einer Sekunde, so ergäbe sich daraus eine mittlere Dehngeschwindigkeit von 120 %/min. Wird diese ETFE-Folie hingegen mit einer der Höhe nach gleichen Schneelast binnen 28 Stunden belastet, so resultierte hieraus eine Dehngeschwindigkeit von ca. 0,0012 %/min. Die beiden Dehngeschwindigkeiten differieren um fünf Zehnerpotenzen. Extrapolierte man nun die mittels DMA ermittelte Zeit-Temperaturverschiebung, so wäre die Erhöhung der Dehngeschwindigkeit um 5 Zehnerpotenzen etwa gleichbedeutend mit einer Temperaturabsenkung um 50 Kelvin.

Fazit dieser kurzen Betrachtung ist, dass beide Lastfälle auf völlig unterschiedliche Werkstoffeigenschaften auf der Widerstandsseite stoßen, und dies sowohl die Steifigkeit betreffend, als auch die der Bemessung zugrunde liegenden Grenzwerte. Der bislang nicht berücksichtigte Zusammenhang von Zeit und Temperatur erklärt die große Widerstandsfähigkeit der ETFE-Folien sowohl gegenüber Windböen bei sommerlichen Temperaturen (und hohen Dehngeschwindigkeiten) als auch gegenüber Schneelasten bei tiefen Temperaturen (und geringen Dehngeschwindigkeiten).

Die Zeit-Temperatur-Verschiebung viskoelastischer Werkstoffe liefert den Schlüssel zum Verständnis der Werkstoffeigenschaften der ETFE-Folie und einen wichtigen Baustein zur Herleitung eines probabilistischen Sicherheitskonzeptes für diesen Werkstoff.

## 4.6 Berstversuche

Der Berstversuch beinhaltet die Belastung einer oder mehrerer Folienlagen (Pneu) durch Steigerung der Druckdifferenz an der Folie bzw. an den Folien bis zum Versagen (Bersten). Der Versagensfall tritt ein, wenn die Bruchfestigkeit der Folie oder einer Schweißnaht (an der Schweißnahtkante) erreicht wird. Berstversuche sind bislang nicht genormt. An ETFE-Folien werden sie mit dem Ziel durchgeführt, Kenntnisse über das Spannungs-Dehnungsverhalten – auch oberhalb der Fließgrenze – sowie über das Bruchverhalten zu erlangen. Eine konstante Dehngeschwindigkeit lässt sich bei Berstversuchen nicht einhalten, da die Versuche belastungsgesteuert durchgeführt werden. Selbst bei kreisrunden Modellen weisen alle Punkte auf einem Meridian unterschiedliche Dehnungen und somit auch unterschiedliche Dehngeschwindigkeiten auf. Man unterscheidet zwischen Berstversuchen an kleinmaßstäblichen und großmaßstäblichen Modellen (1:1 Modelle).

### 4.6.1 Berstversuche an 1:1 Modellen

#### Allgemeines

Berstversuche an 1:1-Modellen in praxisüblichen Dimensionen sind aufwändig. Bei einer derzeit maximalen Bahnenbreite von 1.600 mm werden zu ihrer Herstellung mehrere Folienbahnen mittels Schweißnähten aneinandergesetzt. Da die Bruchfestigkeit von ETFE-Foliensystemen i.d.R. von der Schweißnahtqualität (Schwächung an der Schweißnahtkante) abhängt, lässt der ermittelte Berstdruck bei 1:1-Modellen (mit Schweißnähten) im Normalfall keine Aussage über die Festigkeit des Grundmaterials zu.

Bei lang gestreckten rechteckigen 1:1-Modellen kann die Versagensstelle bei Ansatz homogenem Materials und konstanter Foliendicke in der Mitte des (langen) Pneurandes erwartet werden, da hier bei konstanter Belastung die größten Spannungen auftreten. An dieser Stelle versagten auch die Berstversuche an lang gestreckten Pneus über rechteckigem Grundriss von BÜCHEL et. al. (KOCH HIGHTEX, FESTO) 1996 [30] (s. Abb. 4.74 a) sowie von BAUER, STEIGENBERGER et. al. (SKYSPAN) 2003 [188] (s. Abb. 4.74 b). Der Bruch erfolgte jeweils an der Schweißnahtkante der Randschweißnaht.

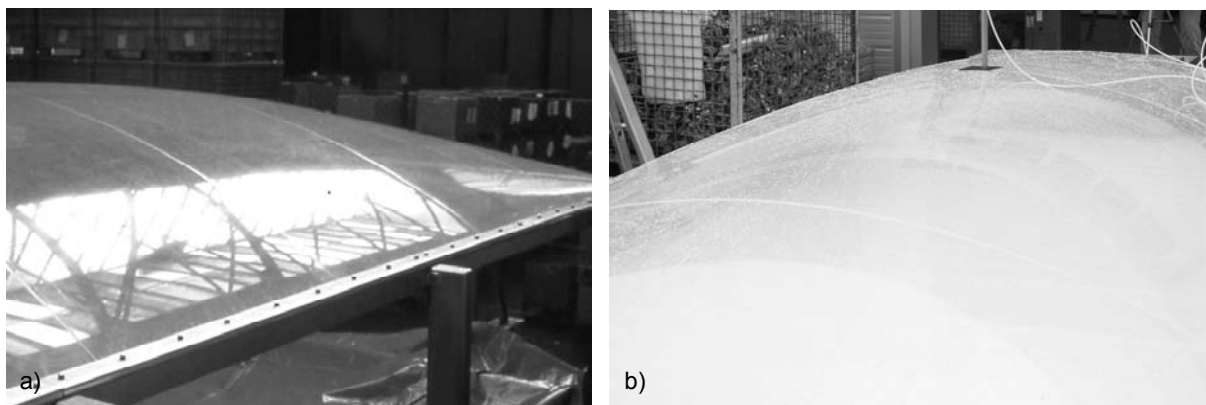


Abb. 4.74 Berstversuche an 1:1 Modellen von ETFE-Folienpneus: a) BÜCHEL et. al., 1996 (5.000 mm x 15.000 mm) [30]; b) BAUER, STEIGENBERGER et. al., 2003 (3.000 mm x 5.800 mm)

#### 4.6.2 Berstversuch 3,0 x 5,8 m

##### Prüfparameter

Am 04.12.2003 wurde von BAUER, STEIGENBERGER et. al. ein Berstversuch an einem 3,0 m x 5,8 m großen Versuchspneu auf dem Betriebsgelände (Freibereich) des Unternehmens SKYSPAN durchgeführt [188]. Der Versuch beinhaltete die Belastung des Pneus durch steigenden Innendruck bis zum Bruch, die anschließende Entlastung, die Reparatur der Bruchstelle durch Verklebung sowie die Wiederbelastung bis zum Bruch. Der Druck wurde durch ein Manometer in der Zuleitung, der maximale Stich durch einen verschieblichen Messstab in Feldmitte der Oberlage des Pneus gemessen. Die Messdaten beider Parameter wurden per Videokamera aufgezeichnet und anschließend ausgewertet. Der Stich im Zuschnittszustand betrug vor der Erstbelastung  $\max f_{0,1} = 592 \text{ mm}$ . Der Zuschnitt wurde so gewählt, dass sich bei Erstbelastung unter einem Pneinnendruck  $p_i = 400 \text{ Pa}$  in Feldmitte ein rechnerischer (und auch gemessener) Stich von  $\max f_{400 \text{ Pa},1} = 600 \text{ mm}$  einstellt. Als Material wurde die Folie <sup>®</sup>NOWOFLON ET 6235, transparent, der Firma <sup>®</sup>NOWOFOL verwendet. Die Schweißnähte wurden im Unternehmen <sup>®</sup>SKYSPAN hergestellt. Während des Versuchs betrug die Lufttemperatur  $T = +2^\circ\text{C} [\pm 1^\circ\text{C}]$ . Die Prüfparameter sind in Tab. 4.10 dargestellt.

<b>Folienhersteller</b>	<sup>®</sup> NOWOFOL
<b>Material</b>	<sup>®</sup> NOWOFLON ET 6235, transparent
<b>Versuchsstand</b>	Eigenbau SKYSPAN
<b>Ort</b>	Rimsting
<b>Datum</b>	04.12.2003
<b>Prüfart</b>	Berstversuch
<b>Norm</b>	keine
<b>Prüfer</b>	Bauer, Steigenberger et. al.
<b>Prüfdauer <math>t_1</math></b>	30 min (Zeit bis zum 1. Bersten)
<b>Temperatur T</b>	Durchführung bei Außentemperatur(Lufttemperatur, $+2^\circ\text{C} (\pm 1^\circ\text{C})$ )
<b>Foliendicken <math>d_o = d_u</math></b>	250 $\mu\text{m}$ (o = obere Folie, u = untere Folie)
<b>Abmessungen <math>L_x; L_y</math></b>	3.000 mm x 5.800 mm ( $L_y$ = Pneubreite, $L_x$ = Pneulänge)
<b>Ausgangsstich <math>\max f_{0,1}</math></b>	592 mm (Formfindungsgeometrie/Zuschnittszustand, gemessen in Feldmitte)
<b>Probenanzahl n</b>	1

Tab. 4.10 Modellabmessungen und Versuchsbedingungen; Berstversuch 2003; ETFE-Folie <sup>®</sup>NOWOFLON ET 6235, d = 250  $\mu\text{m}$ , transparent

## Auswertung und Interpretation der Ergebnisse

In Abb. 4.75 ist der in Feldmitte gemessene Stich  $\max f$  [mm] über den Pneuinnendruck  $p_i$  [Pa] aufgetragen. Analog zur Spannungs-Dehnungs-Kennlinie der Folie steigt der Stich in Feldmitte des Pneus zunächst linear mit dem Druck an. Bei  $p_i \cong 2.000$  Pa wird die Kurve nichtlinear. Dieser nichtlineare Bereich mündet bei  $p_i \cong 3.200$  Pa in einen linearen Verlauf bis zum Pneuversagen (Bersten) bei  $p_{i, \text{Berst}, 1} \cong 4.800$  Pa. Das Versagen erfolgte erwartungsgemäß durch einen breiten Riss an der Nahtkante der Randschweißnaht etwa in der Mitte einer der beiden langen Seiten. Die Entlastungskurve zeigt zunächst einen linearen Verlauf, der bei Absinken unter  $p_i \cong 1.200$  Pa nichtlinear wird. Die Be- und Entlastungskurven im Stich-Druck-Diagramm haben eine Affinität zu Spannungs-Dehnungskurven der ETFE-Folie.

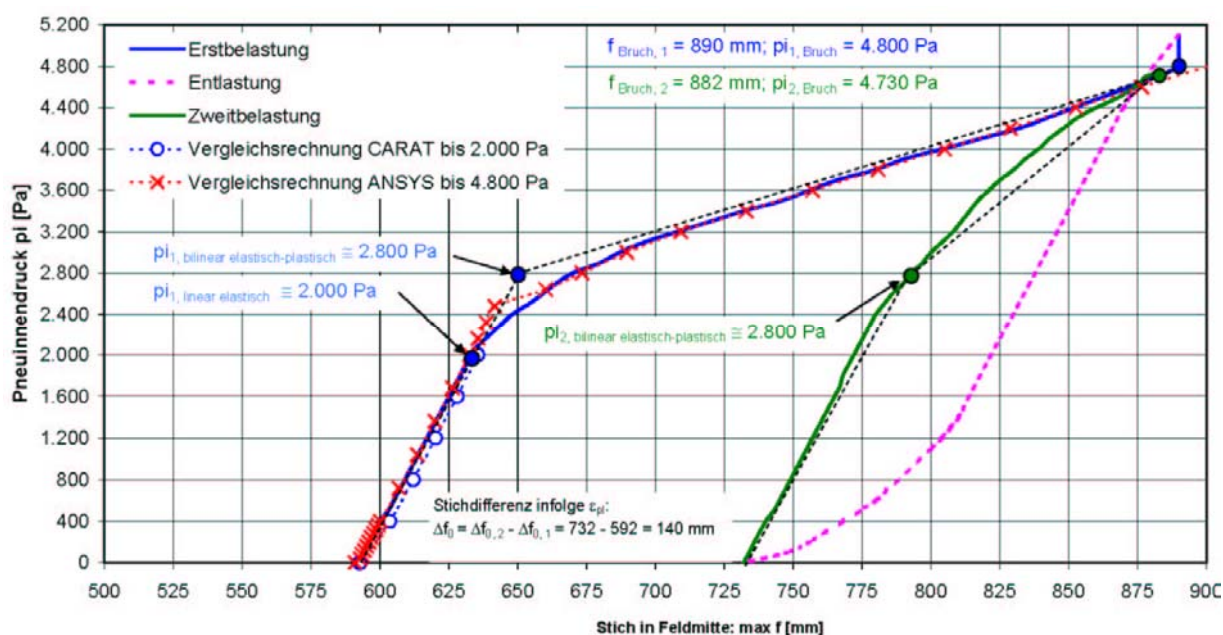


Abb. 4.75 Stich in Feldmitte ( $\max f$ ) [mm] - Pneuinnendruck ( $p_i$ ) [Pa] - Diagramm; Linien: Erstbelastung, Entlastung, Zweitbelastung, Vergleichsrechnung mit CARAT, Vergleichsrechnung mit ANSYS, Berstversuch 2003, <sup>®</sup>NOWOFLON ET 6235,  $d = 250 \mu\text{m}$ , transparent

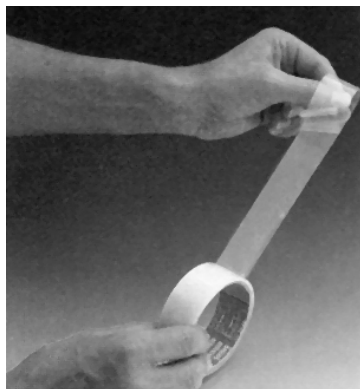


Abb. 4.76 Transparentes ETFE-Klebeband mit ein- o. beidseitiger Klebeschicht, <sup>®</sup>HOECHST [79]

Nach der Entlastung wurde der Riss mit einem ETFE-Klebeband repariert (s. Abb. 4.76) und das System erneut belastet. Die Verstreckung der Folie infolge Erstbelastung führte bei Wiederbelastung zu einem vergrößerten Stich im Zuschnittszustand. Der linear elastische Bereich war bei Wiederbelastung deutlich größer, wies aber nahezu dieselbe Steigung auf. Das Versagen bei Zweitbelastung erfolgte in der Nähe des ersten Versagensortes, jedoch nicht am Klebestreifen. Für die Zweitbelastung ergab sich nahezu derselbe Berstdruck wie bei der Erstbelastung ( $p_{i, \text{Berst}, 1} \cong 4.800$  Pa  $\cong p_{i, \text{Berst}, 2} \cong 4.730$  Pa).

### 4.6.3 FE-Vergleichsrechnung mit CARAT

#### Rechenmodell

Am Beispiel des Berstversuches wird der Einfluss des Zuschnittes auf die Spannungsgröße und -verteilung bei  $p_i = 400 \text{ Pa}$  (formbestimmender Lastfall) und  $p_i = 2.000 \text{ Pa}$  (Proportionalitätsgrenze, Ende des linearen Bereichs) untersucht. Hierfür wurde in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Statik der TU München (Prof. K.-U. BLETZINGER und Dipl.-Ing. J. LINHARD) eine geometrisch nichtlineare Vergleichsrechnung mit dem FE-Programm CARAT durchgeführt. Das Programm basiert auf der **Updated Reference Strategy (URS-Methode)**. Zur Analyse wurde die Fläche mit  $80 \times 40 = 3.200$  vierknotigen, isoparametrischen Membranelementen mit bilinearen Formfunktionen und insgesamt 9.243 Freiheitsgraden diskretisiert. Für die Abmessungen des Pneus ( $L_x = 5,80 \text{ m}$  und  $L_y = 3,00 \text{ m}$ ) ergaben sich damit annähernd quadratische Elemente ( $\Delta L_x = 0,0725 \text{ m}$ ;  $\Delta L_y = 0,075 \text{ m}$ ) (s. Abb. 4.77) im ebenen Ausgangszustand. Die Ergebnisse beinhalten die Ermittlung der Normalspannungen, Schubspannungen, Hauptspannungen, Hauptspannungsrichtungen, Vergleichsspannungen nach VON MISES sowie der Verformungen (Verschiebungen und Verzerrungen) der oberen Folie.

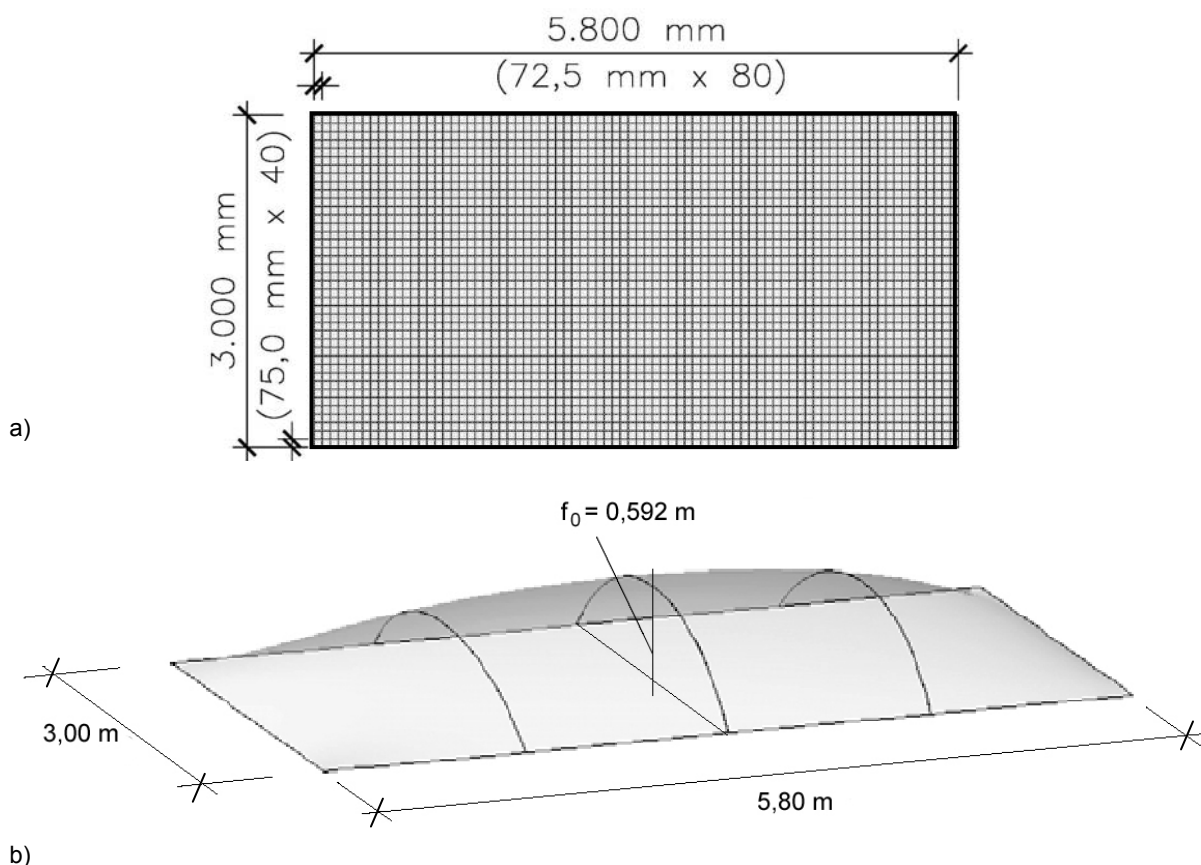


Abb. 4.77 FE-Modell CARAT: a) Diskretisierung der oberen Folie des Pneus mit  $80 \times 40 = 3.200$  Membranelementen, 3.321 Knoten und 2223 Freiheitsgraden; b) Isometrie der 3D-Fläche als spannungslos idealisierter Zuschnittszustand (Formfindungsgeometrie); maximaler Stich in Feldmitte ( $\max f_{0,1} = 0,592 \text{ m}$ ); Berstversuch 2003, <sup>®</sup>NOWOFLON ET 6235,  $d = 250 \mu\text{m}$ , transparent

### Angesetzte Werkstoffparameter

Entsprechend Diagramm in Abb. 4.75 wurde bis zum Pneuinnendruck von  $p_i \cong 2.000 \text{ Pa}$  das HOOKE'sche Werkstoffgesetz unter Ansatz von Homogenität, Isotropie und linearer Elastizität angesetzt. Die Werkstoffparameter wurden aus den Ergebnissen der 3:1-Biaxialversuche unter Berücksichtigung der hier vorliegenden Umgebungstemperatur ( $T \cong +2^\circ\text{C}$ ) und der Größenordnung der durchschnittlichen Dehngeschwindigkeit ( $\dot{\epsilon} \cong 10^{-1} \text{ \%/min}$  für  $p_i = 0 \text{ Pa}$  bis  $p_i = 2.000 \text{ Pa}$ ) wie folgt abgeschätzt:

$$E_{11} = E_{22} = E_{33} = \text{const.} = 1.100 \text{ N/mm}^2; \nu = \text{const.} = 0,45.$$

### Rechenablauf

Mechanisch und pneumatisch vorgespannte Membranen bilden in vielen Fällen eine nicht abwickelbare räumlich gekrümmte Fläche (GAUSS'sche Krümmung  $k \neq 0$ ), die aus ebenen Folien- oder Gewebeteilflächen zusammengefügt wird. Im durchgeführten Berstversuch bestanden die obere und die untere Folienfläche aus jeweils vier verschweißten ebenen Teilflächen. Die folgende rechnerische Simulation erfolgte für die obere Folienfläche.

Der Rechenablauf beginnt mit der ebenen Fläche, bestehend aus den Membranelementen, in der Grundrissgeometrie des Pneus. Dann wird ein Vorspannungszustand vorgegeben, der für eine definierte konstante Flächenlast – im Normalfall der Nenninnendruck – erreicht werden soll. Da die Randgeometrie des Pneus in vielen Fällen keine Minimalfläche mit homogener Spannungsverteilung zulässt, wird eine möglichst spannungsharmonische Form über das Minimum der Differenzenquadrate der Soll-Vorspannung erreicht, bei der die Spannungen in einer gewissen Bandbreite variieren. Die Formfindung liefert in den meisten Fällen, so auch hier, eine eindeutige Lösung in Form einer räumlich gekrümmten Fläche für den formbestimmenden Lastfall der Vorspannung. Im darauf folgenden Schritt wird durch eine rechnerische Rücknahme der Vorspannung die Geometrie der zusammenhängenden, spannungslos idealisierten Teilflächen ermittelt, womit der Fertigungsprozess in umgekehrter Reihenfolge rechnerisch simuliert wird. Diese spannungslose Geometrie wird im Folgenden als Formfindungsgeometrie bezeichnet.

Die Zuschnittsgeometrien, d.h. die Geometrien der ebenen Teilflächen, sollen zusammengesetzt möglichst nahe dieser Formfindungsgeometrie sein. Für den Konfektionär sind jedoch die beiden wesentlichen Kriterien bei der Wahl eines Folienzuschnitts die Minimierung des Verschnittes und die Minimierung des Aufwandes beim Verschweißen. Daher wird in der Praxis die Breite der Teilflächen - unter Berücksichtigung der Folienbahnbreite - so groß wie krümmungsbedingt möglich gewählt. Bei ETFE-Folien wird bislang isotropes Verhalten bis zur Fließgrenze angenommen, so dass hier im Unterschied zu Geweben nicht auf die Orientierung der Bahnen geachtet wird.

Da die Pneuoberfläche im vorliegenden Fall nicht abwickelbar ist (GAUSS'sche Krümmung  $k \neq 0$ ), resultieren aus der Differenz zwischen den aus ebenen Teilflächen gebildeten Zuschnitten und der Formfindungsgeometrie zusätzliche Spannungen, die häufig bei der Berechnung nicht berücksichtigt werden, bzw. programmbedingt nicht berücksichtigt werden können. Die Größe dieser Zusatzspannungen hängt von der GAUSS'schen Krümmung  $k$  der Fläche, von der Schubsteifigkeit  $G$  des Werkstoffes, vom Zuschnitt, d.h. der Form und der Größe der Teilflächen, sowie von der Beanspruchung ab (LINHARD und BLETZINGER 2005 [109]). Die Art des Zuschnittes hat also einen Einfluss auf die Größe der resultierenden Spannungen.

## Untersuchte Zuschnitte

Vergleichsrechnung 1 basiert auf der fiktiven Annahme, dass die Teilflächen nicht eben sondern räumlich gekrümmt sind und zusammengesetzt genau der Formfindungsgeometrie entsprechen, die durch den Formfindungsprozess definiert wurde. Dieser Fall ist in der Praxis nur bei abwickelbaren Flächen erreichbar. Bei dieser Vergleichsrechnung werden also keine Spannungen berücksichtigt, die sich aus Abweichungen eines Zuschnittes von der Formfindungsgeometrie ergeben. Deshalb wurden zwei weitere Vergleichsrechnungen durchgeführt.

Vergleichsrechnung 2 erfolgt an einem praxisüblichen, und auch beim Berstversuch eingesetzten, spannungsoptimierten Zuschnitt, bei dem die Teilflächen mit gekrümmten Rändern (Schweißnähten) zusammengefügt werden. Dieser Zuschnitt liefert in Abhängigkeit von den bereits genannten Kriterien (Schubsteifigkeit, GAUSS'sche Krümmung, Form und Größe der Teilflächen) mehr oder weniger große geometrische Abweichungen der zusammengesetzten ebenen Teilflächen von der räumlich gekrümmten Formfindungsgeometrie, und somit auch von den Spannungen, die für die Formfindungsgeometrie ermittelt wurden (s. Vergleichsrechnung 1). Ein spannungsoptimierter Zuschnitt kann beispielsweise mit den FE-Programmen EASY und CARAT – mit annähernd gleichem geometrischen Ergebnis - ermittelt werden. Die zuschnittsabhängigen (Zusatz-) Spannungen wurden hier mit CARAT berechnet.

Vergleichsrechnung 3 erfolgte am so genannten Flachzuschnitt, bei dem die Fläche aus rechteckigen Teilflächen mit geraden Schweißnähten zusammengefügt wird. Diese zusammengesetzte ebene Fläche entspricht der ebenen Grundrissprojektion des Pneus. Sie führt häufig zu höheren Spannungen unter Last – in Abhängigkeit von den o.g. Kriterien. Dennoch wird auch der Flachzuschnitt in der Praxis eingesetzt.



Da im Berstversuch nur der maximale Stich in Feldmitte  $\max f$  - nicht aber die Dehnung - gemessen wurde, erfolgte eine implizite Verifizierung der Vergleichsrechnungen durch eine Gegenüberstellung der gemessenen und der rechnerischen Stiche (s. Tab. 4.11). Die in der Vergleichsrechnung 2 für den spannungsoptimierten Zuschnitt berechneten Stiche sind in Abb. 4.75 als Punkt-Linie bis zur Proportionalitätsgrenze ( $p_i = 2.000 \text{ Pa}$ ) dargestellt.

Pneu- innendruck [Pascal]	Stich $\max f$ in Feldmitte [mm]			
	Vergleichs- rechnung 1  Formfindungs- geometrie	Vergleichs- rechnung 2  spannungsoptimierter Zuschnitt	Vergleichs- rechnung 3  Flachzuschnitt	gemessen Berstversuch
$p_i = 0 \text{ Pa}$	592	<b>592</b>	0	<b>592</b>
$p_i = 400 \text{ Pa}$	610	<b>601</b>	161	<b>600</b>
$p_i = 2.000 \text{ Pa}$	634	<b>629</b>	276	<b>633</b>

Tab. 4.11 Gemessene und berechnete maximale Stiche  $\max f$  in Feldmitte; Berstversuch 2003; ETFE-Folie ©NOWOFLON ET 6235, 250  $\mu\text{m}$ , transparent

Die berechneten Werte der Formfindungsgeometrie und des spannungsoptimierten Zuschnitts zeigen eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten. Hingegen ließen sich die gemessenen Stiche mit dem Flachzuschnitt erwartungsgemäß nicht erreichen.

Die Abb. 4.78 bis 4.81 zeigen für die Formfindungsgeometrie die Stiche, Radien, Krümmungen, Dehnungen und die über die Versuchsdauer gemittelte Dehngeschwindigkeit in den beiden Hauptachsen der Oberlage des Pneus (Querschnitt und Längsschnitt in Feldmitte) für  $p_i = 0 \text{ Pa}$  und  $p_i = 2.000 \text{ Pa}$ .

Die darauf folgenden Abb. 4.82 bis 4.113 zeigen nacheinander die berechneten Spannungen für die drei Vergleichsrechnungen jeweils für  $p_i = 400 \text{ Pa}$  und  $p_i = 2.000 \text{ Pa}$ . Es wurden die Normalspannungen in lokaler x- und y-Richtung, die zugehörigen Schubspannungen, die beiden Hauptspannungen und die Vergleichsspannungen nach VON MISES berechnet und dargestellt. Darüber hinaus sind die Richtungen der Normal- und der Hauptspannungen abgebildet.

Alle Spannungen wurden als technische Spannungen auf den Ausgangsquerschnitt bezogen und in  $\text{N/mm}^2$  ausgewiesen.

Die Normal- und Hauptspannungsverteilungen weisen lokal begrenzte Bereiche mit negativen Werten (Druckspannungen) auf. In situ entzieht sich die Folie aufgrund der fehlenden Druck- und Biegesteifigkeit diesen, beim verwendeten FE-Schalenelement auftretenden, rein rechnerischen Druckspannungen durch Faltenwurf. Ein signifikanter Einfluss auf die maximalen Zugspannungen in Randmitte wird durch die ausschließlich in den Eckbereichen auftretenden Druckspannungen nicht erwartet.

Auch die Schubspannungen weisen negative Werte auf. Sie ergeben sich durch entgegengesetzt gerichtete Spannungsvektoren der FE-Elemente.

Abb. 4.78 zeigt den Querschnitt (a) und den Längsschnitt (b), jeweils für  $p_i = 0 \text{ Pa}$  (Formfindungsgeometrie) und  $p_i = 2.000 \text{ Pa}$

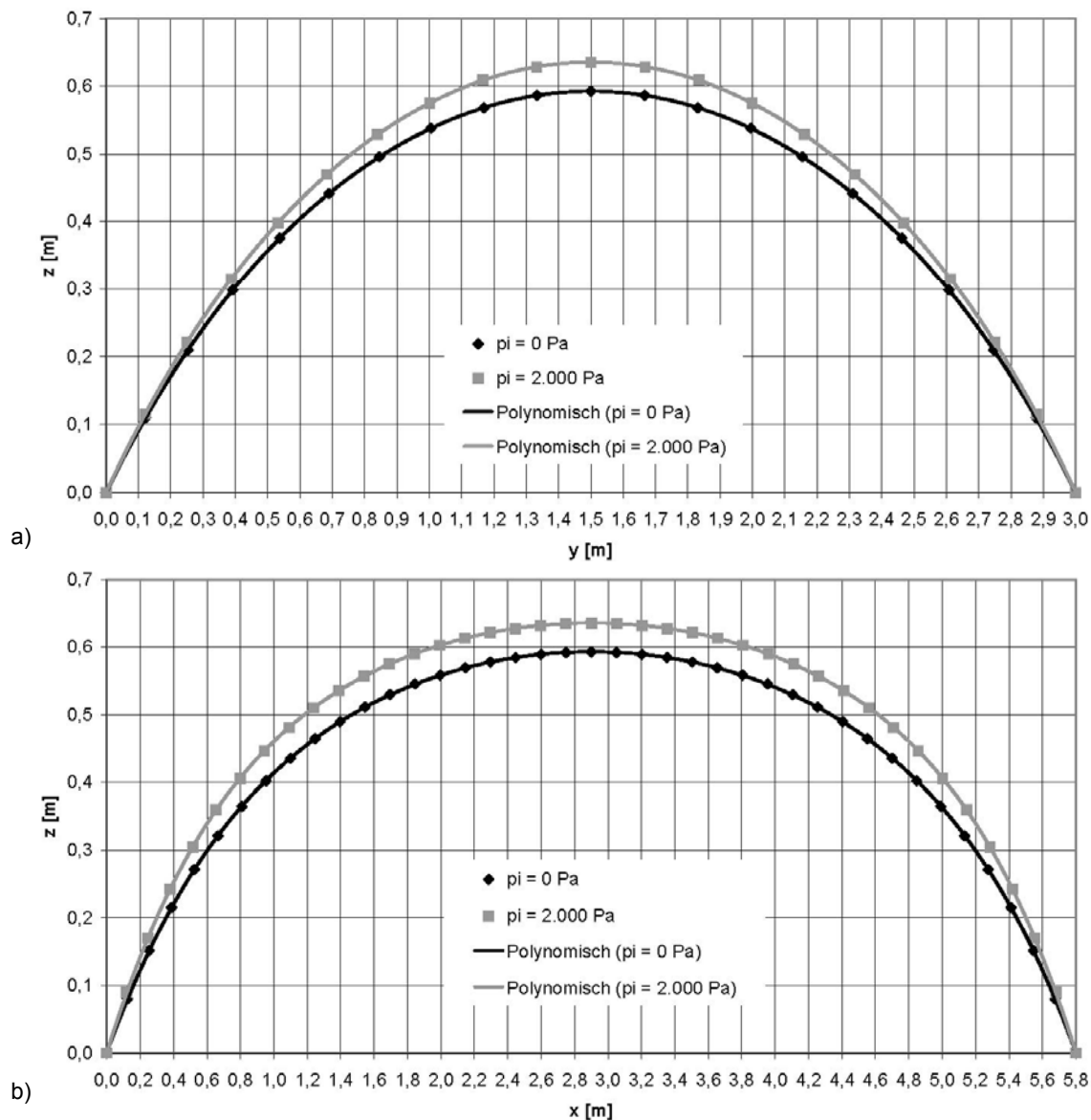
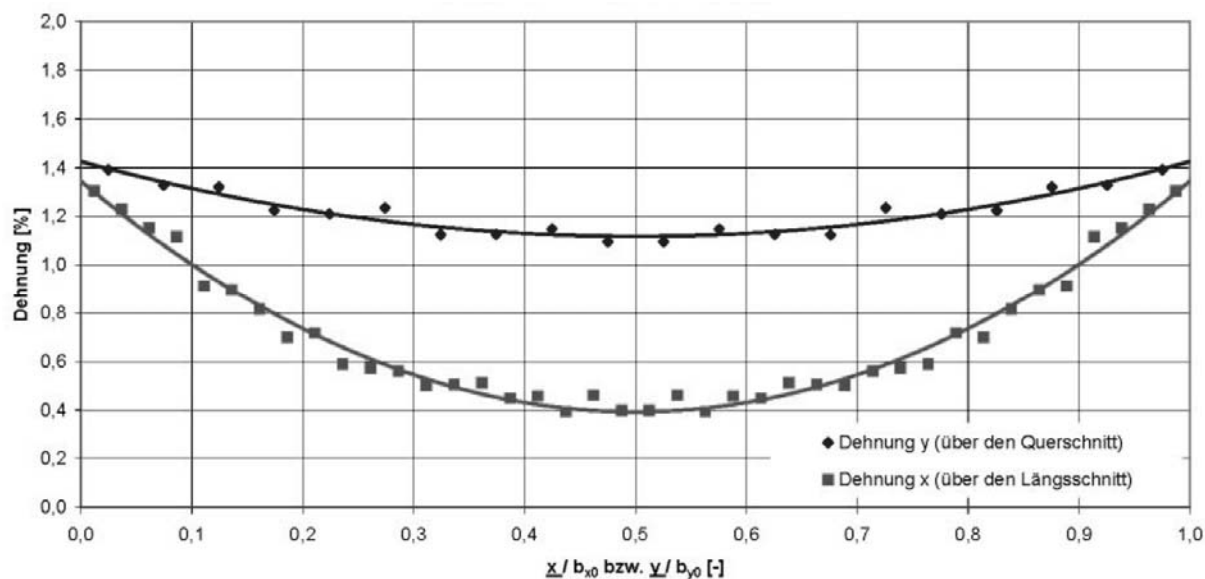


Abb. 4.78 Rechnerische Stiche der oberen Folie ( $z$ -Koordinaten in der jeweiligen Mittelachse) für  $p_i = 0 \text{ Pa}$  und  $p_i = 2.000 \text{ Pa}$  : a) Querschnitt; b) Längsschnitt; Berstversuch 2003, <sup>®</sup>NOWOFLON ET 6235, transparent,  $250 \mu\text{m}$ ;

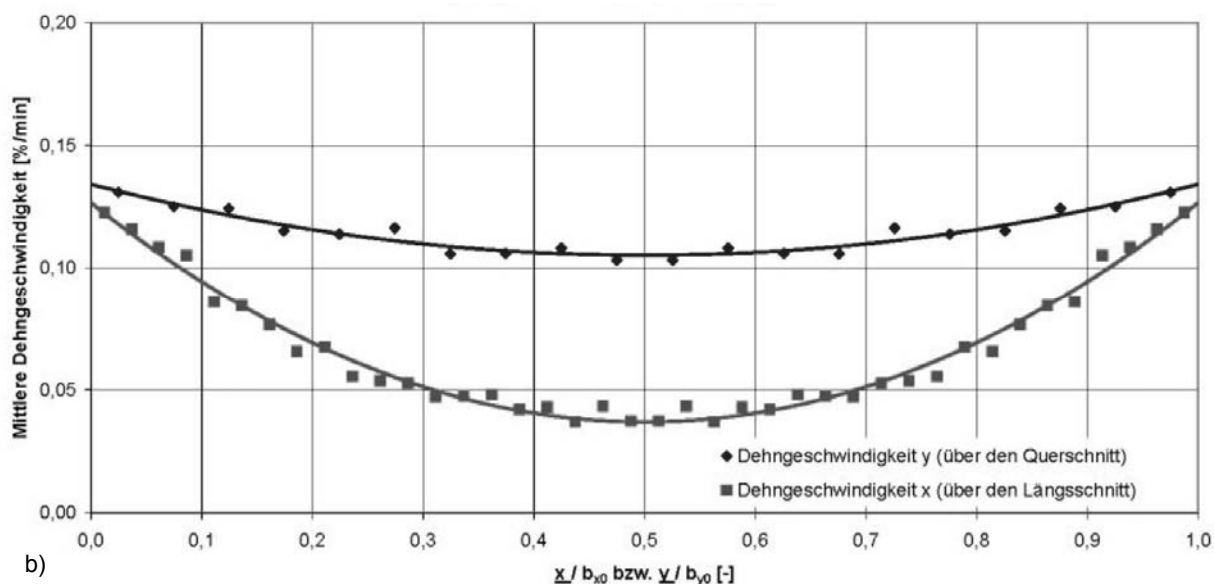
Anmerkung: überhöhte Darstellung; Pneuspanweiten in  $y$ -Richtung: 3,0 m; in  $x$ -Richtung: 5,8 m

In Abb. 4.79 (a) sind die rechnerisch ermittelten Dehnungen [%] für  $p_i = 2.000 \text{ Pa}$  in den Mittelachsen in y-Richtung (Querschnitt) und in x-Richtung (Längsschnitt) dargestellt.

Abb. 4.79 (b) zeigt die über die Versuchsdauer  $\Delta t_{p_i = 2.000 \text{ Pa}} \cong 11 \text{ min}$  gemittelten Dehngeschwindigkeiten [% / min]. Beide Parameter wurden über den jeweiligen Ort auf der ursprünglichen Bogenlänge in x- bzw. in y-Richtung ( $\underline{x}/b_{x0}$  bzw.  $\underline{y}/b_{y0}$ ) aufgetragen.



a)



b)

Abb. 4.79 a) Dehnungen [%] und b) über die Versuchsdauer gemittelte Dehngeschwindigkeiten [% / min], jeweils in Abhängigkeit von der Bogenlänge in y-Richtung (Querschnitt) und in x-Richtung (Längsschnitt) für  $p_i = 2.000 \text{ Pa}$ ; Berstversuch 2003, <sup>®</sup>NOWOFLON ET 6235, transparent, 250  $\mu\text{m}$

Abb. 4.80 zeigt die rechnerisch ermittelten Radien  $R$  [m] in den Mittelachsen in  $y$ -Richtung (Querschnitt) (a) und in  $x$ -Richtung (Längsschnitt) (b), jeweils für  $p_i = 0$  Pa und  $p_i = 2.000$  Pa . Während in Querrichtung der Radius in Feldmitte deutlich ab- und am Rand zunimmt, ist er in Längsrichtung nur gering veränderlich.

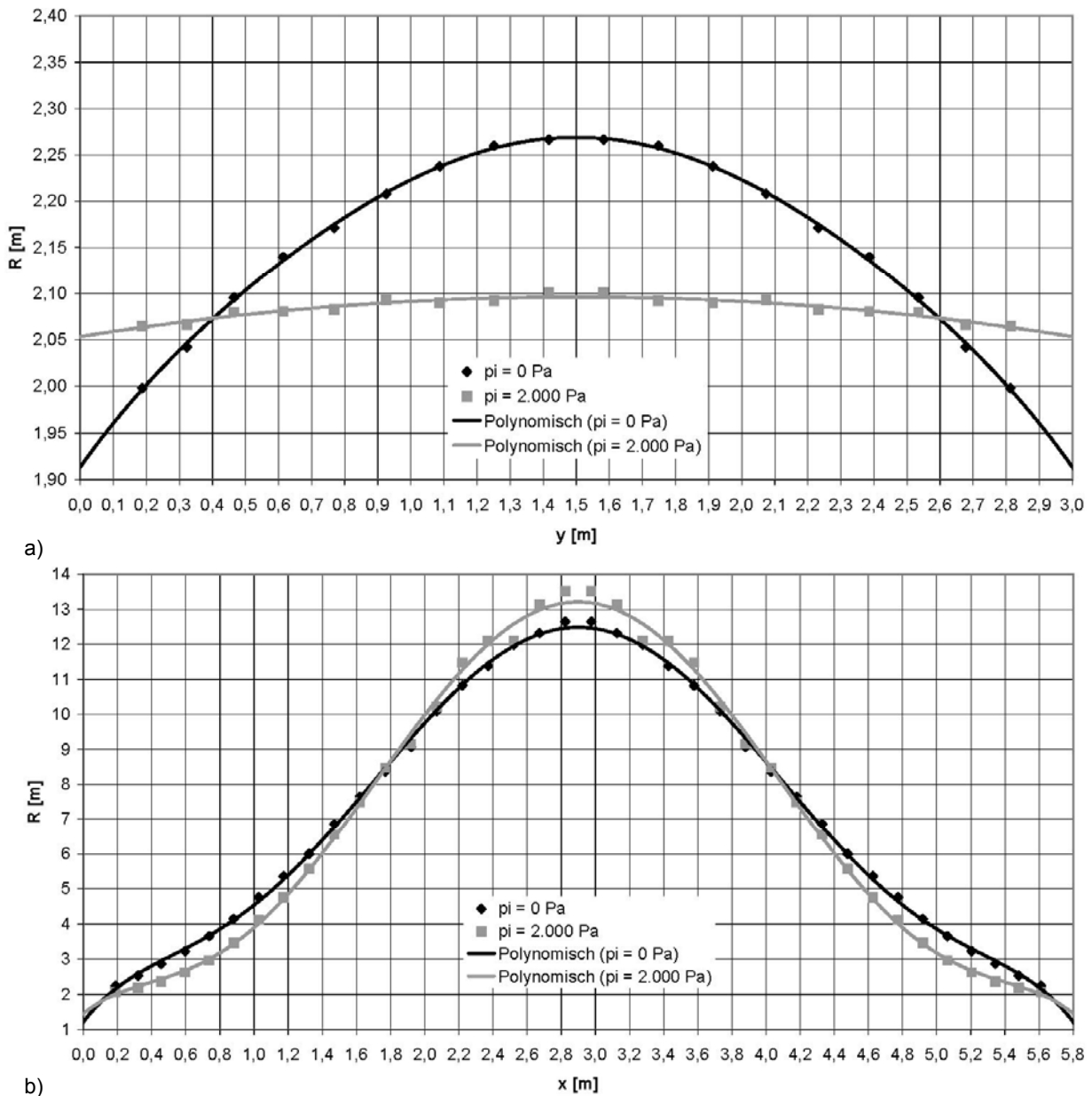


Abb. 4.80 Radien  $R$  [m]: a) in  $y$ -Richtung (Querschnitt,  $x = \text{const.} = 2,90$  m) und b) in  $x$ -Richtung (Längsschnitt,  $y = \text{const.} = 1,50$  m) für  $p_i = 0$  Pa und  $p_i = 2.000$  Pa ; Berstversuch 2003, ®NOWOFLON ET 6235, transparent,  $250 \mu\text{m}$

Anmerkung: maßstabslose Darstellung; Pneuspannweiten in  $y$ -Richtung: 3,0 m; in  $x$ -Richtung: 5,8 m

Abb. 4.81 zeigt die rechnerischen Krümmungen  $\kappa \text{ [1/m]} = \frac{1}{R}$  in den Mittelachsen in y-Richtung (Querschnitt) (a) und in x-Richtung (Längsschnitt) (b), jeweils für  $p_i = 0 \text{ Pa}$  und  $p_i = 2.000 \text{ Pa}$ .

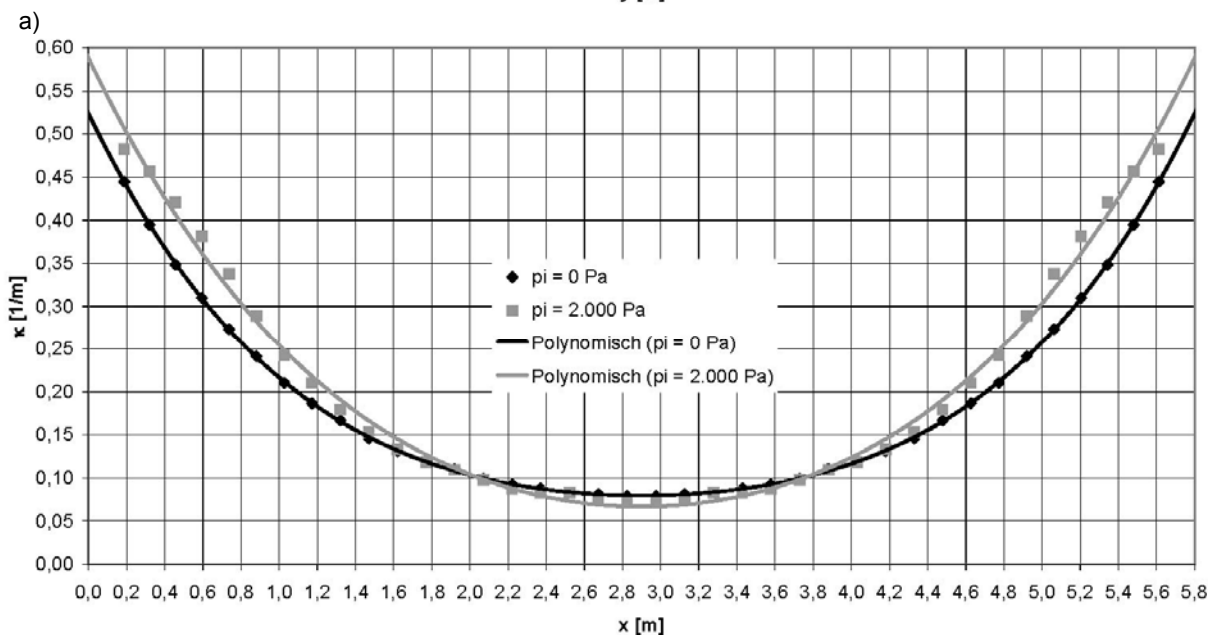
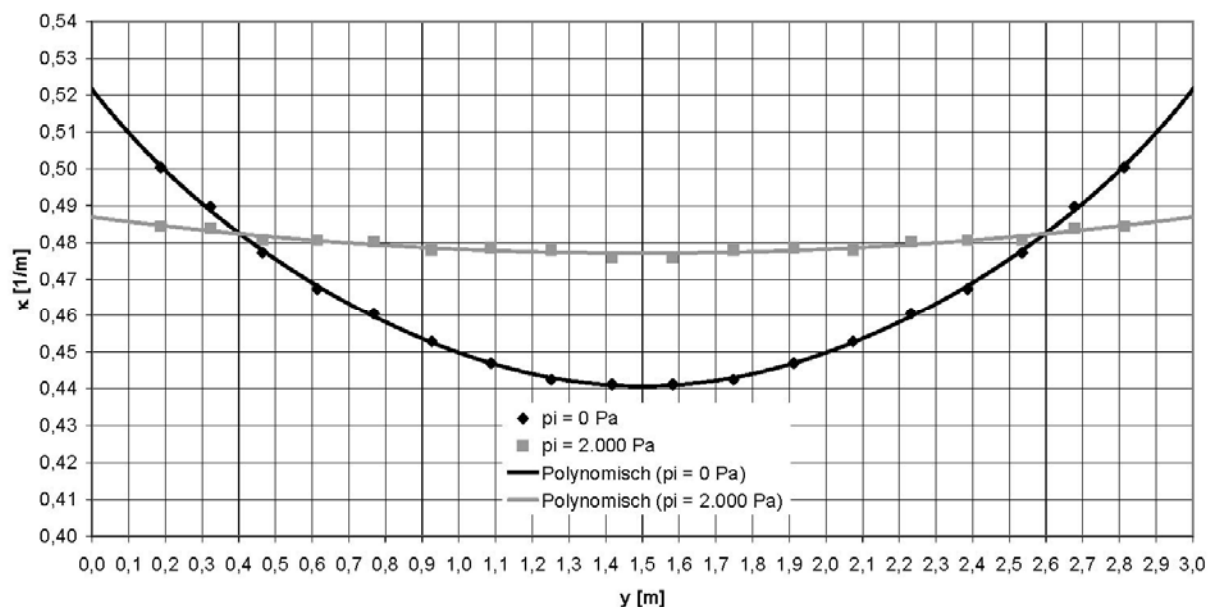


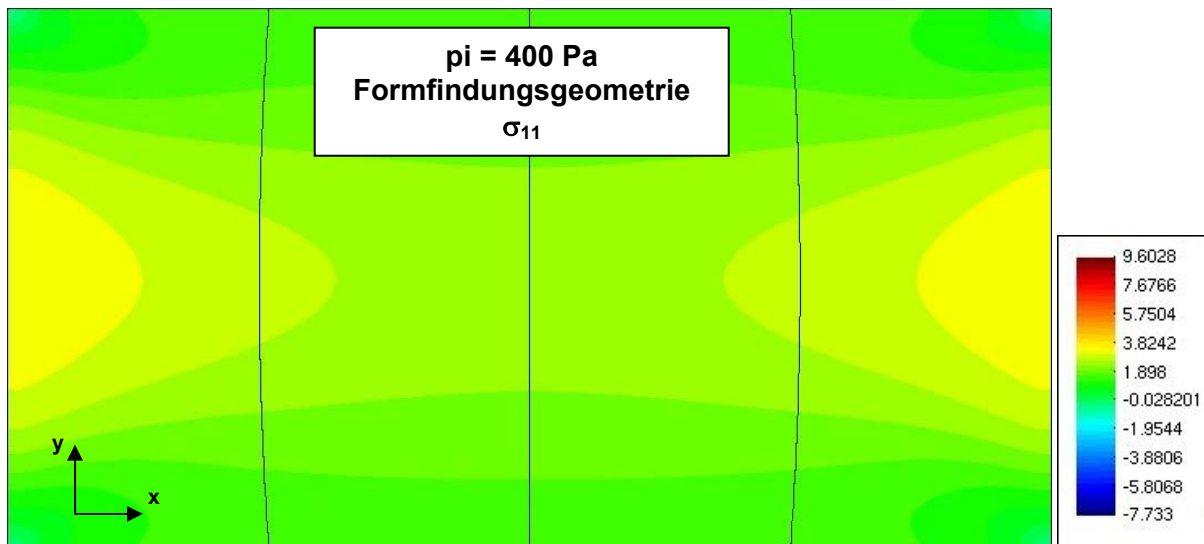
Abb. 4.81 Krümmungen  $\kappa \text{ [1/m]}$ : a) in y-Richtung (Querschnitt,  $x = \text{const.} = 2,90 \text{ m}$ ) und b) in x-Richtung (Längsschnitt,  $y = \text{const.} = 1,50 \text{ m}$ ) für  $p_i = 0 \text{ Pa}$  und  $p_i = 2.000 \text{ Pa}$ ; Berstversuch 2003, ©NOWOFLON ET 6235, transparent,  $250 \mu\text{m}$

Anmerkung: maßstabslose Darstellung; Pneuspannweiten in y-Richtung:  $3,0 \text{ m}$ ; in x-Richtung:  $5,8 \text{ m}$

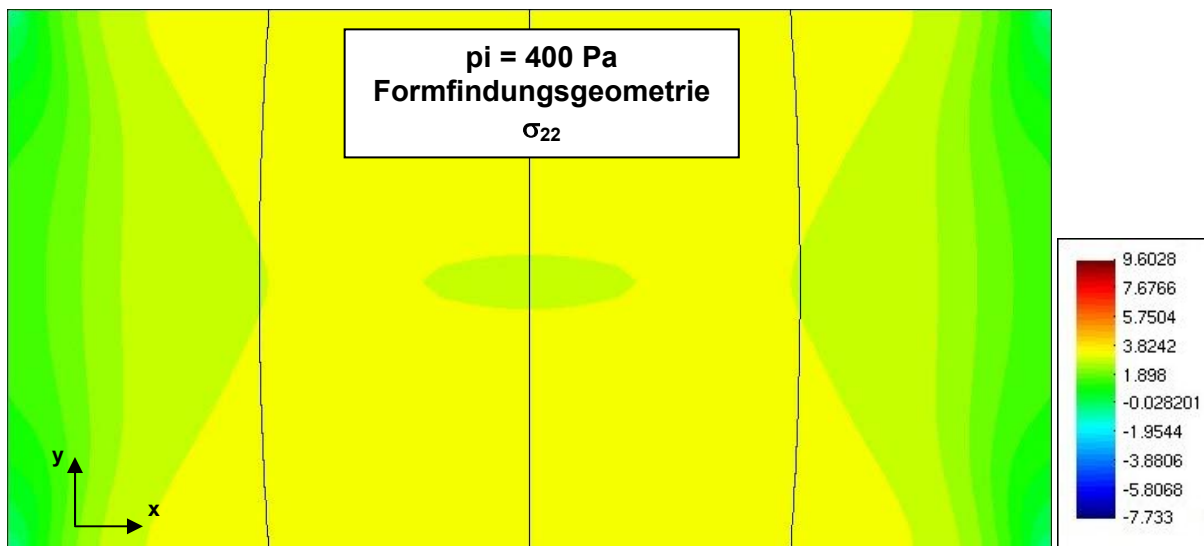
**Vergleichsrechnung 1: Formfindungsgeometrie**

Abb. 4.82 zeigt die Normalspannungen  $\sigma_{11}$  (a) und  $\sigma_{22}$  (b) für  $p_i = 400 \text{ Pa}$ . Trotz unterschiedlicher Kantenlängen erreichen die beiden Normalspannungen nahezu gleiche Maximalwerte (gelbe Bereiche), jedoch an unterschiedlichen Orten.

Spannung	Maximum	Minimum
$\sigma_{11} \text{ [N/mm}^2\text{]}$	+ 3,41	- 0,60
$\sigma_{22} \text{ [N/mm}^2\text{]}$	+ 3,35	- 0,58



a)

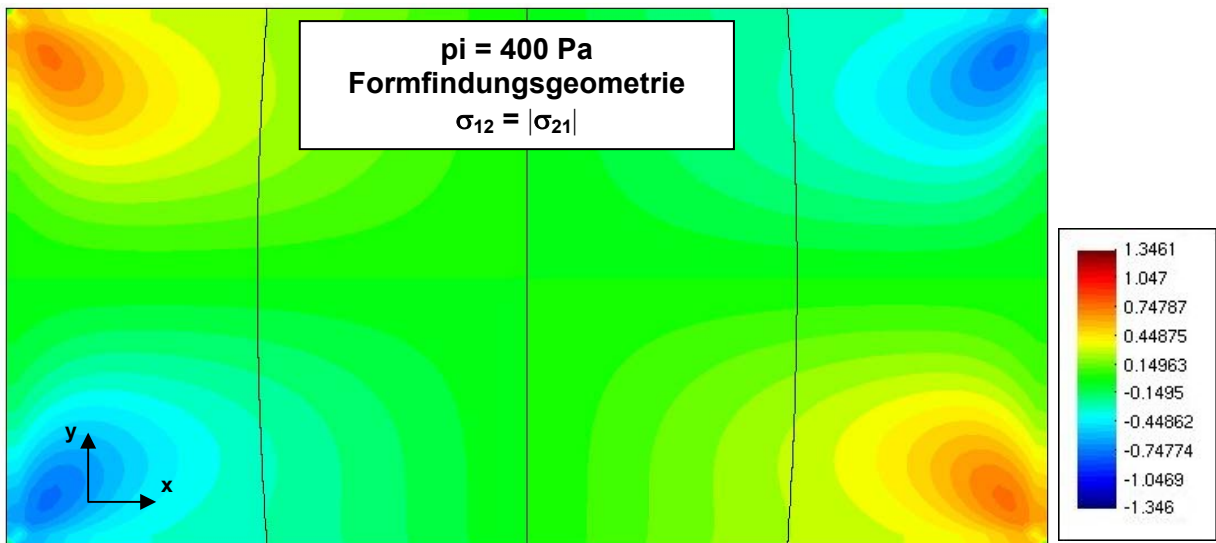


b)

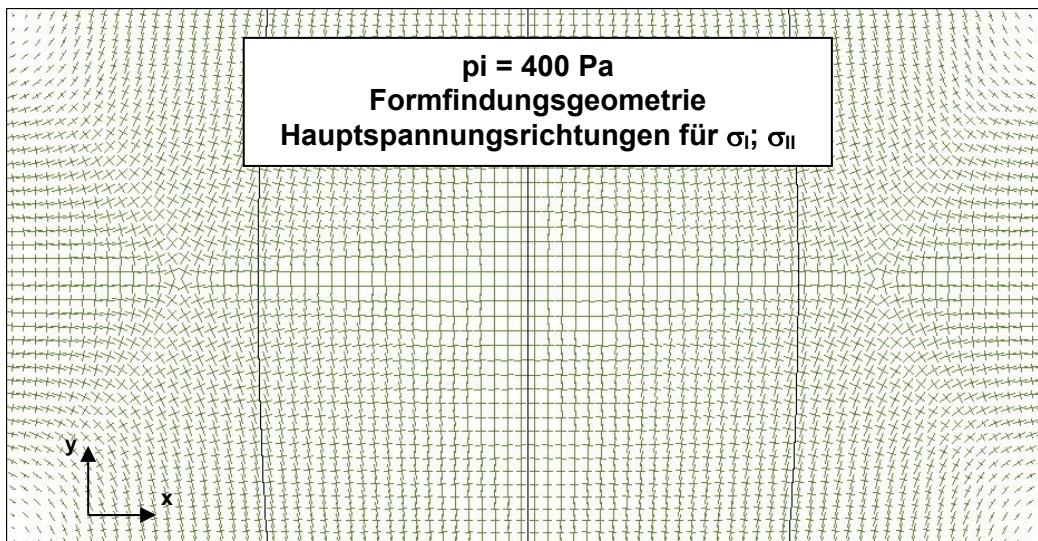
Abb. 4.82 Normalspannungen : a)  $\sigma_{11}$ ; b)  $\sigma_{22}$ ; jeweils in  $\text{[N/mm}^2\text{]}$ , Berstversuch 2003, Formfindungsgeometrie (Vergleichsrechnung 1),  $p_i = 400 \text{ Pa}$

Abb. 4.83 (a) zeigt die den Normalspannungen zugeordneten Schubspannungen  $\sigma_{12} = |\sigma_{21}|$  für  $p_i = 400 \text{ Pa}$ . Die Maximalwerte (hellrote und hellblaue Bereiche) treten nicht an den Stellen maximaler Normalspannungen auf, sondern nahe den vier Eckpunkten. Für das symmetrische System unter symmetrischer Gleichlast sind die Schubspannungen in den beiden Mittelachsen Null. Abb. 4.83 (b) zeigt die Hauptspannungsrichtungen.

Spannung	Maximum	Minimum
$\sigma_{12} \text{ [N/mm}^2\text{]}$	+ 0,76	- 0,76



a)



b)

Abb. 4.83 a) Schubspannungen:  $\sigma_{12} = |\sigma_{21}| \text{ [N/mm}^2\text{]}$  und b) Hauptspannungsrichtungen, Berstversuch 2003, Formfindungsgeometrie (Vergleichsrechnung 1),  $p_i = 400 \text{ Pa}$

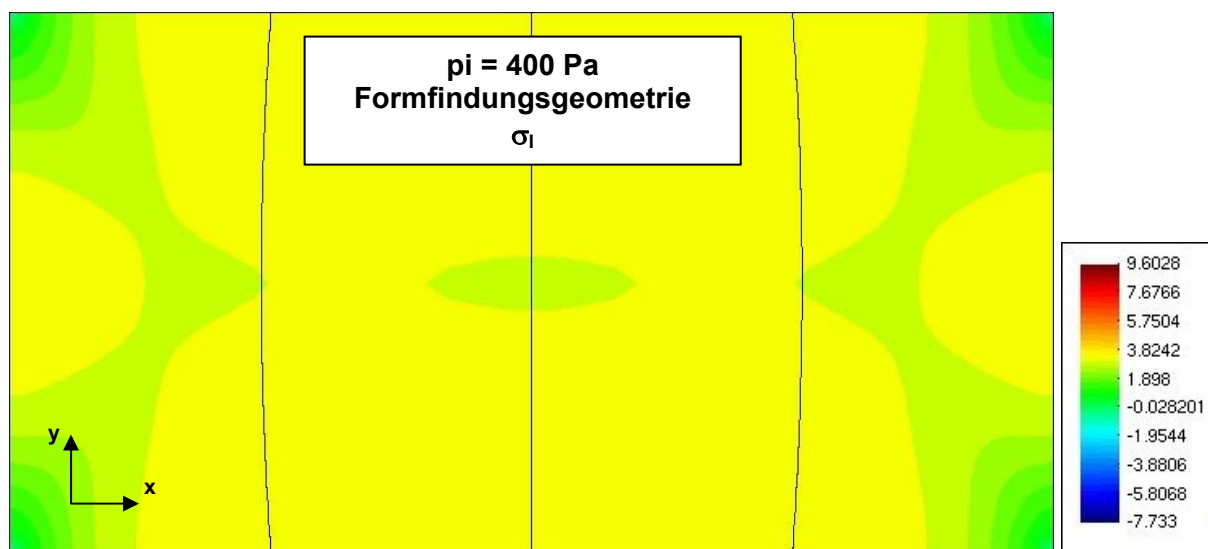
Abb. 4.84 (a) zeigt die größere der beiden Hauptspannungen  $\sigma_I$  für  $p_i = 400$  Pa (definitionsgemäß gilt:  $\sigma_I > \sigma_{II}$ ). Der Maximalwert (gelbe Bereiche) tritt in der Mitte der Pneuränder auf - also dort, wo auch die jeweiligen Normalspannungen in x- und y-Richtung maximal sind. Die beiden Hauptspannungen stehen an den Rändern im

Verhältnis  $\sigma_I : \sigma_{II} \cong 3,41 : 1,54 = 2,22 = \frac{1}{\nu} = \frac{1}{0,45}$ . Dies

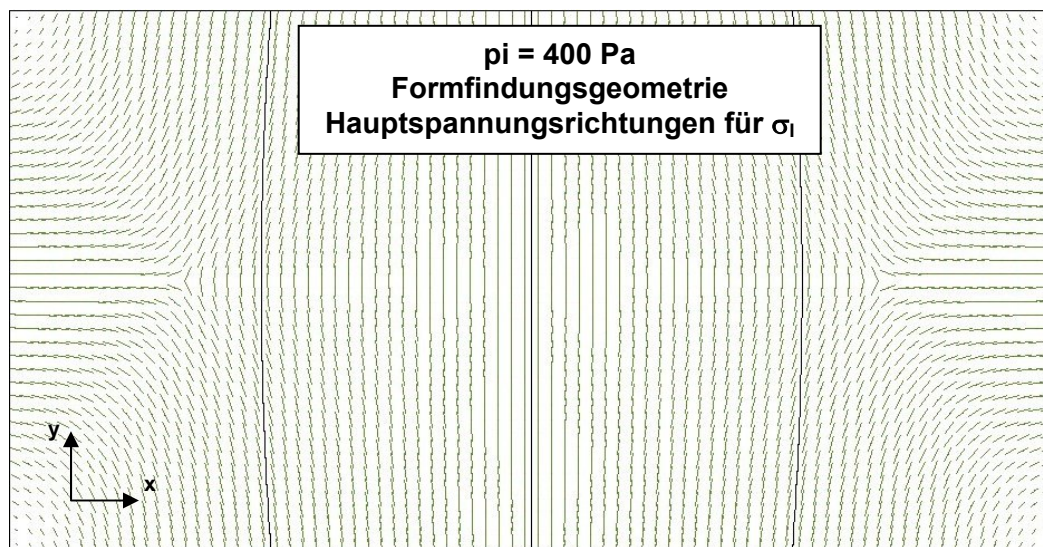
entspricht dem Kehrwert der Querkontraktionszahl  $\nu$ .

Abb. 4.84 (b) zeigt die zugeordneten Hauptspannungsrichtungen.

Spannung	Maximum	Minimum
$\sigma_I$ [N/mm <sup>2</sup> ]	+ 3,41	- 0,59



a)



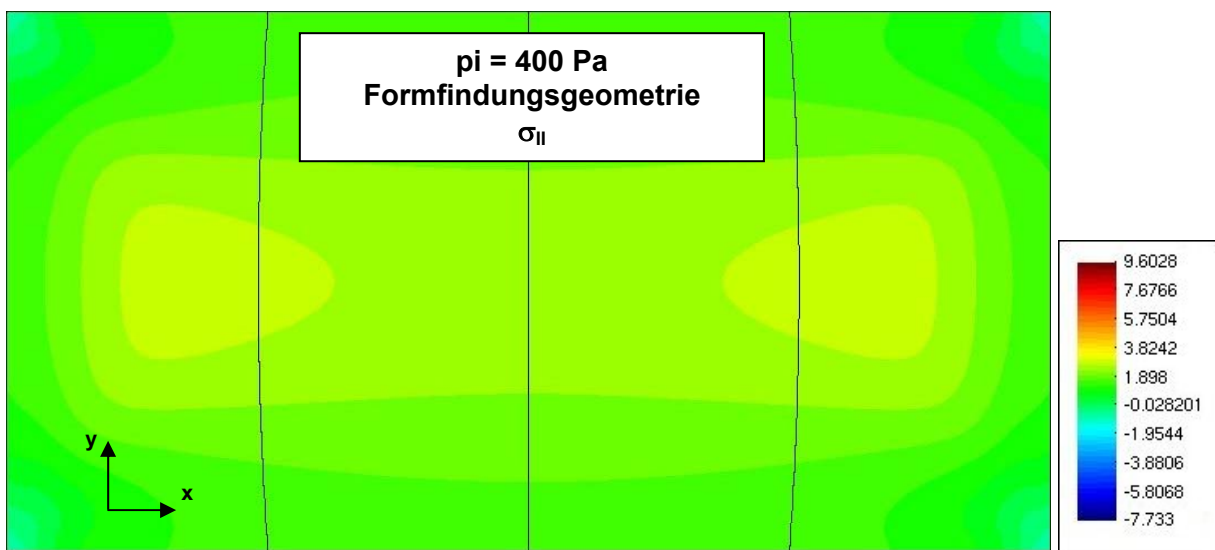
b)

Abb. 4.84 a) Hauptspannung  $\sigma_I$  [N/mm<sup>2</sup>]; b) zugeordnete Hauptspannungsrichtungen, Berstversuch 2003, Formfindungsgeometrie (Vergleichsrechnung 1),  $p_i = 400$  Pa

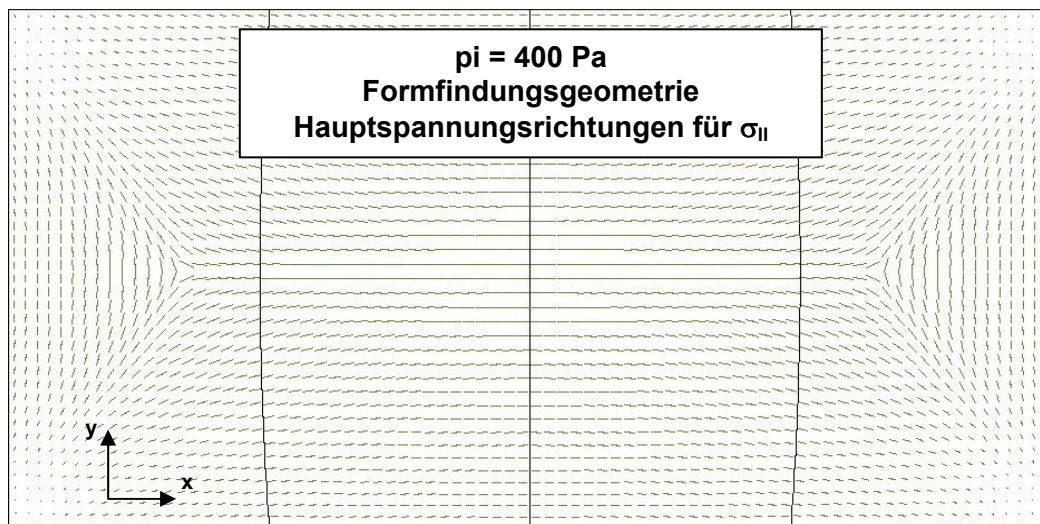


Abb. 4.85 (a) zeigt die kleinere der beiden Hauptspannungen  $\sigma_{II}$  für  $p_i = 400 \text{ Pa}$ . Der Maximalwert (gelbgrüne Bereiche) tritt in den beiden Viertelpunkten des Pneus auf. Abb. 4.85 (b) zeigt die zugeordneten Hauptspannungsrichtungen.

Spannung	Maximum	Minimum
$\sigma_{II} \text{ [N/mm}^2\text{]}$	+ 2,99	- 0,68



a)



b)

Abb. 4.85 a) Hauptspannung  $\sigma_{II}$  [N/mm<sup>2</sup>]; b) zugeordnete Hauptspannungsrichtungen, Berstversuch 2003, Formfindungsgeometrie (Vergleichsrechnung 1),  $p_i = 400 \text{ Pa}$

Abb. 4.86 zeigt die Vergleichsspannungen nach VON MISES  $\sigma_M$  für  $p_i = 400 \text{ Pa}$ . Der Maximalwert (gelbgrüner Bereich) erstreckt sich, mit Ausnahme der Ecken, über die gesamte Fläche. Die Verteilung ist sehr homogen.

Spannung	Maximum	Minimum
$\sigma_M \text{ [N/mm}^2\text{]}$	+ 3,01	+ 0,41

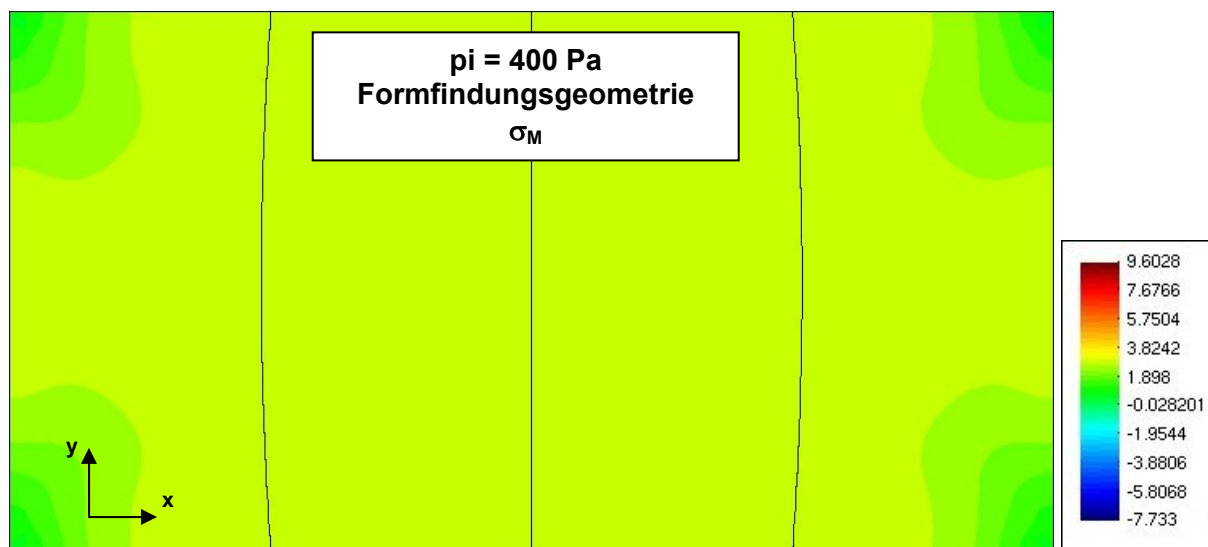
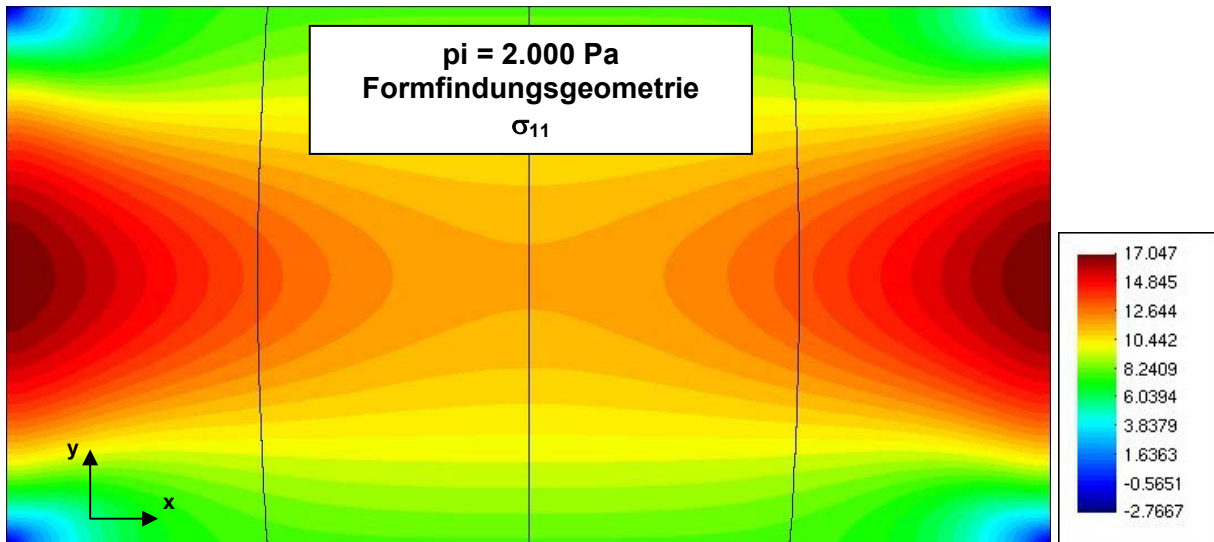


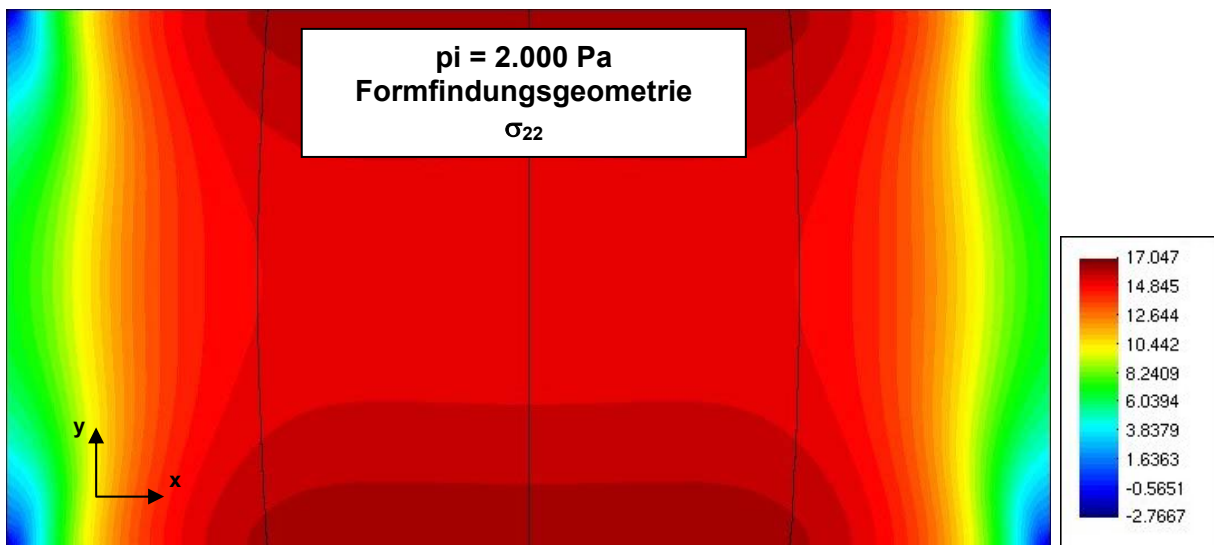
Abb. 4.86 Vergleichsspannungen nach VON MISES  $\sigma_M \text{ [N/mm}^2\text{]}$ , Berstversuch 2003, Formfindungsgeometrie (Vergleichsrechnung 1),  $p_i = 400 \text{ Pa}$

Abb. 4.87 zeigt die Normalspannungen  $\sigma_{11}$  (a) und  $\sigma_{22}$  (b) für  $p_i = 2.000 \text{ Pa}$ . Trotz unterschiedlicher Kantenlängen erreichen die beiden Normalspannungen nahezu gleiche Maximalwerte (dunkelrote Bereiche), jedoch an unterschiedlichen Orten.

Spannung	Maximum	Minimum
$\sigma_{11} \text{ [N/mm}^2\text{]}$	+ 15,81	- 2,31
$\sigma_{22} \text{ [N/mm}^2\text{]}$	+ 16,48	- 2,23



a)

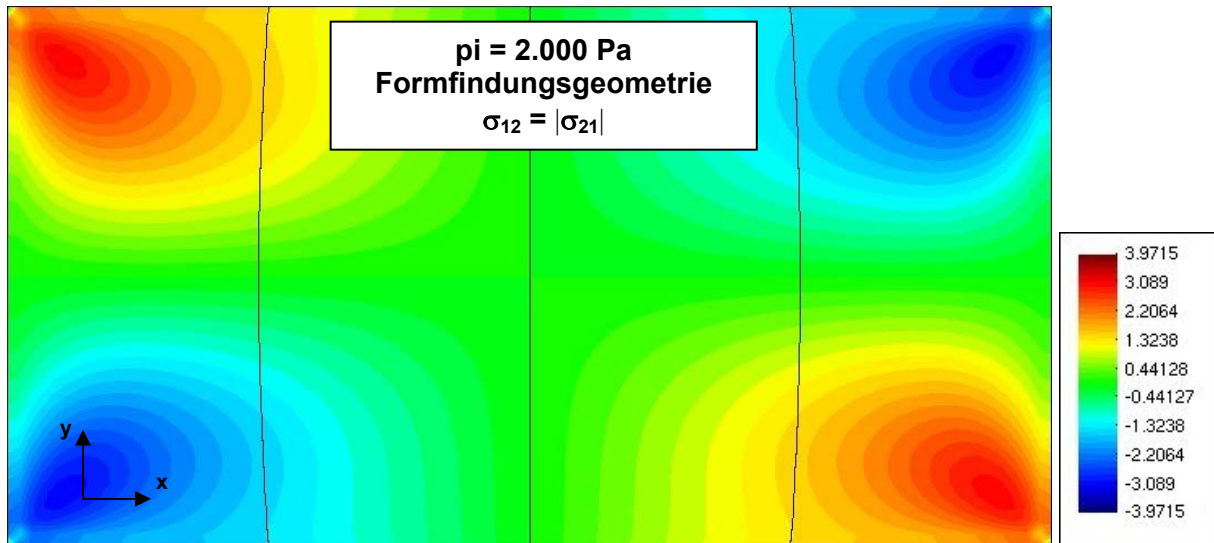


b)

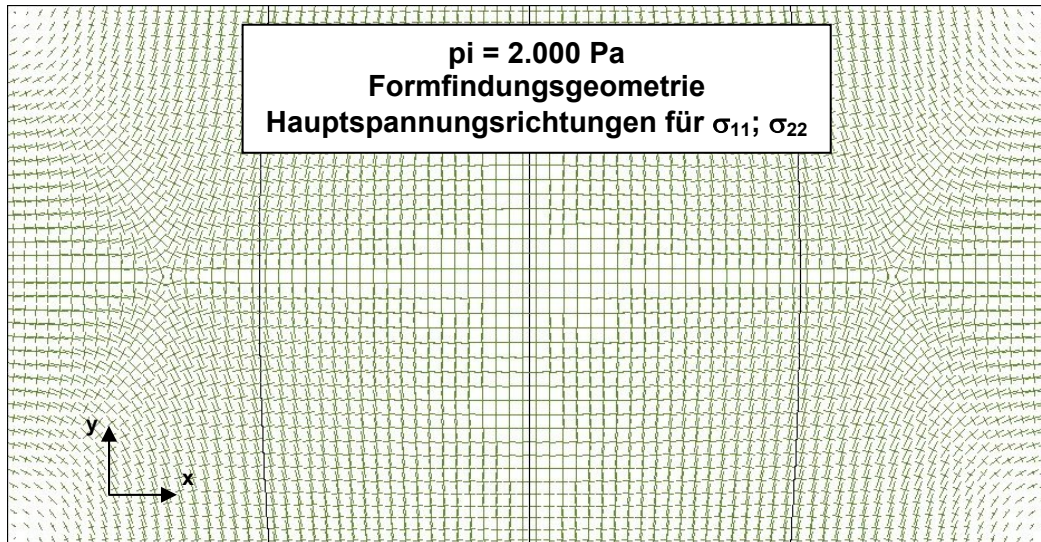
Abb. 4.87 Normalspannungen : a)  $\sigma_{11}$ ; b)  $\sigma_{22}$ ; jeweils in  $\text{[N/mm}^2\text{]}$ , Berstversuch 2003, Formfindungsgeometrie (Vergleichsrechnung 1),  $p_i = 2.000 \text{ Pa}$

Abb. 4.88 (a) zeigt die den Normalspannungen zugeordneten Schubspannungen  $\sigma_{12} = |\sigma_{21}|$  für  $p_i = 2.000 \text{ Pa}$ . Die Maximalwerte (rote und blaue Bereiche) treten nicht an den Stellen maximaler Normalspannungen auf, sondern nahe den vier Eckpunkten. Für das symmetrische System unter symmetrischer Gleichlast sind die Schubspannungen in den beiden Mittelachsen Null. Abb. 4.88 (b) zeigt die Hauptspannungsrichtungen.

Spannung	Maximum	Minimum
$\sigma_{12} \text{ [N/mm}^2\text{]}$	+ 3,09	- 3,09



a)



b)

Abb. 4.88 Schubspannungen: a)  $\sigma_{12} = |\sigma_{21}| \text{ [N/mm}^2\text{]}$  und b) Hauptspannungsrichtungen, Berstversuch 2003, Formfindungsgeometrie (Vergleichsrechnung 1),  $p_i = 2.000 \text{ Pa}$

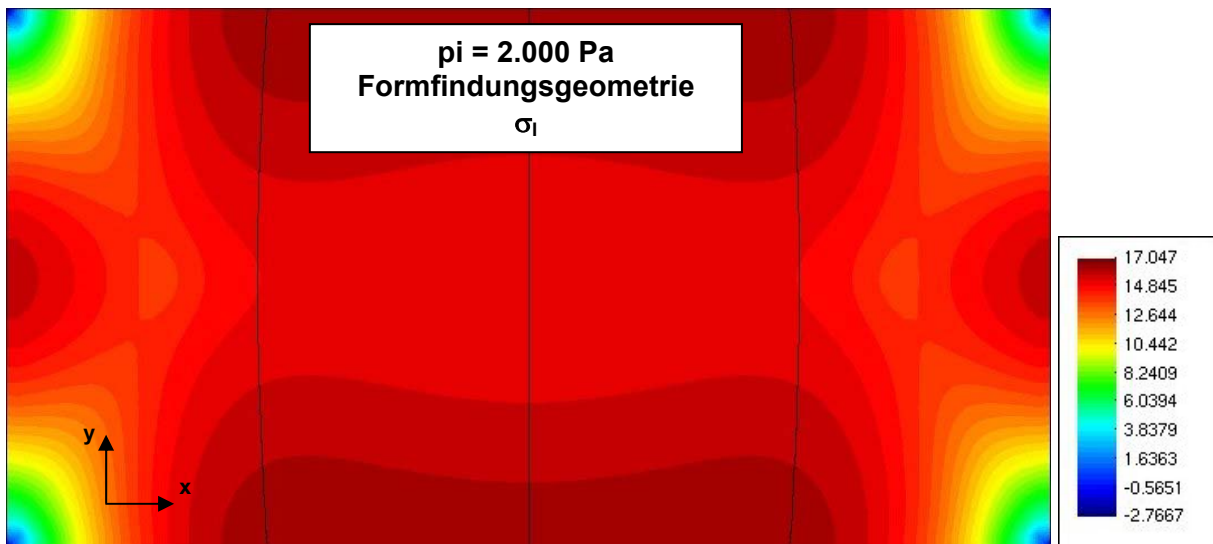
Abb. 4.89 (a) zeigt die größere der beiden Hauptspannungen  $\sigma_I$  für  $p_i = 2.000 \text{ Pa}$  (Definitionsgemäß gilt:  $\sigma_I > \sigma_{II}$ ). Der Maximalwert (dunkelrote Bereiche) tritt in der Mitte des langen Pneurandes auf - also dort, wo auch die Normalspannung  $\sigma_{22}$  maximal ist. Die beiden Hauptspannungen stehen an den Rändern im

Verhältnis  $\sigma_I : \sigma_{II} \cong 16,55 : 7,45 = 2,22 = \frac{1}{\nu} = \frac{1}{0,45}$ . Dies

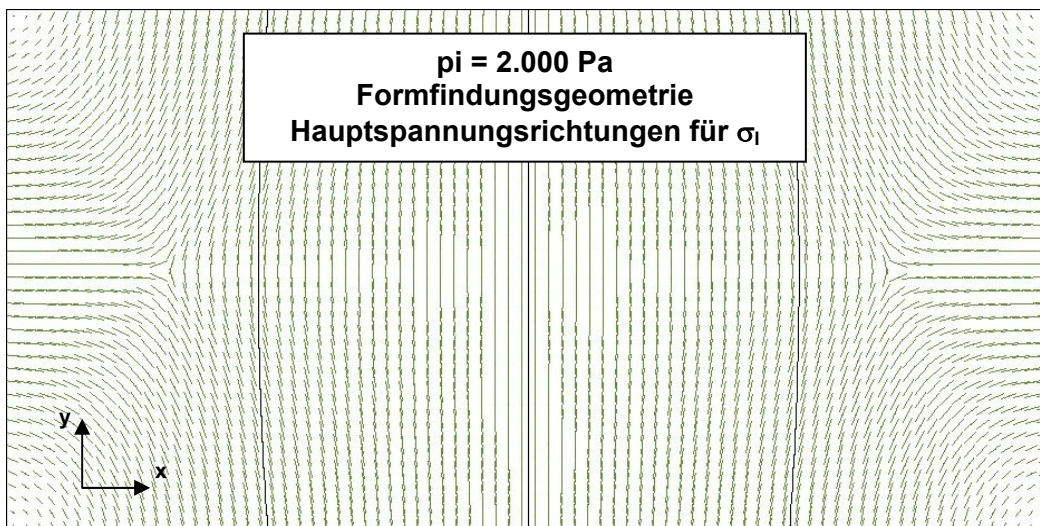
entspricht dem Kehrwert der Querkontraktionszahl  $\nu$ .

Abb. 4.89 (b) zeigt die zugeordneten Hauptspannungsrichtungen.

Spannung	Maximum	Minimum
$\sigma_I \text{ [N/mm}^2\text{]}$	+ 16,55	- 2,30



a)

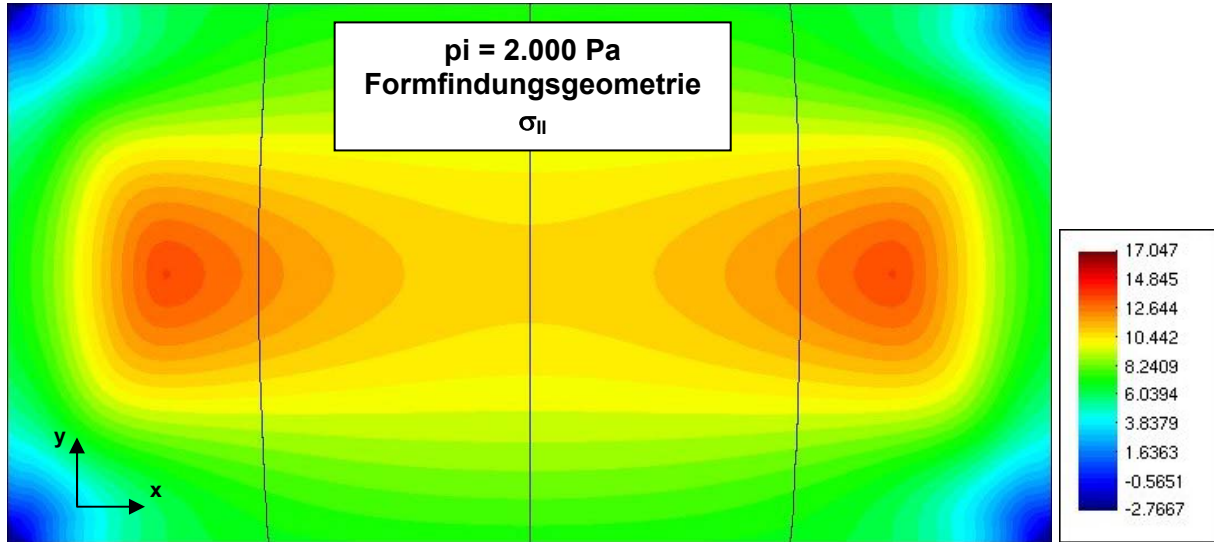


b)

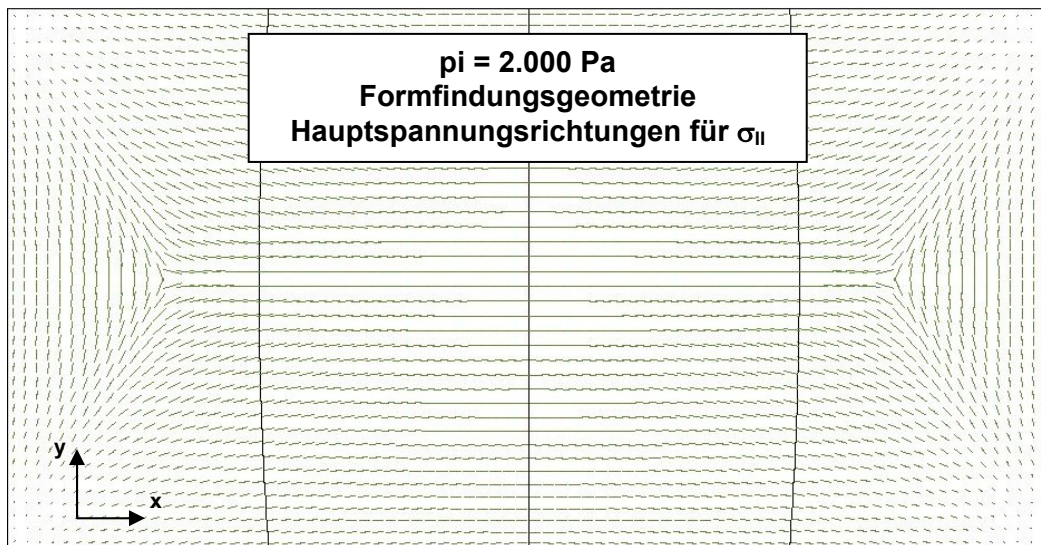
Abb. 4.89 a) Hauptspannung  $\sigma_I \text{ [N/mm}^2\text{]}$ ; b) zugeordnete Hauptspannungsrichtungen, Berstversuch 2003, Formfindungsgeometrie (Vergleichsrechnung 1),  $p_i = 2.000 \text{ Pa}$

Abb. 4.90 (a) zeigt die kleinere der beiden Hauptspannungen  $\sigma_{II}$  für  $p_i = 2.000 \text{ Pa}$ . Der Maximalwert (orangeroter Bereiche) tritt in den beiden Viertelpunkten des Pneus auf. Abb. 4.90(b) zeigt die zugeordneten Hauptspannungsrichtungen.

Spannung	Maximum	Minimum
$\sigma_{II} \text{ [N/mm}^2\text{]}$	+ 13,65	- 2,49



a)



b)

Abb. 4.90 a) Hauptspannung  $\sigma_{II} \text{ [N/mm}^2\text{]}$ ; b) zugeordnete Hauptspannungsrichtungen, Berstversuch 2003, Formfindungsgeometrie (Vergleichsrechnung 1),  $p_i = 2.000 \text{ Pa}$

Abb. 4.91 zeigt die Vergleichsspannungen nach VON MISES  $\sigma_M$  für  $p_i = 2.000 \text{ Pa}$ . Der Maximalwert (rote Bereiche) tritt an den langen Pneurändern auf. Etwas abgeschwächt erstrecken sich die VON MISES Spannungen über die gesamte Fläche mit Ausnahme der Pnuecken.

Spannung	Maximum	Minimum
$\sigma_M \text{ [N/mm}^2\text{]}$	+ 14,36	+ 1,55

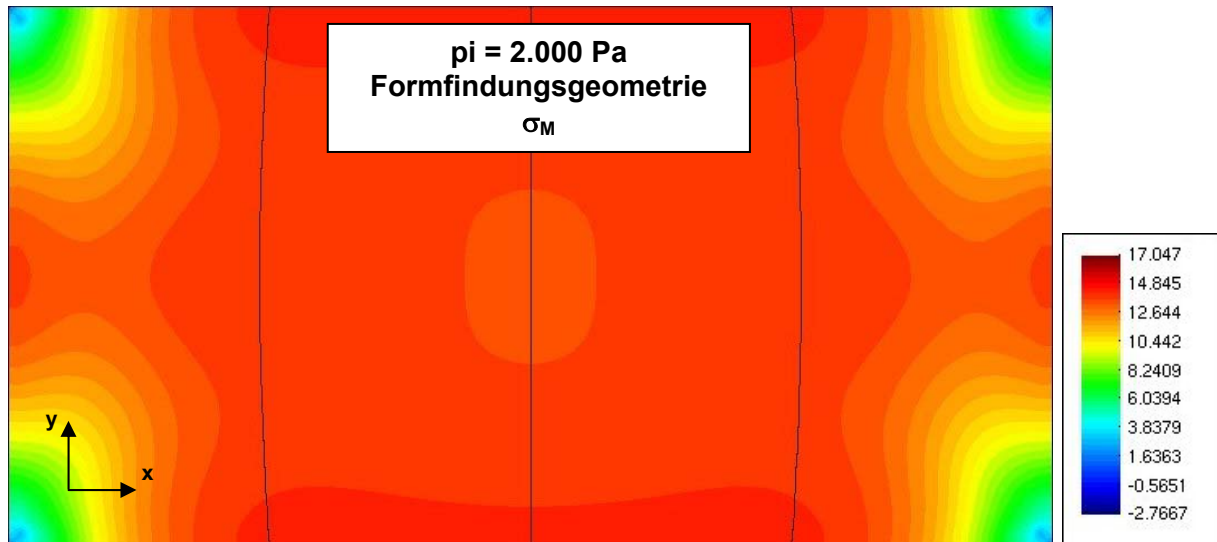


Abb. 4.91 Vergleichsspannungen nach VON MISES  $\sigma_M \text{ [N/mm}^2\text{]}$ , Berstversuch 2003, Formfindungsgeometrie (Vergleichsrechnung 1),  $p_i = 2.000 \text{ Pa}$

### Vergleichsrechnung 2: Spannungsoptimierter Zuschnitt

Abb. 4.92 zeigt die beiden linken der vier mit CARAT erzeugten Folienteilflächen für den spannungsoptimierten Zuschnitt. Die beiden rechten Teilflächen lassen sich durch Spiegelung an der Mittelachse des Pneus erzeugen. Der Punkt 5 der Teilfläche 2 liegt auf dieser Mittelachse. Die Rechteckquerschnitte, welche die beiden Teilflächen umschreibenden, sind durch die gestrichelten Linien mit den Abmessungen  $l_x; l_y$  dargestellt. Bei einer Bahnenbreite der Folie von  $b = 1.550 \text{ mm}$  führt der Zuschnitt mit maximalen Teilflächenbreiten von  $l_{x,1} = 1.491 \text{ mm}$  und  $l_{x,2} = 1.508 \text{ mm}$  zu einem sehr geringen Verschnitt.

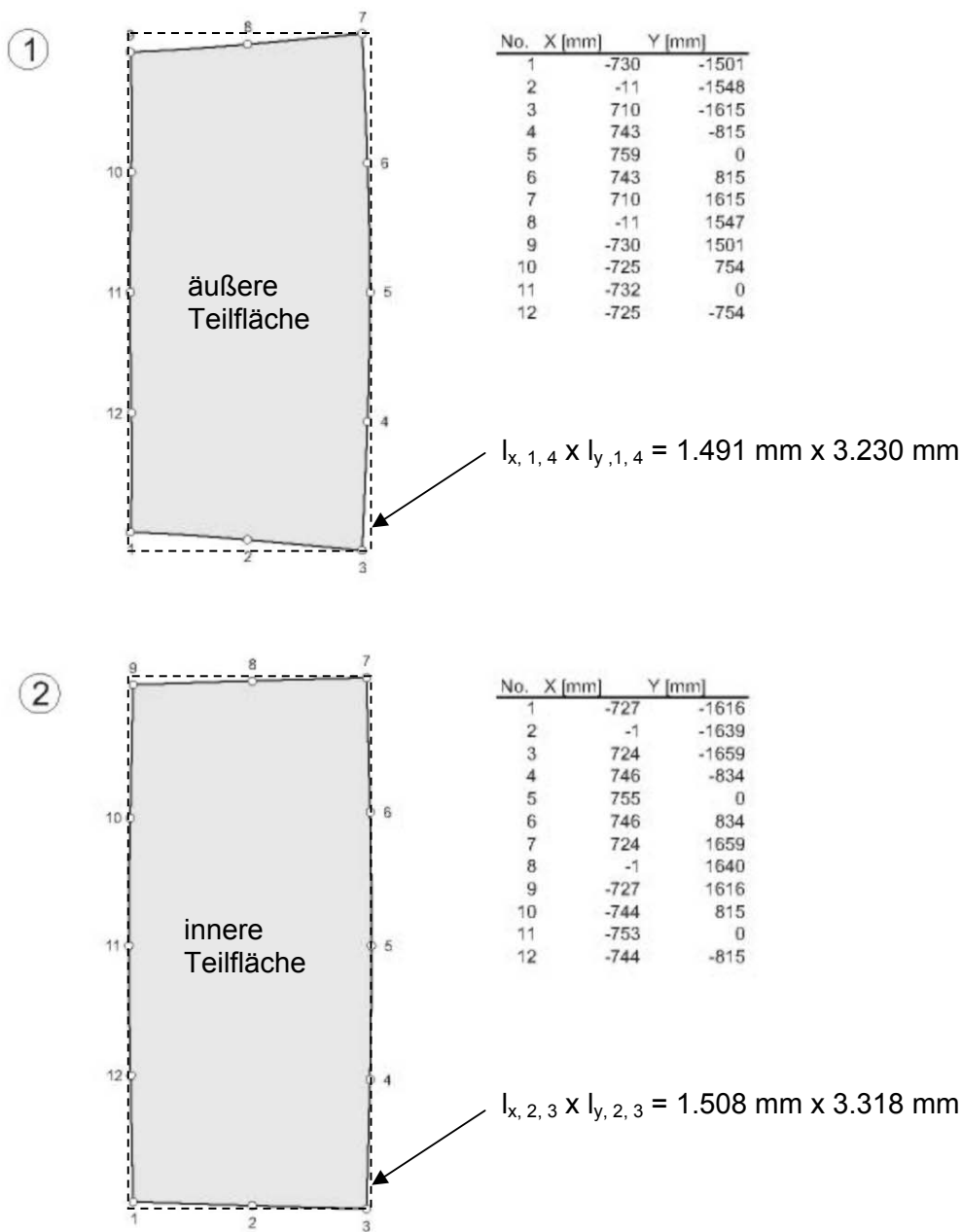
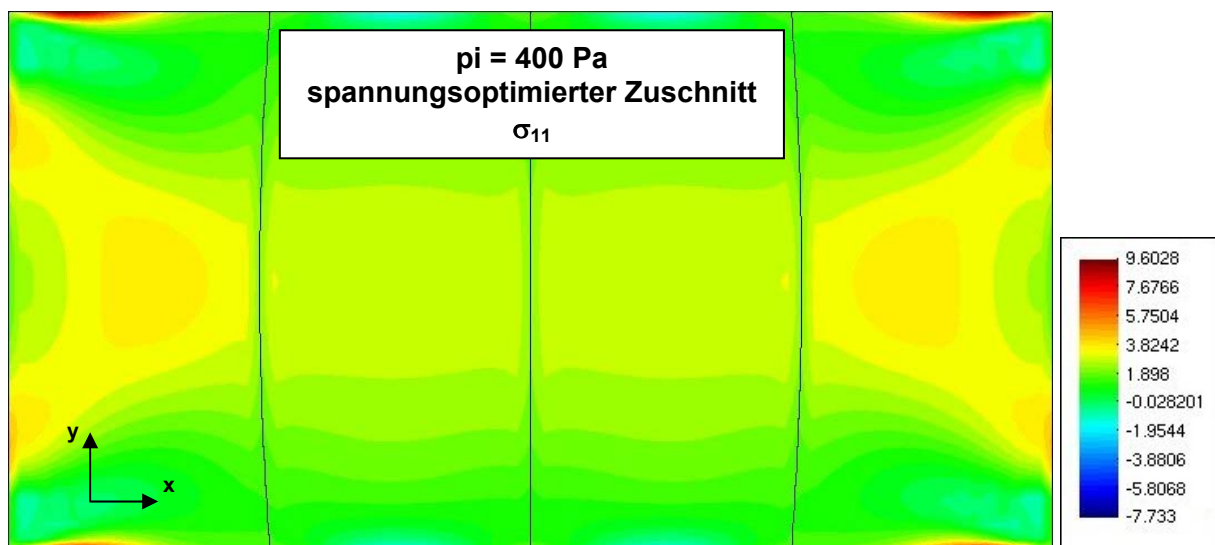


Abb. 4.92 Zuschnittsberechnung mit CARAT: äußere Teilfläche (1 und 4) und innere Teilfläche (2 und 3), Berstversuch 2003, spannungsoptimierter Zuschnitt (Vergleichsrechnung 2)

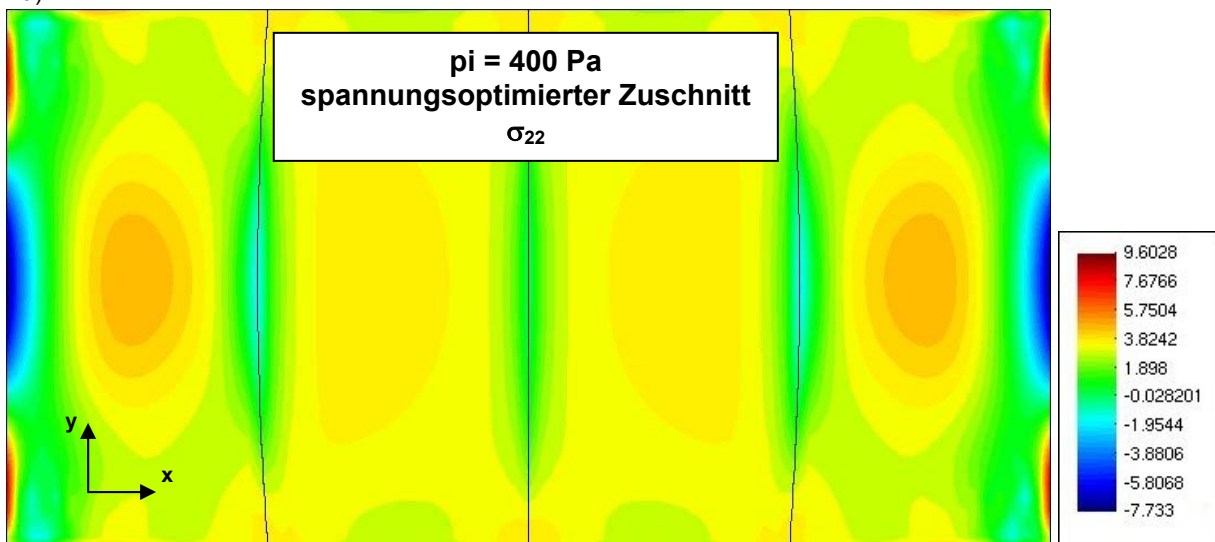


Abb. 4.93 zeigt die Normalspannungen  $\sigma_{11}$  (a) und  $\sigma_{22}$  (b) für  $p_i = 400 \text{ Pa}$ . Für den spannungsoptimierten Zuschnitt ergeben sich lokale Spannungsspitzen an den Rändern der Eckbereiche (dunkelrote Bereiche). Für eine Bemessung sind sie kaum relevant, da sie - einmal im plastischen Bereich - schnell abgebaut werden. Die Flächenschweißnähte werden deutlich geringer beansprucht, als die Mittelbereiche der Teilflächen. Es bilden sich sogar an einigen Teilflächennähten kleine Druckzonen (blaue Bereiche) aus, die sich jedoch den Druckspannungen in situ durch Faltenbildung entziehen.

Spannung	Maximum	Minimum
$\sigma_{11} \text{ [N/mm}^2\text{]}$	+ 9,50	- 1,58
$\sigma_{22} \text{ [N/mm}^2\text{]}$	+ 8,37	- 7,73



a)

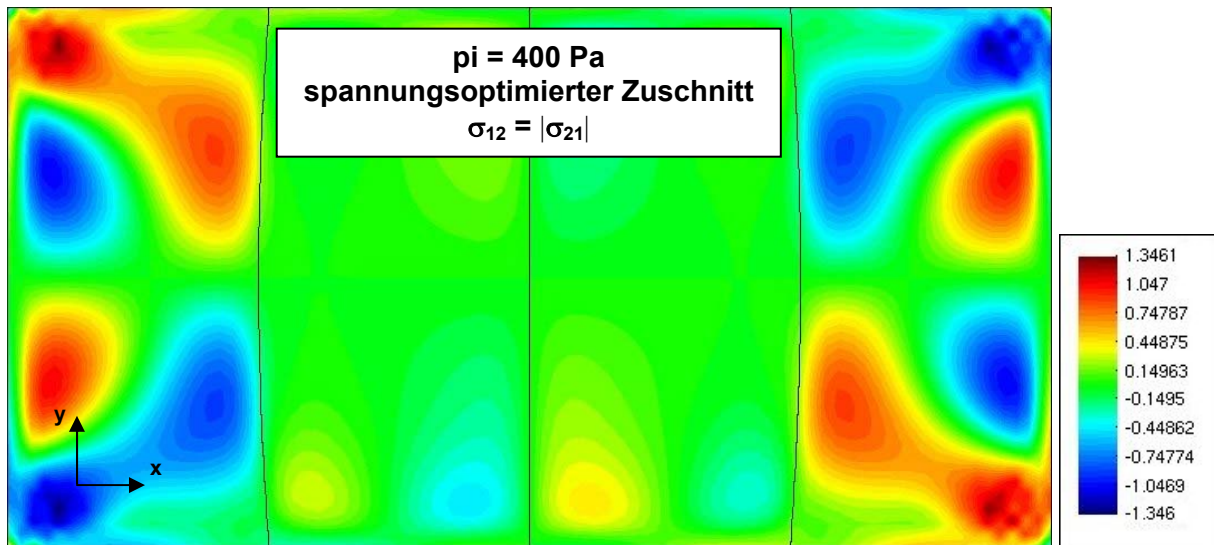


b)

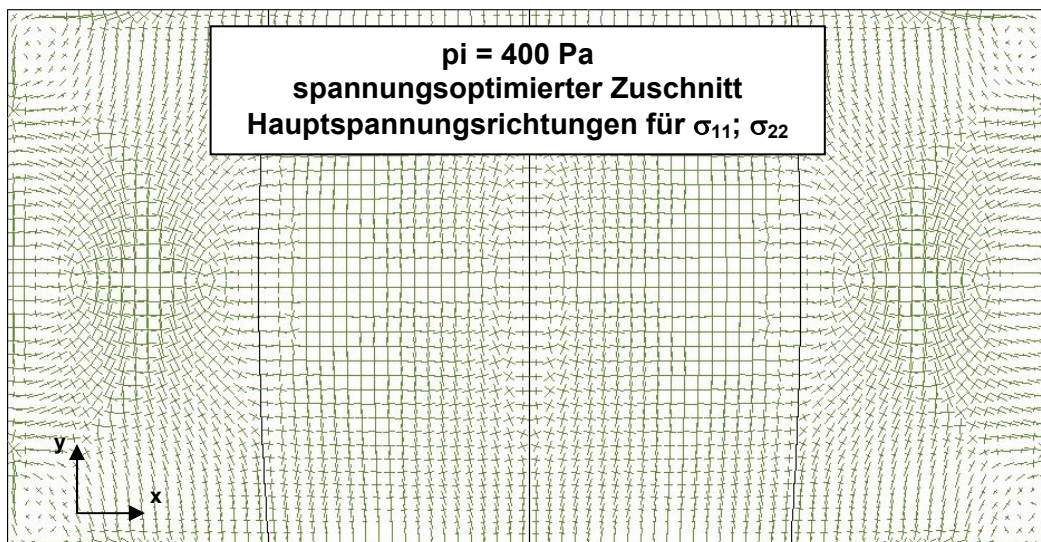
Abb. 4.93 Normalspannungen : a)  $\sigma_{11}$ ; b)  $\sigma_{22}$ ; jeweils in  $\text{[N/mm}^2\text{]}$ , Berstversuch 2003, spannungsoptimierter Zuschnitt (Vergleichsrechnung 2),  $p_i = 400 \text{ Pa}$

Abb. 4.94 (a) zeigt die den Normalspannungen zugeordneten Schubspannungen  $\sigma_{12} = |\sigma_{21}|$  für  $p_i = 400 \text{ Pa}$ . Die Maximalwerte (rote und blaue Bereiche) treten beim spannungsoptimierten Zuschnitt nahezu in der gesamten äußeren Teilfläche in Form von Schubfeldern auf. Für das symmetrische System unter symmetrischer Gleichlast sind die Schubspannungen in den beiden Mittelachsen Null. Abb. 4.94 (b) zeigt die Hauptspannungsrichtungen.

Spannung	Maximum	Minimum
$\sigma_{12} \text{ [N/mm}^2\text{]}$	+ 1,35	- 1,35



a)

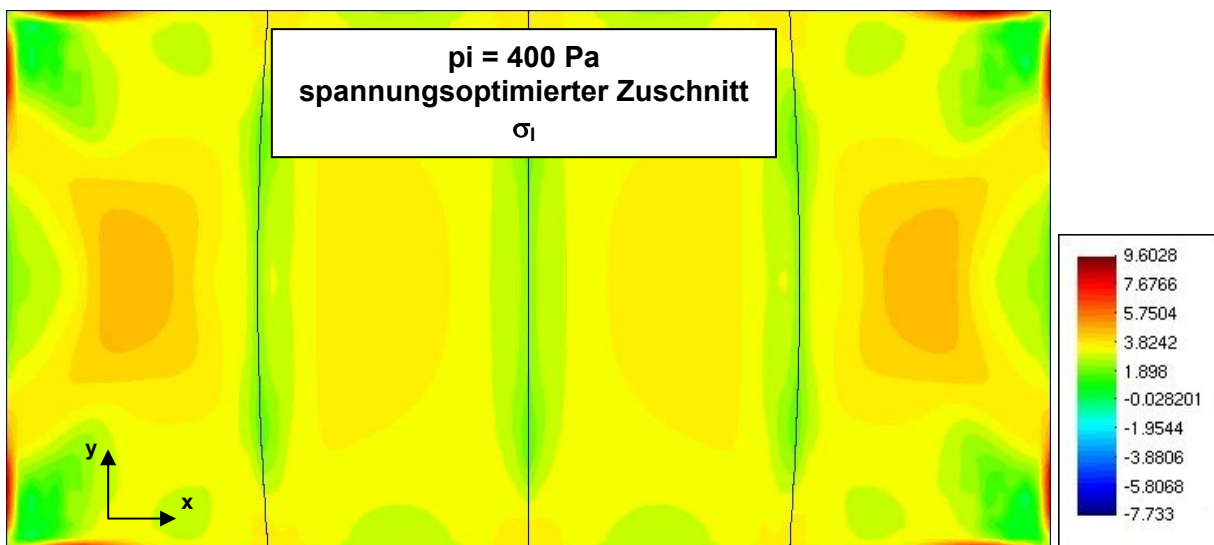


b)

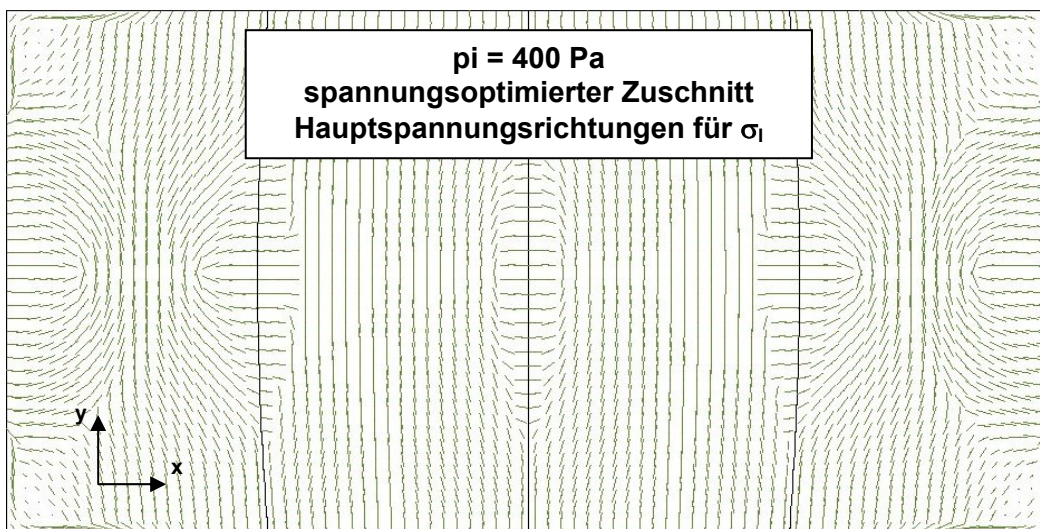
Abb. 4.94 Schubspannungen: a)  $\sigma_{12} = |\sigma_{21}| \text{ [N/mm}^2\text{]}$  und b) Hauptspannungsrichtungen, Berstversuch 2003, spannungsoptimierter Zuschnitt (Vergleichsrechnung 2),  $p_i = 400 \text{ Pa}$

Abb. 4.95 (a) zeigt die größere der beiden Hauptspannungen  $\sigma_I$  für  $p_i = 400 \text{ Pa}$  (Definitionsgemäß gilt:  $\sigma_I > \sigma_{II}$ ). Für den spannungsoptimierten Zuschnitt ergeben sich lokale Spannungsspitzen an den Rändern der Eckbereiche (dunkelrote Bereiche). Für eine Bemessung sind sie kaum relevant, da sie - einmal im plastischen Bereich – schnell abgebaut werden. Die Flächenschweißnähte werden deutlich geringer beansprucht, als die Mittelbereiche der Teilflächen. Abb. 4.95 (b) zeigt die zugeordneten Hauptspannungsrichtungen.

Spannung	Maximum	Minimum
$\sigma_I \text{ [N/mm}^2\text{]}$	+ 9,60	- 0,13



a)

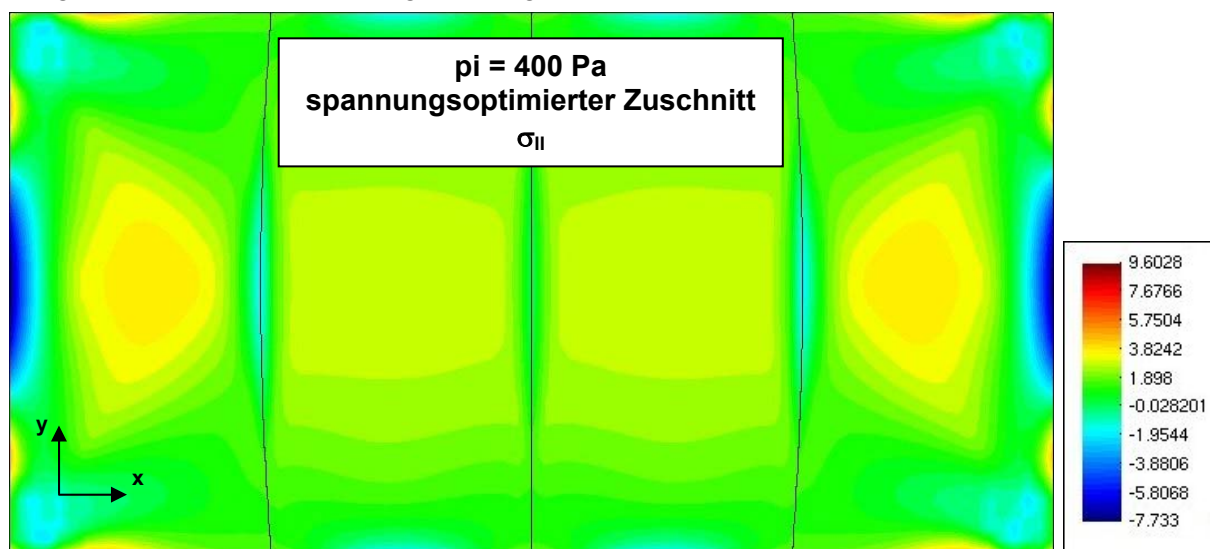


b)

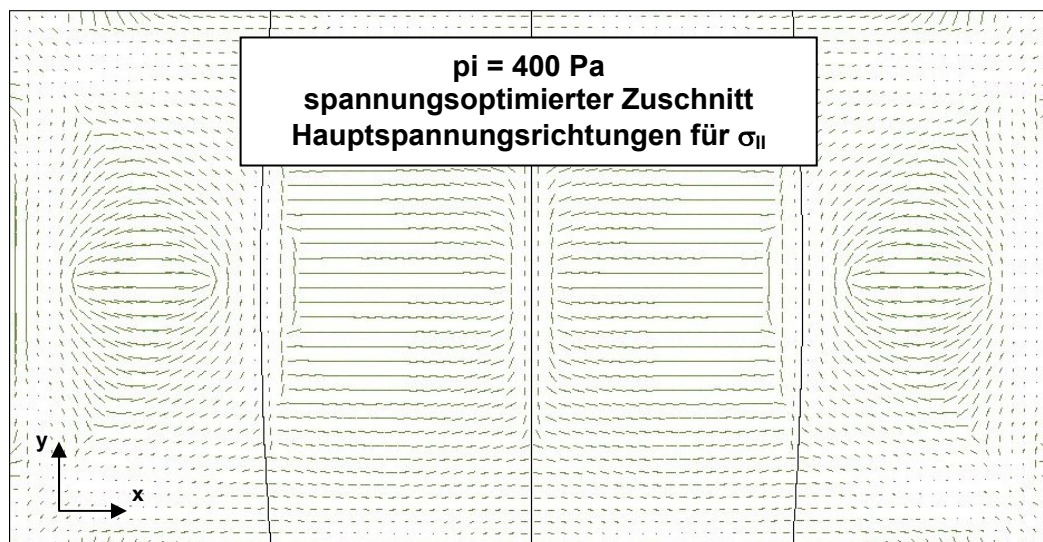
Abb. 4.95 a) Hauptspannung  $\sigma_I \text{ [N/mm}^2\text{]}$ ; b) zugeordnete Hauptspannungsrichtungen, Berstversuch 2003, spannungsoptimierter Zuschnitt (Vergleichsrechnung 2),  $p_i = 400 \text{ Pa}$

Abb. 4.96 (a) zeigt die kleinere der beiden Hauptspannungen  $\sigma_{II}$  für  $p_i = 400 \text{ Pa}$ . Der Maximalwert (orangefarbene Bereiche) tritt etwa in der Mitte der beiden äußeren Teilflächen auf. Auch die kleinere der beiden Hauptspannungen ist an den Flächenschweißnähten deutlich geringer als im Mittelbereich der Teilflächen. An den kurzen Pneurändern bilden sich kleine Druckzonen mit hohen Druckspannungen (dunkelblaue Bereiche), die sich den Druckspannungen in situ durch starke Faltenbildung entziehen. Abb. 4.96 (b) zeigt die zugeordneten Hauptspannungsrichtungen.

Spannung	Maximum	Minimum
$\sigma_{II} \text{ [N/mm}^2\text{]}$	+ 4,52	- 7,73



a)



b)

Abb. 4.96 a) Hauptspannung  $\sigma_{II}$  [N/mm<sup>2</sup>]; b) zugeordnete Hauptspannungsrichtungen, Berstversuch 2003, spannungsoptimierter Zuschnitt (Vergleichsrechnung 2),  $p_i = 400 \text{ Pa}$

Abb. 4.97 zeigt die Vergleichsspannungen nach VON MISES  $\sigma_M$  für  $p_i = 400 \text{ Pa}$ . Die Verteilung ist achsensymmetrisch zu den beiden Mittelachsen. Der Maximalwert (dunkelrote Bereiche) ist lokal begrenzt auf die vier Ecken sowie die Mitte der beiden kurzen Pneuränder. Im überwiegenden Bereich ist die Vergleichsspannung geringer als die Hälfte ihres Maximalwertes.

Spannung	Maximum	Minimum
$\sigma_M \text{ [N/mm}^2\text{]}$	+ 8,71	+ 0,71

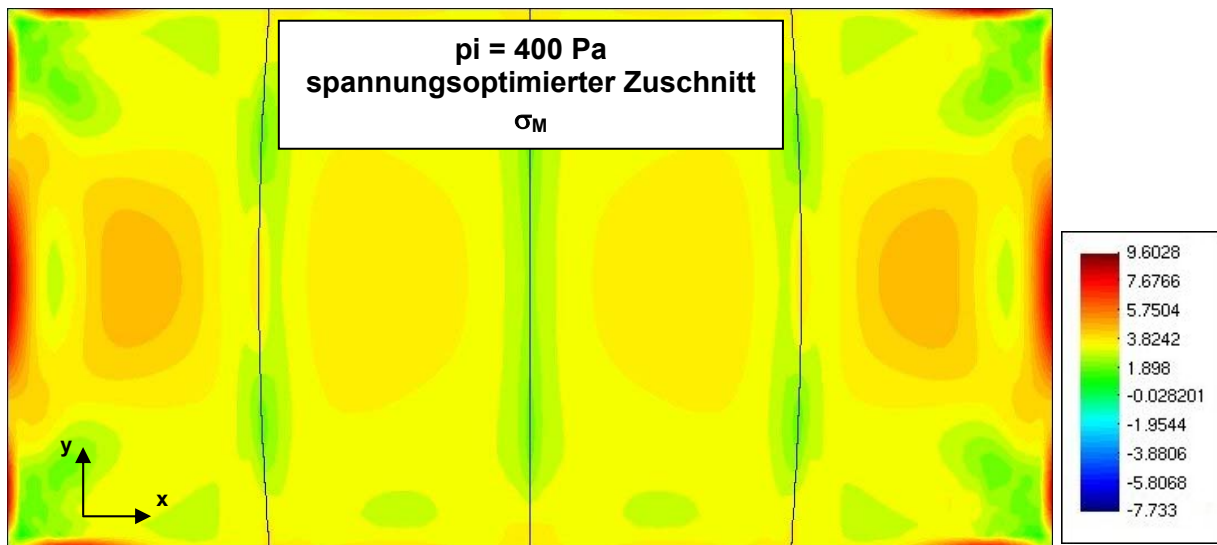
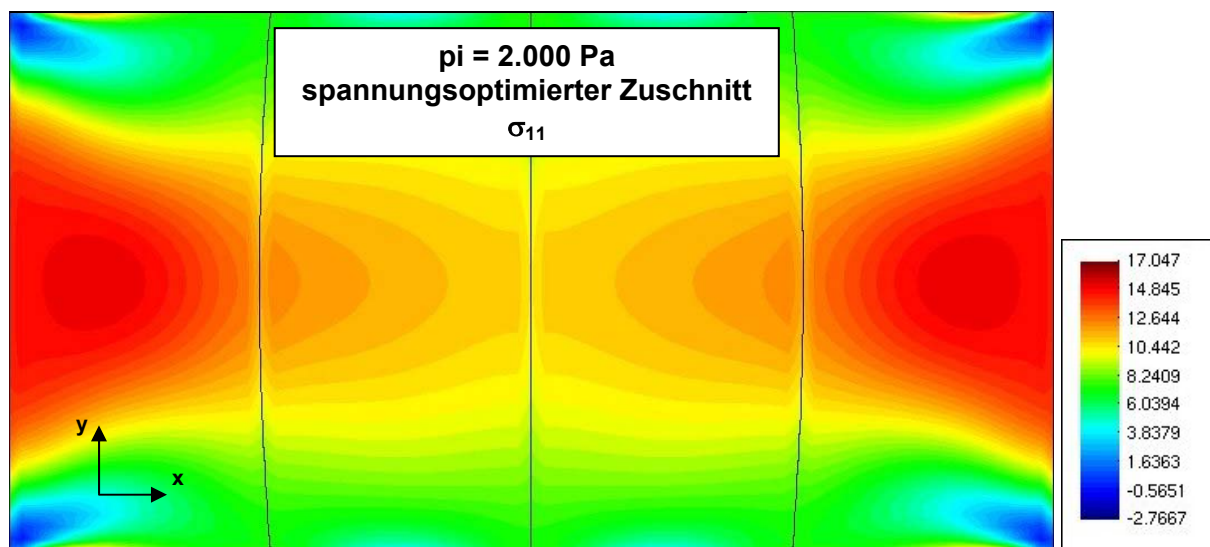


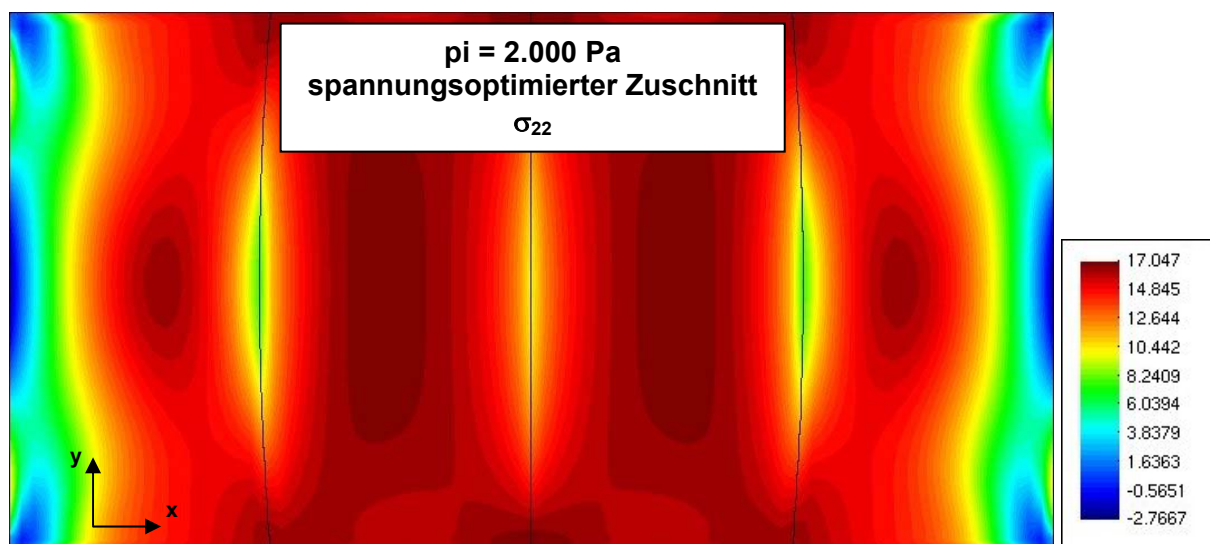
Abb. 4.97 Vergleichsspannungen nach VON MISES  $\sigma_M \text{ [N/mm}^2\text{]}$ , Berstversuch 2003, spannungsoptimierter Zuschnitt (Vergleichsrechnung 2),  $p_i = 400 \text{ Pa}$

Abb. 4.98 zeigt die Normalspannungen  $\sigma_{11}$  (a) und  $\sigma_{22}$  (b) für  $p_i = 2.000 \text{ Pa}$ . Der Maximalwert von  $\sigma_{11}$  wird in den beiden äußeren Teilflächen erreicht, der von  $\sigma_{22}$  im Mittelbereich der inneren beiden Teilflächen. Die Normalspannung  $\sigma_{22}$  wird bei dieser Belastung größer als  $\sigma_{11}$ , d.h. die Folie trägt zunehmend über die kurze Spannweite (y-Richtung) ab. Auch hier werden die Flächenschweißnähte geringer beansprucht, als die Mittelbereiche der Teilflächen.

Spannung	Maximum	Minimum
$\sigma_{11} \text{ [N/mm}^2\text{]}$	+ 15,36	- 1,58
$\sigma_{22} \text{ [N/mm}^2\text{]}$	+ 17,05	- 2,35



a)

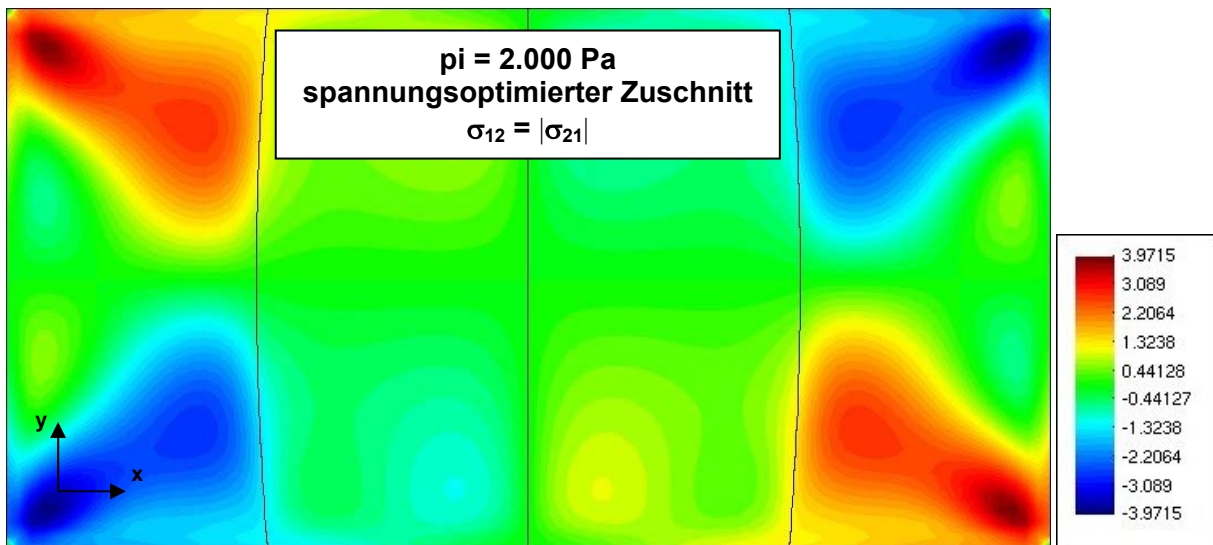


b)

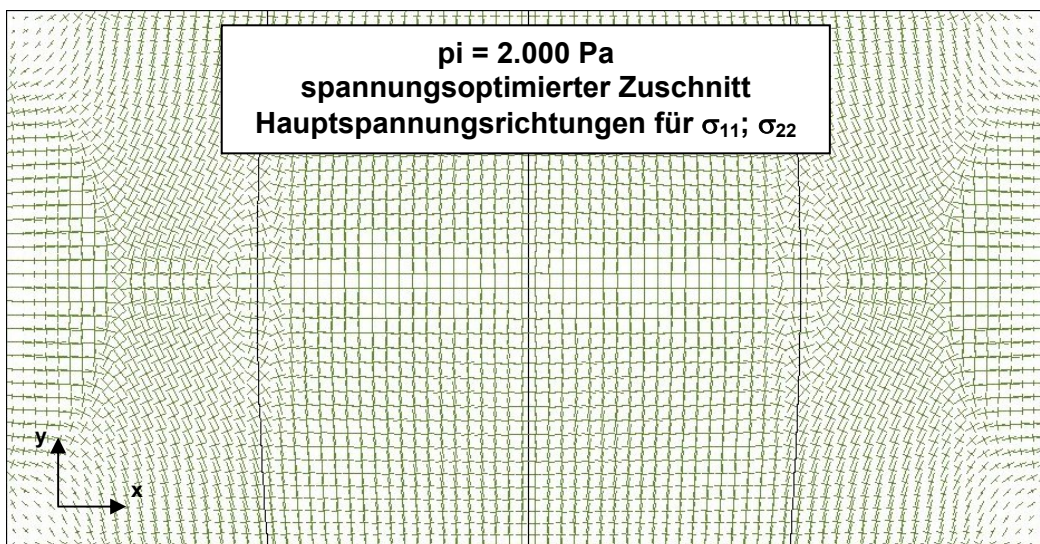
Abb. 4.98 Normalspannungen : a)  $\sigma_{11}$ ; b)  $\sigma_{22}$ ; jeweils in  $\text{[N/mm}^2\text{]}$ , Berstversuch 2003, spannungsoptimierter Zuschnitt (Vergleichsrechnung 2)  $p_i = 2.000 \text{ Pa}$

Abb. 4.99 (a) zeigt die den Normalspannungen zugeordneten Schubspannungen  $\sigma_{12} = |\sigma_{21}|$  für  $p_i = 2.000 \text{ Pa}$ . Die Maximalwerte (rote und blaue Bereiche) treten beim spannungsoptimierten Zuschnitt nahezu in der gesamten äußeren Teilfläche in Form von Schubfeldern auf. Für das symmetrische System unter symmetrischer Gleichlast sind die Schubspannungen in den beiden Mittelachsen Null. Abb. 4.99 (b) zeigt die Hauptspannungsrichtungen.

Spannung	Maximum	Minimum
$\sigma_{12} \text{ [N/mm}^2\text{]}$	+ 3,97	- 3,97



a)

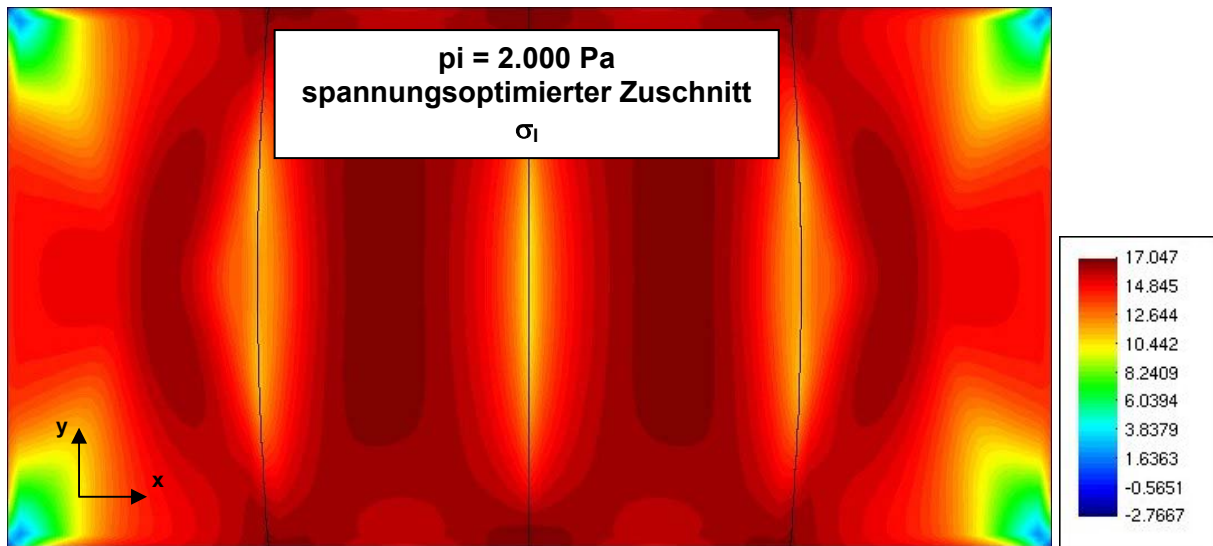


b)

Abb. 4.99 Schubspannungen: a)  $\sigma_{12} = |\sigma_{21}| \text{ [N/mm}^2\text{]}$  und b) Hauptspannungsrichtungen, Berstversuch 2003, spannungsoptimierter Zuschnitt (Vergleichsrechnung 2),  $p_i = 2.000 \text{ Pa}$

Abb. 4.100 (a) zeigt die größere der beiden Hauptspannungen  $\sigma_I$  für  $p_i = 2.000 \text{ Pa}$  (Definitionsgemäß gilt:  $\sigma_I > \sigma_{II}$ ). Für den spannungsoptimierten Zuschnitt ergibt sich der Maximalwert jeweils in der Mitte der beiden inneren Teilflächen (dunkelrote Bereiche). Die Flächenschweißnähte werden geringer beansprucht. Abb. 4.100 (b) zeigt die zugeordneten Hauptspannungsrichtungen.

Spannung	Maximum	Minimum
$\sigma_I \text{ [N/mm}^2\text{]}$	+ 17,05	- 0,13



a)



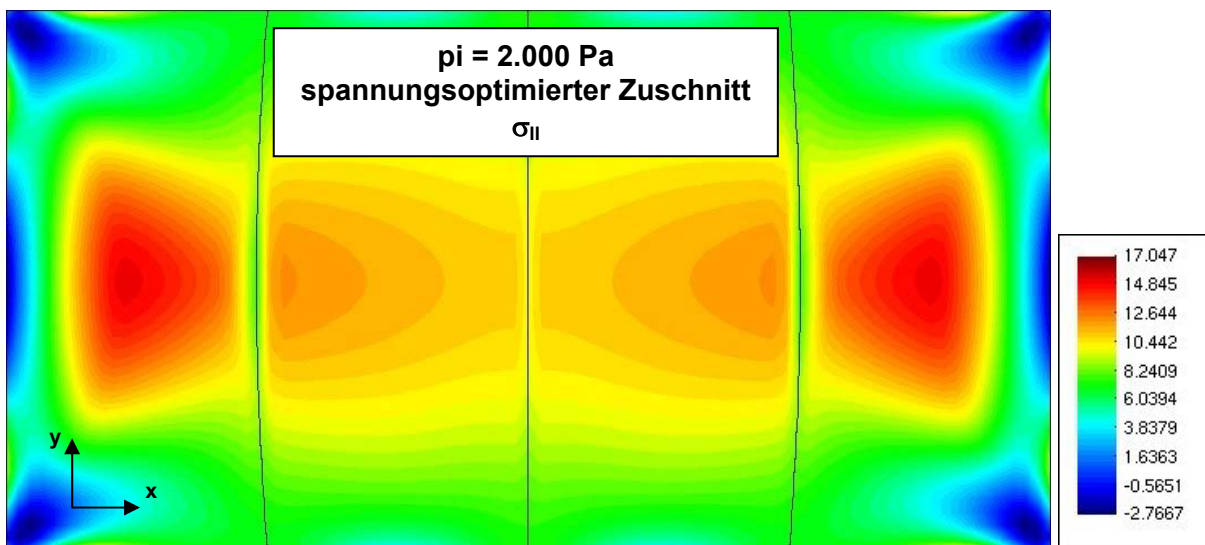
b)

Abb. 4.100 a) Hauptspannung  $\sigma_I \text{ [N/mm}^2\text{]}$ ; b) zugeordnete Hauptspannungsrichtungen, Berstversuch 2003, spannungsoptimierter Zuschnitt (Vergleichsrechnung 2),  $p_i = 2.000 \text{ Pa}$

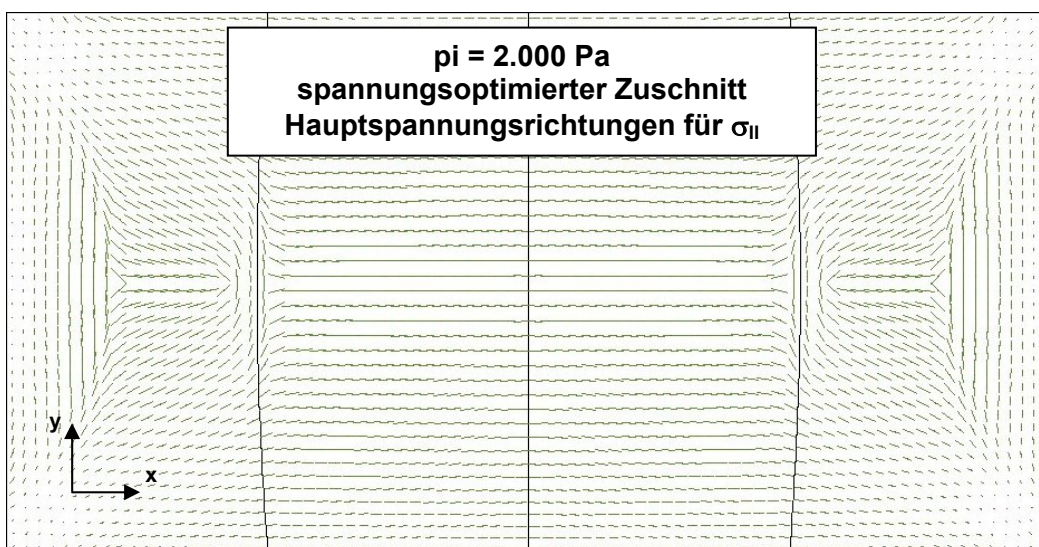


Abb. 4.101 (a) zeigt die kleinere der beiden Hauptspannungen  $\sigma_{II}$  für  $p_i = 2.000 \text{ Pa}$ . Der Maximalwert (rote Bereiche) tritt etwa in der Mitte der beiden äußeren Teilflächen auf. Auch die kleinere der beiden Hauptspannungen ist an den Flächenschweißnähten deutlich geringer als im Mittelbereich der Teilflächen. An den kurzen Pneurändern bilden sich Druckzonen (dunkelblaue Bereiche), die sich den Druckspannungen in situ durch starke Faltenbildung entziehen. Abb. 4.101 (b) zeigt die zugeordneten Hauptspannungsrichtungen.

Spannung	Maximum	Minimum
$\sigma_{II} \text{ [N/mm}^2\text{]}$	+ 15,26	- 2,77



a)



b)

Abb. 4.101 a) Hauptspannung  $\sigma_{II}$  [N/mm<sup>2</sup>]; b) zugeordnete Hauptspannungsrichtungen, Berstversuch 2003, spannungsoptimierter Zuschnitt (Vergleichsrechnung 2),  $p_i = 2.000 \text{ Pa}$

Abb. 4.102 zeigt die Vergleichsspannungen nach VON MISES  $\sigma_M$  für  $p_i = 2.000 \text{ Pa}$ . Die Verteilung ist achsensymmetrisch zu den beiden Mittelachsen. Der Maximalwert (rote Bereiche) wird in der Mitte der beiden äußeren Teilflächen erreicht. Die Verteilung ist relativ homogen über weite Bereiche der Fläche. Direkt in den Ecken wird die Vergleichsspannung negativ.

Spannung	Maximum	Minimum
$\sigma_M \text{ [N/mm}^2\text{]}$	+ 15,72	- 0,69

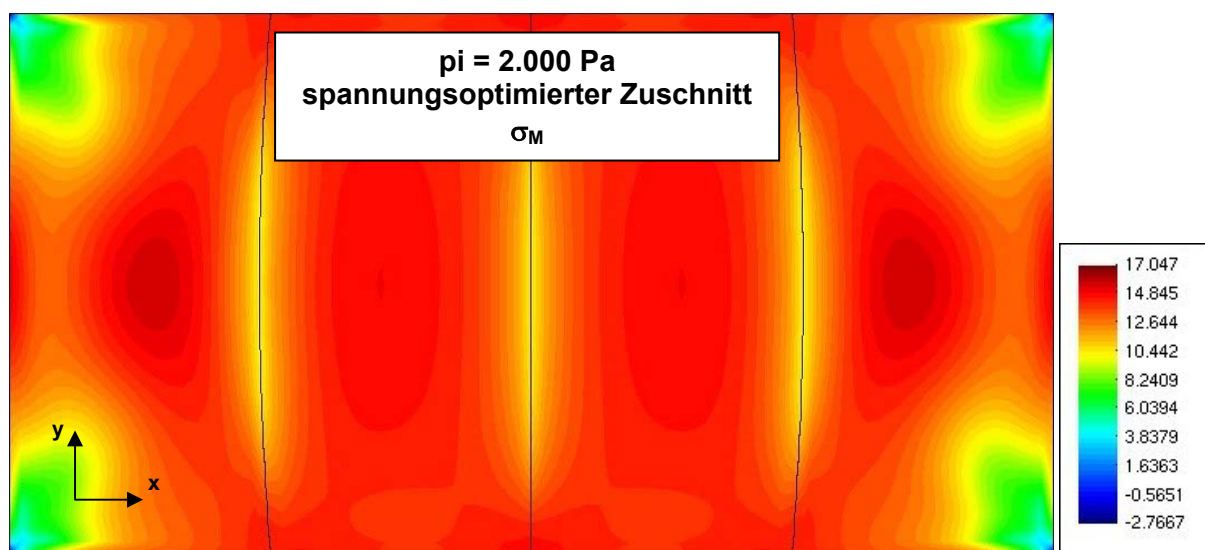


Abb. 4.102 Vergleichsspannungen nach VON MISES  $\sigma_M \text{ [N/mm}^2\text{]}$ , Berstversuch 2003, spannungsoptimierter Zuschnitt (Vergleichsrechnung 2),  $p_i = 2.000 \text{ Pa}$

### Vergleichsrechnung 3: Flachzuschnitt

Die sich unter Gebrauchs- und Bemessungslasten ergebenden Spannungen sind beim Flachzuschnitt (s. Abb. 4.103) erwartungsgemäß höher, als beim spannungsoptimierten Zuschnitt. Der Flachzuschnitt wird aber vor allem dann gewählt, wenn man mit einer (derzeit bis zu max. 12 m) langen, diskontinuierlichen Balkenschweißmaschine arbeitet, welche verfahrensbedingt keine stark gekrümmten Schweißnähte ermöglicht. Bei gleichem Folienwerkstoff und gleicher Randgeometrie sowie identischer Belastung eines Pneus führt der Flachzuschnitt zu einem geringeren Stich und zu geringeren Krümmungen. Damit werden bei gegebener Belastung zwangsläufig größere Spannungen erzeugt. Systeme mit Flachzuschnitt erfordern daher häufig die Anordnung von Seilunterspannungen zur Abtragung von Schneelasten sowie geeignete konstruktive Lösungen zur Reduktion der Windbelastungen. Der Flachzuschnitt führt also bei gleichen zulässigen Beanspruchbarkeiten und gleichen Systembedingungen zu einer geringeren realisierbaren Spannweite, als der spannungsoptimierte Zuschnitt.

Die Vorteile des Flachzuschnitts liegen auf der Hand: Durch den geringen Stich ist die Folienfläche relativ klein und somit der Materialverbrauch im Vergleich zum spannungsoptimierten Zuschnitt niedrig. Durch die geraden und parallelen Schweißnähte wird der Verschnitt reduziert und die Fertigungsdauer reduziert. Als Nachteile des Flachzuschnittes sind die Erfordernis konstruktiver Lösungen zur Reduktion bzw. Aufnahme hoher Wind- und Schneelasten (beispielsweise Seilunterspannungen) sowie die geringere Spannweite mit allen Konsequenzen für die Unterkonstruktion und das Erscheinungsbild zu nennen.

Da die Schweißnahtfestigkeiten i.d.R. die maßgebenden Grenzzustände der Tragfähigkeit definieren, ist die realisierbare Spannweite nicht nur von der Zuschnitts- und Schweißnahtgeometrie, sondern auch von der Schweißnahtqualität abhängig.

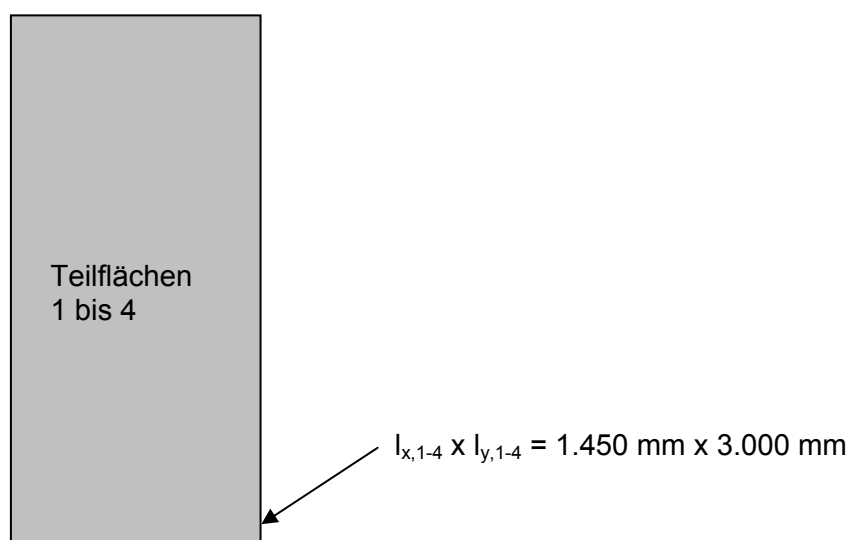
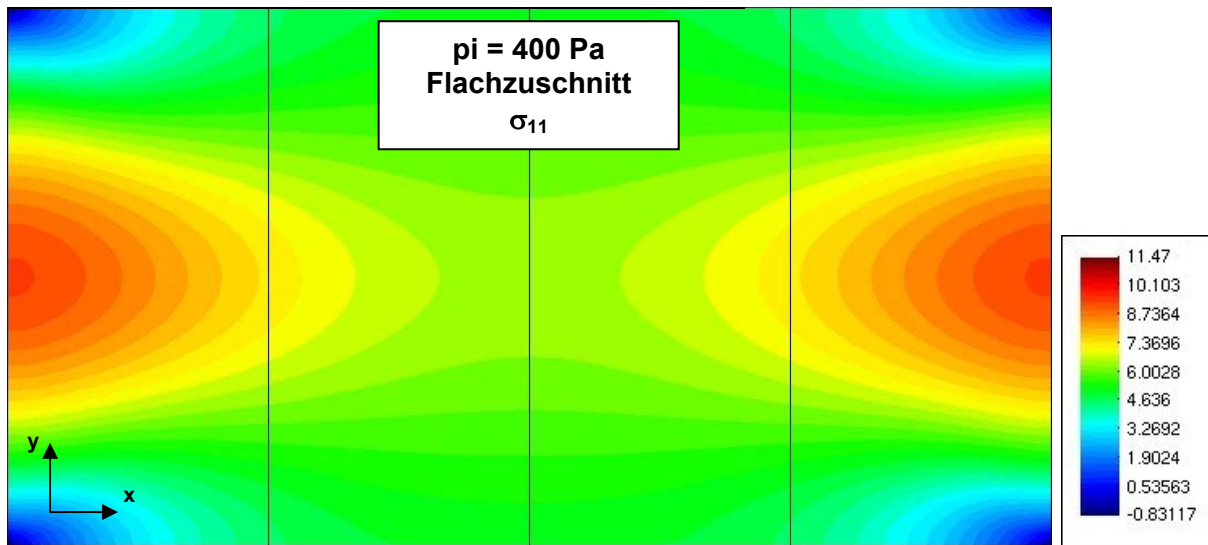


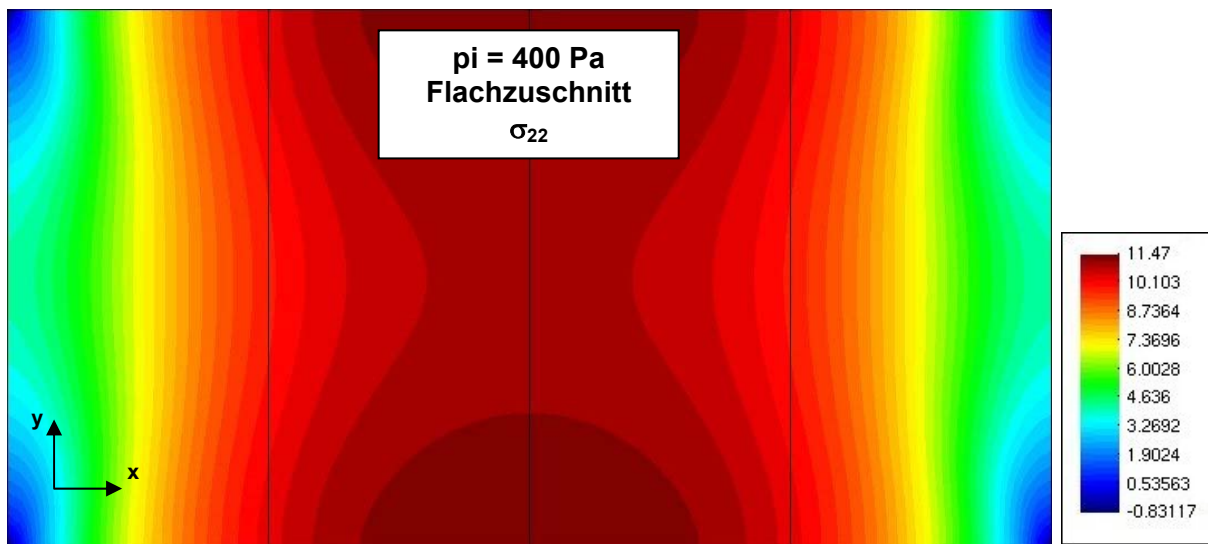
Abb. 4.103 Zuschnitte (Teilflächegeometrien 1 bis 4), Berstversuch 2003, Flachzuschnitt (Vergleichsrechnung 3)

Abb. 4.104 zeigt die Normalspannungen  $\sigma_{11}$  (a) und  $\sigma_{22}$  (b) für  $p_i = 400 \text{ Pa}$ . Für den Flachzuschnitt ergeben sich relativ hohe Normalspannungen in der Mitte der Pneuränder (rote Bereiche). Ihre Maxima haben in x- und y-Richtung in etwa das gleiche Spannungsniveau. In den Ecken bilden sich kleine Druckzonen (dunkelblaue Bereiche), die sich in situ durch Faltenbildung den Druckspannungen entziehen.

Spannung	Maximum	Minimum
$\sigma_{11}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	+ 9,37	- 0,84
$\sigma_{22}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	+ 11,47	- 0,82



a)

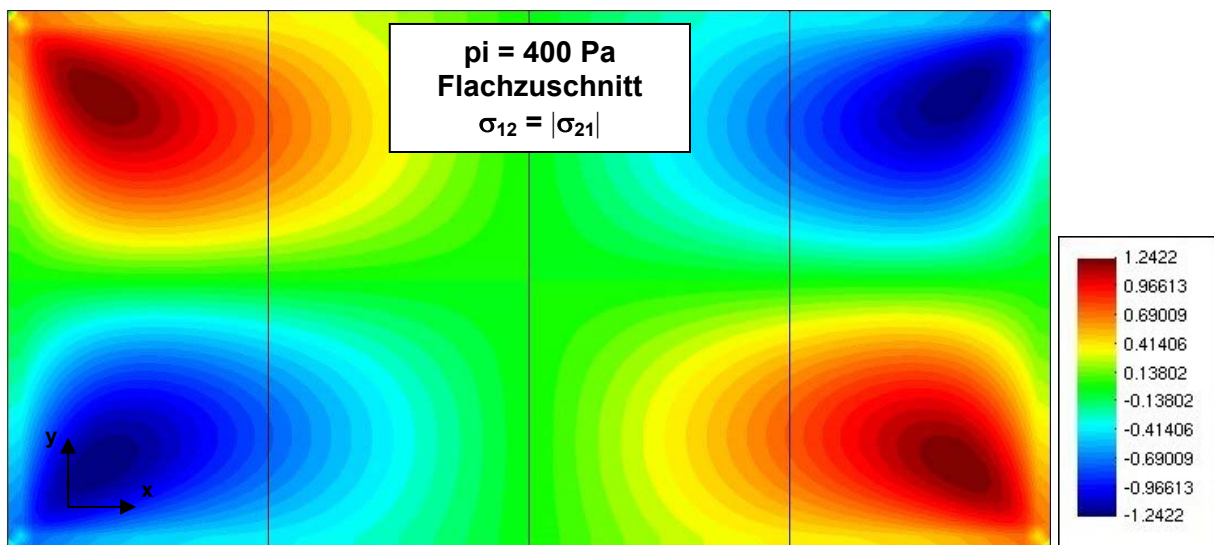


b)

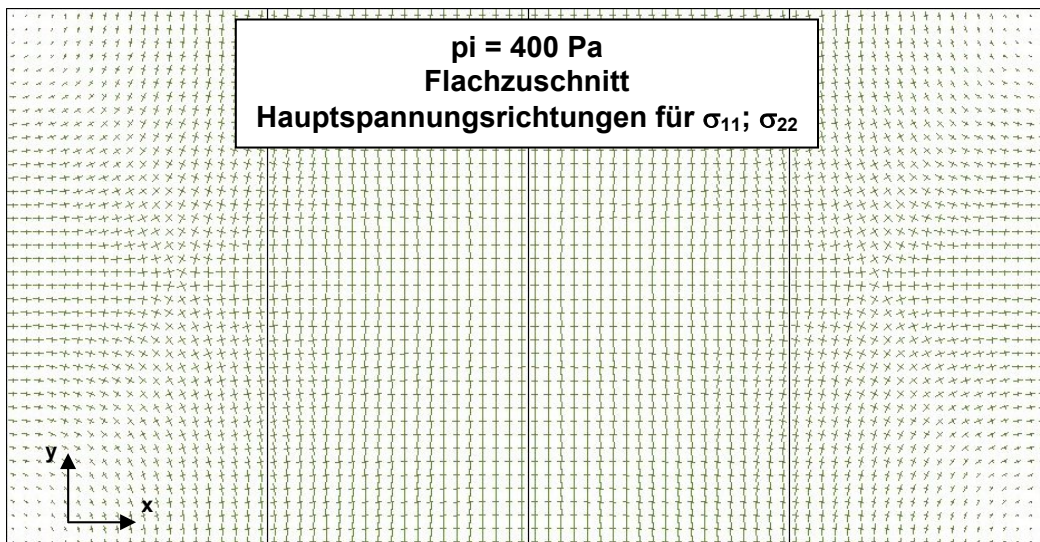
Abb. 4.104 Normalspannungen : a)  $\sigma_{11}$ ; b)  $\sigma_{22}$ ; jeweils in [N/mm<sup>2</sup>], Berstversuch 2003, Flachzuschnitt (Vergleichsrechnung 3),  $p_i = 400 \text{ Pa}$

Abb. 4.105 (a) zeigt die den Normalspannungen zugeordneten Schubspannungen  $\sigma_{12} = |\sigma_{21}|$  für  $p_i = 400 \text{ Pa}$ . Die Maximalwerte (dunkelrote und dunkelblaue Bereiche) treten nicht an den Stellen maximaler Normalspannungen auf, sondern nahe den vier Eckpunkten. Für das symmetrische System unter symmetrischer Gleichlast sind die Schubspannungen in den beiden Mittelachsen Null. Abb. 4.105 (b) zeigt die Hauptspannungsrichtungen.

Spannung	Maximum	Minimum
$\sigma_{12} \text{ [N/mm}^2\text{]}$	+ 1,24	- 1,24



a)

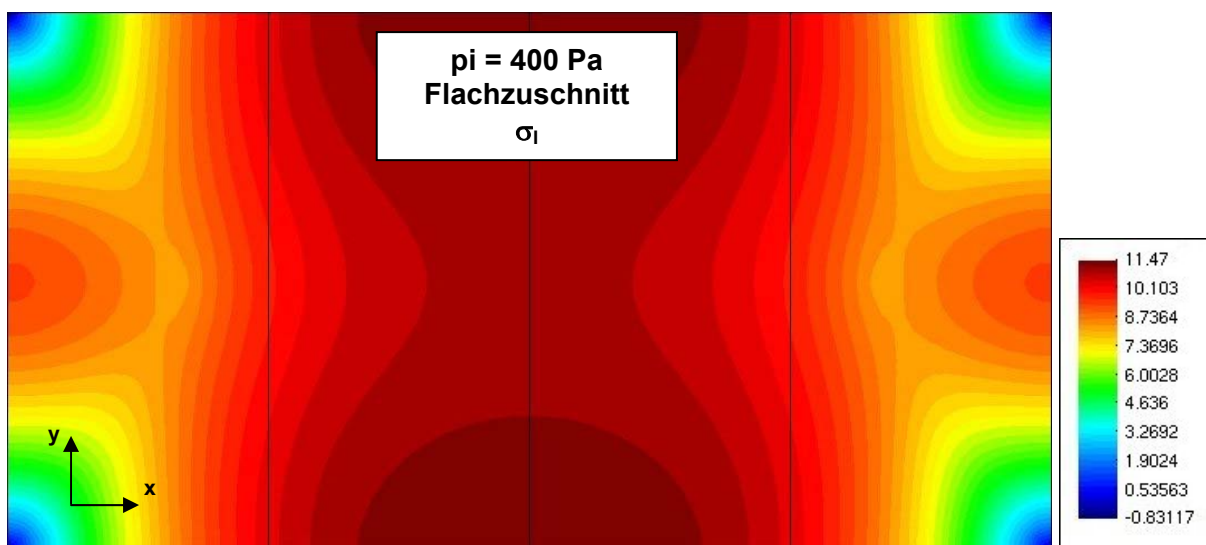


b)

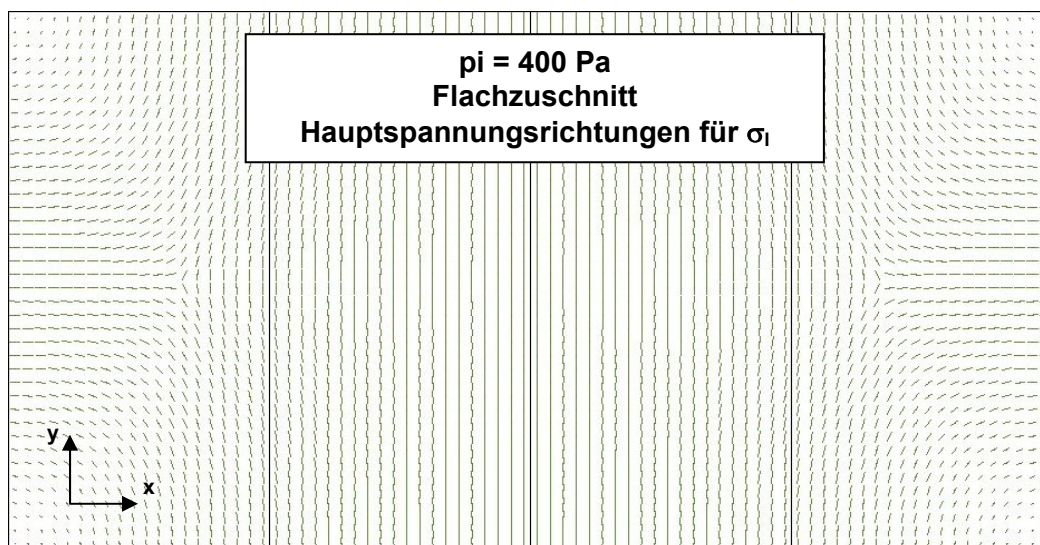
Abb. 4.105 Schubspannungen: a)  $\sigma_{12} = |\sigma_{21}| \text{ [N/mm}^2\text{]}$  und b) Hauptspannungsrichtungen, Berstversuch 2003, Flachzuschnitt (Vergleichsrechnung 3),  $p_i = 400 \text{ Pa}$

Abb. 4.106 (a) zeigt die größere der beiden Hauptspannungen  $\sigma_I$  für  $p_i = 400$  Pa (definitionsgemäß gilt:  $\sigma_I > \sigma_{II}$ ). Der Maximalwert (dunkelrote Bereiche) tritt in der Mitte der beiden langen Pneuränder auf - also dort, wo auch die Normalspannungen in y-Richtung maximal werden. Die beiden Hauptspannungen stehen an den Rändern im Verhältnis  $\sigma_I : \sigma_{II} \cong 11,46 : 5,17 = 2,22 = \frac{1}{\nu} = \frac{1}{0,45}$ . Dies entspricht dem Kehrwert der Querkontraktionszahl  $\nu$ . Abb. 4.106 (b) zeigt die zugeordneten Hauptspannungsrichtungen.

Spannung	Maximum	Minimum
$\sigma_I$ [N/mm <sup>2</sup> ]	+ 11,47	- 0,83



a)

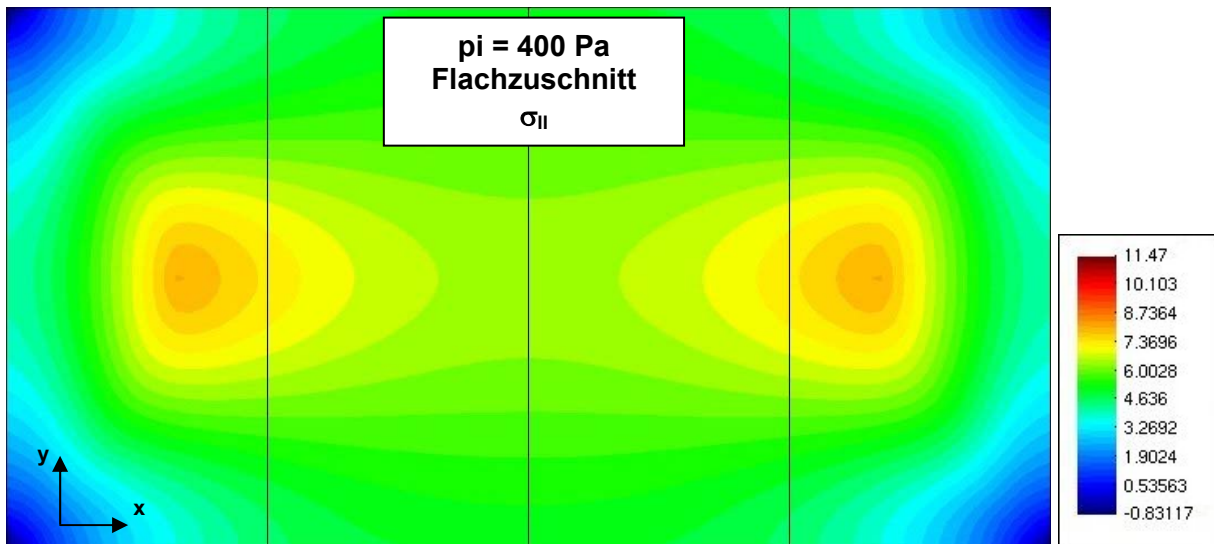


b)

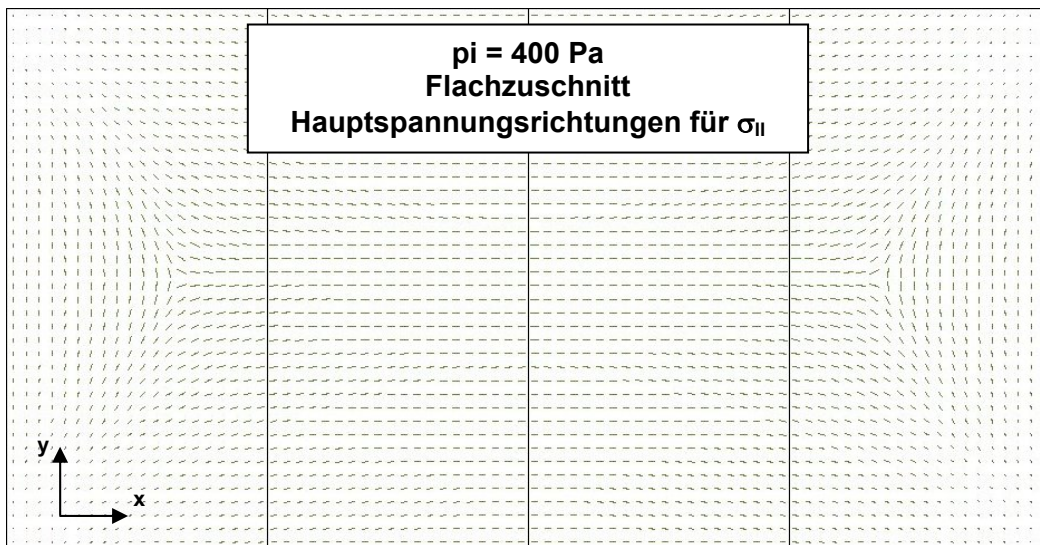
Abb. 4.106 a) Hauptspannung  $\sigma_I$  [N/mm<sup>2</sup>]; b) zugeordnete Hauptspannungsrichtungen, Berstversuch 2003, Flachzuschnitt (Vergleichsrechnung 3),  $p_i = 400$  Pa

Abb. 4.107 (a) zeigt die kleinere der beiden Hauptspannungen  $\sigma_{II}$  für  $p_i = 400 \text{ Pa}$ . Der Maximalwert (orangefarbene Bereiche) tritt in den beiden Viertelpunkten des Pneus auf. Abb. 4.107 (b) zeigt die zugeordneten Hauptspannungsrichtungen.

Spannung	Maximum	Minimum
$\sigma_{II} \text{ [N/mm}^2\text{]}$	+ 8,11	- 0,83



a)



b)

Abb. 4.107 a) Hauptspannung  $\sigma_{II}$  [N/mm<sup>2</sup>]; b) zugeordnete Hauptspannungsrichtungen, Berstversuch 2003, Flachzuschnitt (Vergleichsrechnung 3),  $p_i = 400 \text{ Pa}$

Abb. 4.108 zeigt die Vergleichsspannungen nach VON MISES  $\sigma_M$  für  $p_i = 400 \text{ Pa}$ . Der Maximalwert (rote Bereiche) wird in der Mitte der beiden langen Pneuränder erreicht.

Spannung	Maximum	Minimum
$\sigma_M \text{ [N/mm}^2\text{]}$	+ 9,95	+ 0,54

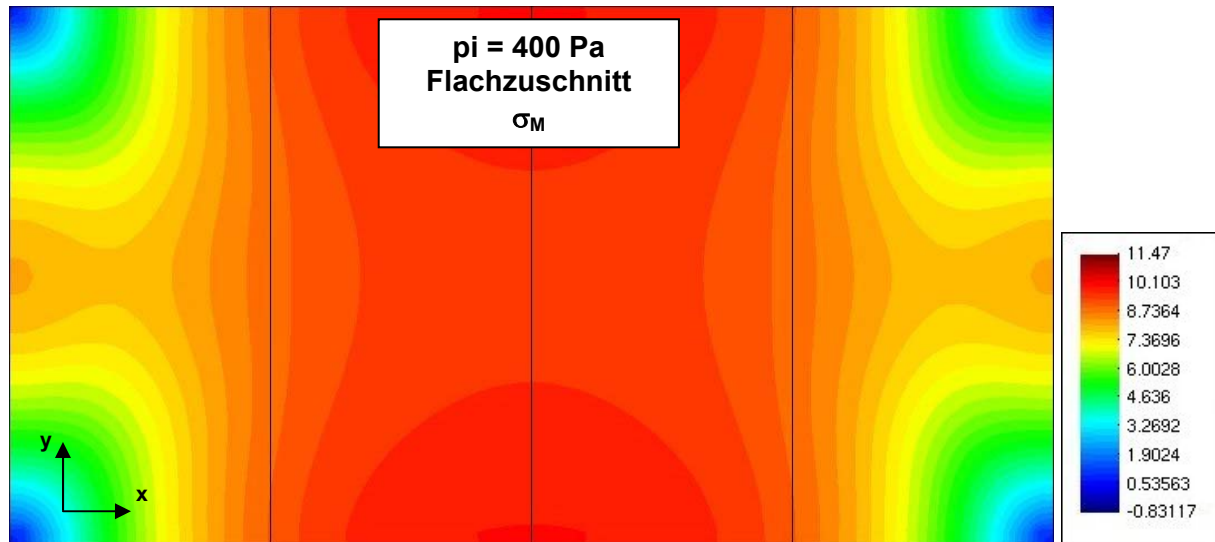


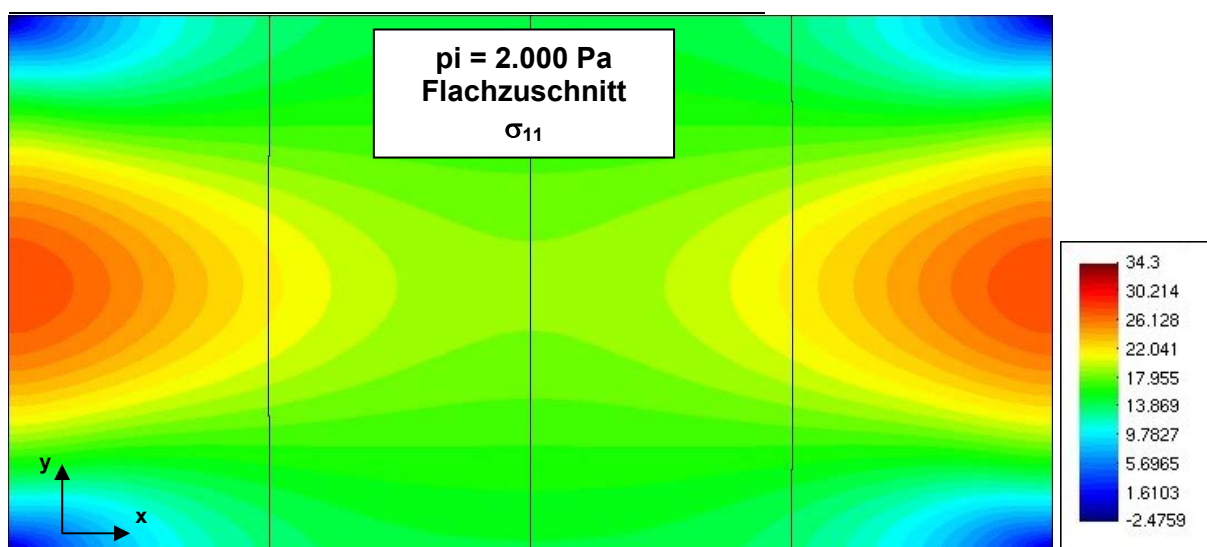
Abb. 4.108 Vergleichsspannungen nach VON MISES  $\sigma_M \text{ [N/mm}^2\text{]}$ , Berstversuch 2003, Flachzuschnitt (Vergleichsrechnung 3),  $p_i = 400 \text{ Pa}$



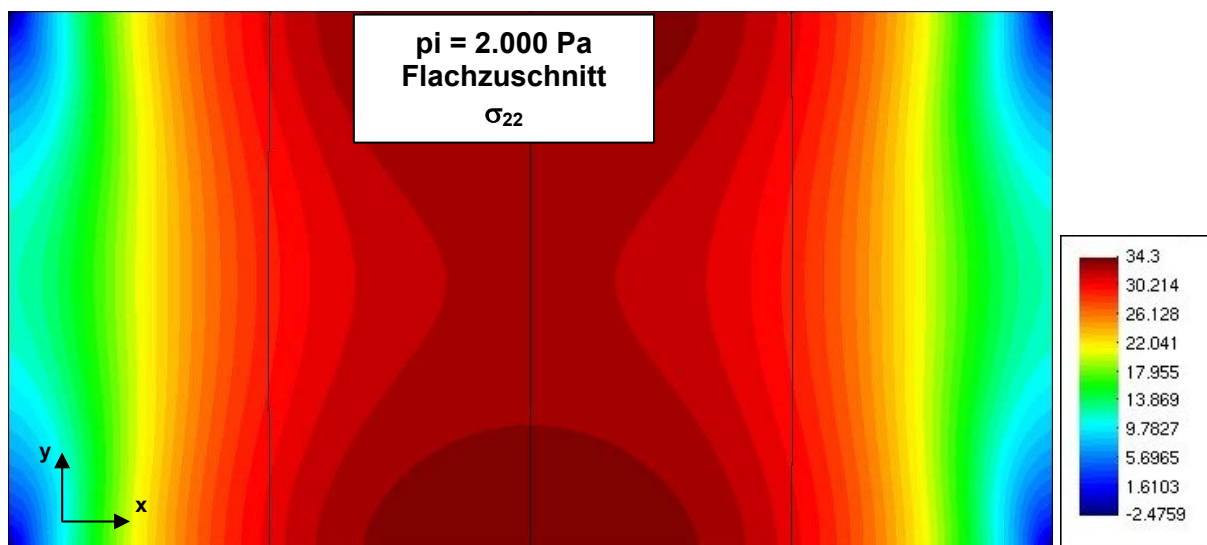
Abb. 4.109 zeigt die linear über die Fließgrenze hinaus berechneten Normalspannungen  $\sigma_{11}$  (a) und  $\sigma_{22}$  (b) für  $p_i = 2.000 \text{ Pa}$  (Die tatsächlichen Spannungen wären durch Überschreiten der Fließgrenze geringer). Auch für den Flachzuschnitt ergeben sich die höchsten Normalspannungen in der Mitte der Pneuränder (rote Bereiche). Die Normalspannung  $\sigma_{22}$  wird bei dieser Belastung größer als  $\sigma_{11}$ , d.h. die Folie trägt zunehmend über die kurze Spannweite (y-Richtung) ab. In den Ecken bilden sich kleine Druckzonen (dunkelblaue Bereiche), die sich in situ durch Faltenbildung den Druckspannungen entziehen.

Spannung	Maximum	Minimum
$\sigma_{11} \text{ [N/mm}^2\text{]}$	+ 27,81*	- 2,50*
$\sigma_{22} \text{ [N/mm}^2\text{]}$	+ 34,30*	- 2,43*

\* Anm: Lineare Berechnung (E-Modul =  $1.100 \text{ N/mm}^2$ ) über die Fließgrenze hinaus. Die tatsächlichen Spannungen sind geringer.



a)

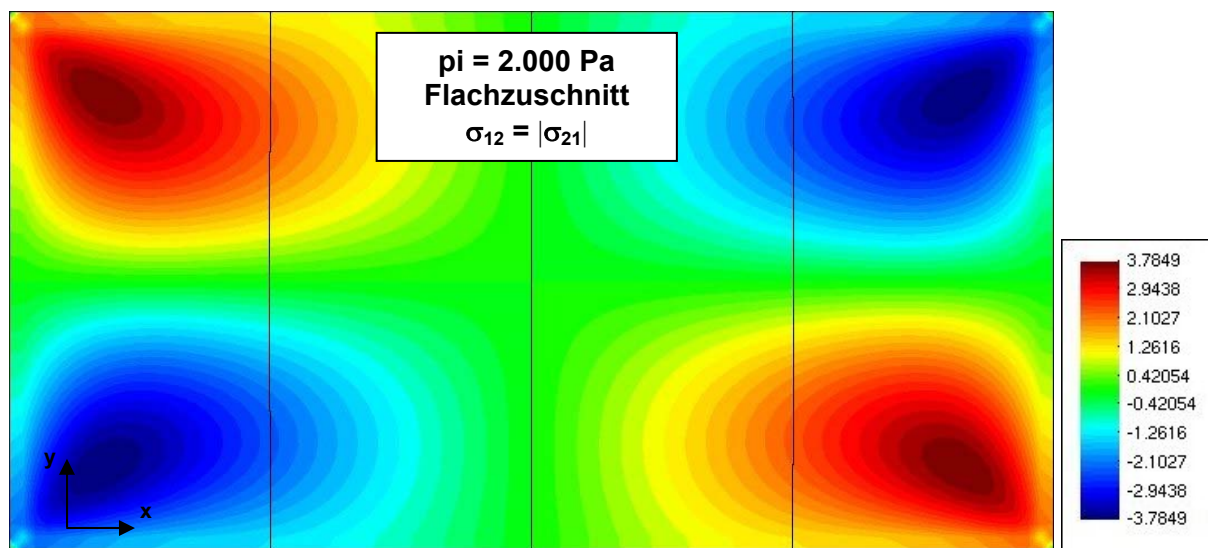


b)

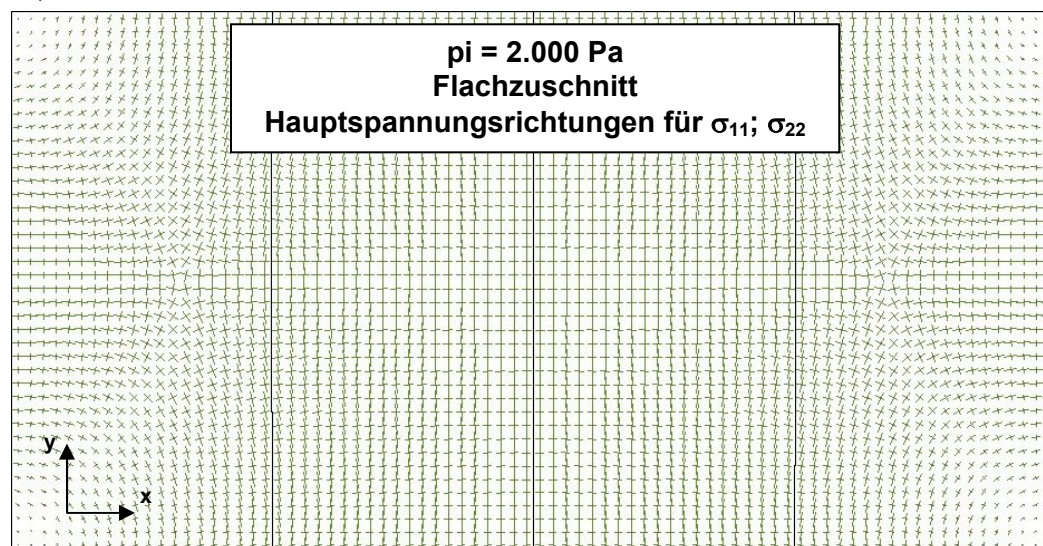
Abb. 4.109 Normalspannungen : a)  $\sigma_{11}$ ; b)  $\sigma_{22}$ ; jeweils in  $\text{[N/mm}^2\text{]}$ , Berstversuch 2003, Flachzuschnitt (Vergleichsrechnung 3),  $p_i = 2.000 \text{ Pa}$

Abb. 4.110 (a) zeigt die den Normalspannungen zugeordneten Schubspannungen  $\sigma_{12} = |\sigma_{21}|$  für  $p_i = 2.000 \text{ Pa}$ . Die Maximalwerte (dunkelrote und dunkelblaue Bereiche) treten nicht an den Stellen maximaler Normalspannungen auf, sondern nahe den vier Eckpunkten. Für das symmetrische System unter symmetrischer Gleichlast sind die Schubspannungen in den beiden Mittelachsen Null. Abb. 4.110 (b) zeigt die Hauptspannungsrichtungen.

Spannung	Maximum	Minimum
$\sigma_{12} \text{ [N/mm}^2\text{]}$	+ 3,79	- 3,79



a)



b)

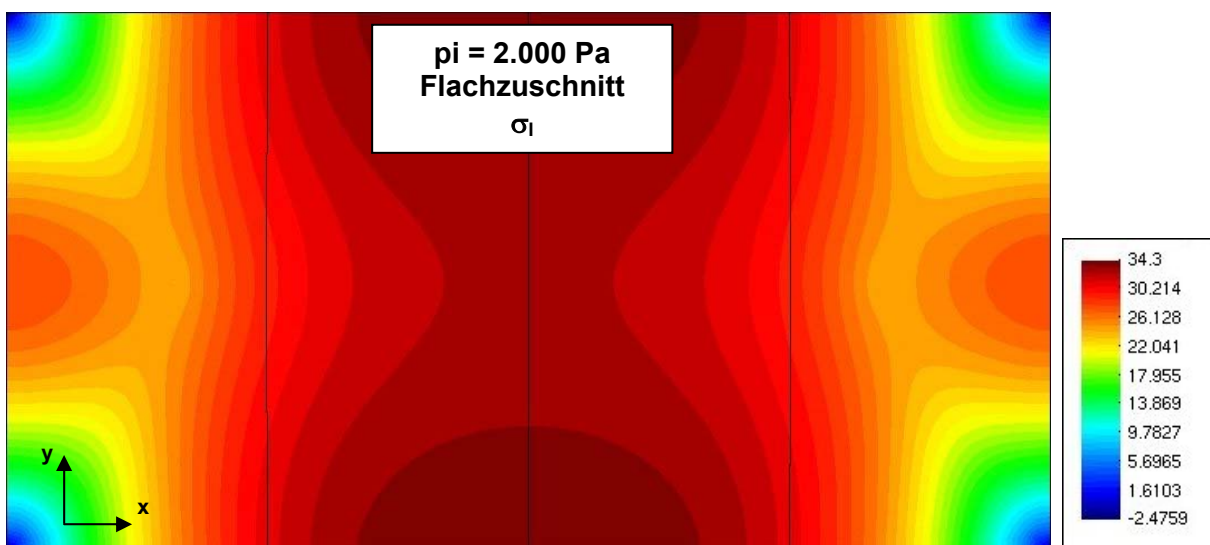
Abb. 4.110 Schubspannungen: a)  $\sigma_{12} = |\sigma_{21}| \text{ [N/mm}^2\text{]}$  und b) Hauptspannungsrichtungen, Berstversuch 2003, Flachzuschnitt (Vergleichsrechnung 3),  $p_i = 2.000 \text{ Pa}$

Abb. 4.111 (a) zeigt die linear über die Fließgrenze hinaus berechnete größere der beiden Hauptspannungen  $\sigma_I$  für  $p_i = 2.000 \text{ Pa}$  (definitionsgemäß gilt:  $\sigma_I > \sigma_{II}$ ). Der Maximalwert (dunkelrote Bereiche) tritt in der Mitte der beiden langen Pneuränder auf - also dort, wo auch die Normalspannungen in y-Richtung maximal werden. Die beiden Hauptspannungen stehen an den Rändern im Verhältnis  $\sigma_I : \sigma_{II} \cong 34,30 : 15,45 = 2,22 = \frac{1}{\nu} = \frac{1}{0,45}$ . Abb.

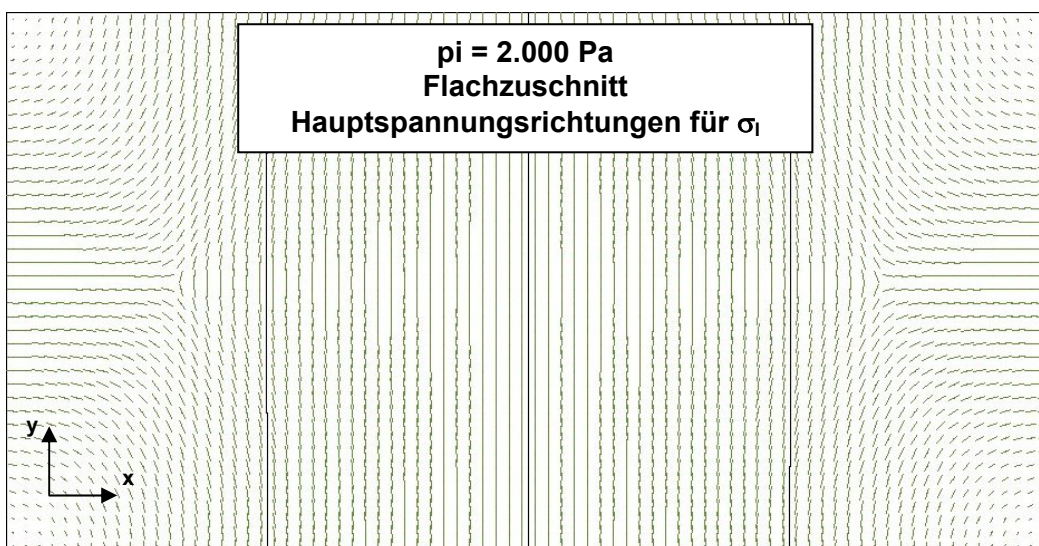
Spannung	Maximum	Minimum
$\sigma_I \text{ [N/mm}^2\text{]}$	+ 34,30*	- 2,48*

\* Anm: Lineare Berechnung (E-Modul =  $1.100 \text{ N/mm}^2$ ) über die Fließgrenze hinaus. Die tatsächlichen Spannungen sind geringer.

4.111 (b) zeigt die zugeordneten Hauptspannungsrichtungen.



a)



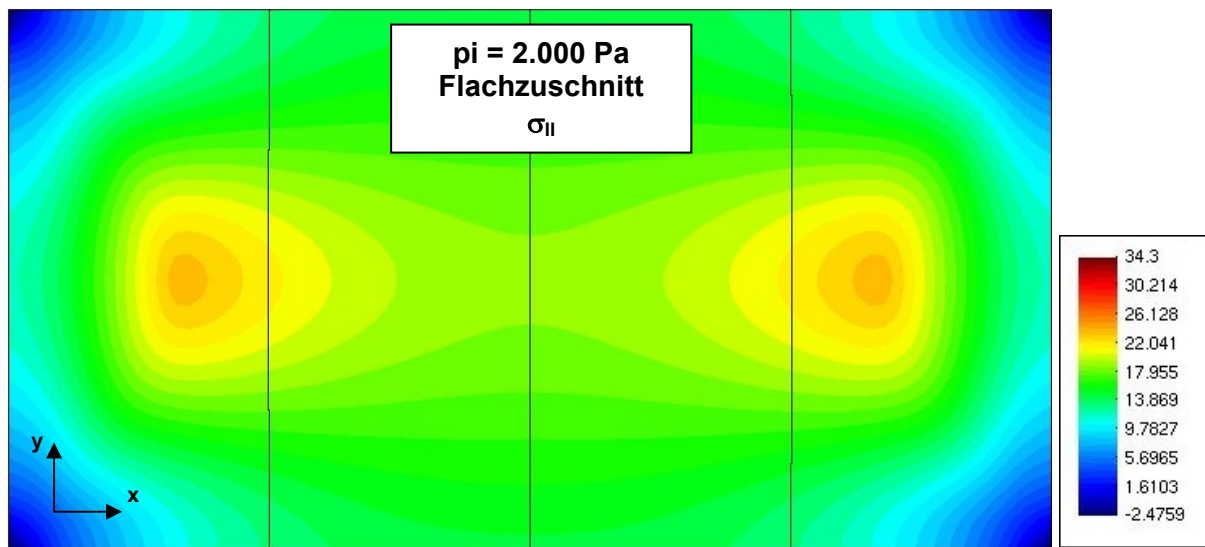
b)

Abb. 4.111 a) Hauptspannung  $\sigma_I \text{ [N/mm}^2\text{]}$ ; b) zugeordnete Hauptspannungsrichtungen, Berstversuch 2003, Flachzuschnitt (Vergleichsrechnung 3),  $p_i = 2.000 \text{ Pa}$

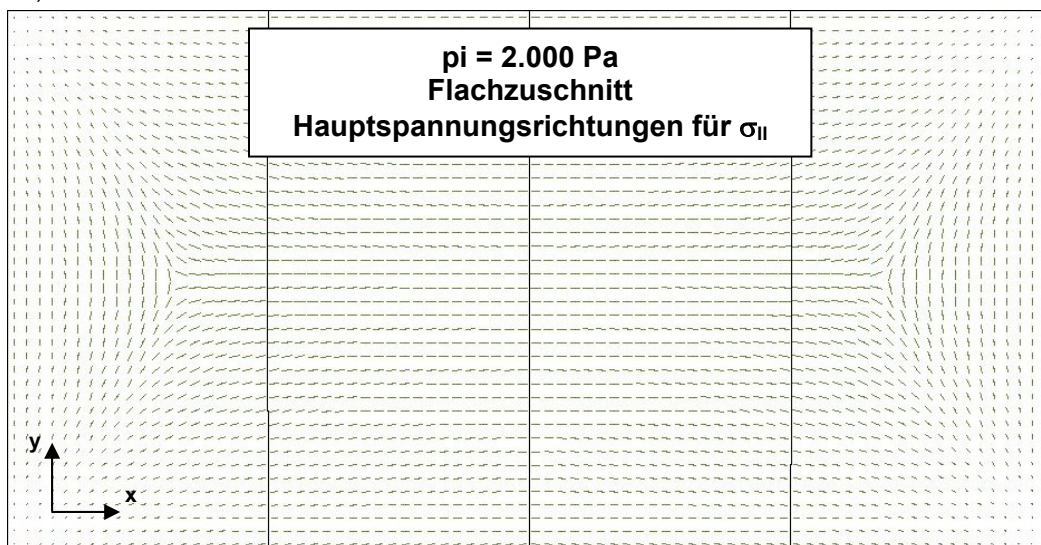
Abb. 4.112 (a) zeigt die linear über die Fließgrenze hinaus berechnete kleinere der beiden Hauptspannungen  $\sigma_{II}$  für  $p_i = 2.000 \text{ Pa}$ . Der Maximalwert (orangefarbene Bereiche) tritt in den beiden Viertelpunkten des Pneus auf. Abb. 4.112 (b) zeigt die zugeordneten Hauptspannungsrichtungen.

Spannung	Maximum	Minimum
$\sigma_{II} \text{ [N/mm}^2\text{]}$	+ 23,96*	- 2,49*

\* Anm: Lineare Berechnung (E-Modul =  $1.100 \text{ N/mm}^2$ ) über die Fließgrenze hinaus. Die tatsächlichen Spannungen sind geringer.



a)



b)

Abb. 4.112 a) Hauptspannung  $\sigma_{II}$  [N/mm<sup>2</sup>]; b) zugeordnete Hauptspannungsrichtungen, Berstversuch 2003, Flachzuschnitt (Vergleichsrechnung 3),  $p_i = 2.000 \text{ Pa}$

Abb. 4.113 zeigt die linear über die Fließgrenze hinaus berechnete Vergleichsspannungen nach VON MISES  $\sigma_M$  für  $p_i = 2.000 \text{ Pa}$ . Der Maximalwert (rote Bereiche) wird in der Mitte der beiden langen Pneuränder erreicht.

Spannung	Maximum	Minimum
$\sigma_M \text{ [N/mm}^2\text{]}$	+ 29,79*	+ 0,54*

\* Anm: Lineare Berechnung (E-Modul =  $1.100 \text{ N/mm}^2$ ) über die Fließgrenze hinaus. Die tatsächlichen Spannungen sind geringer.

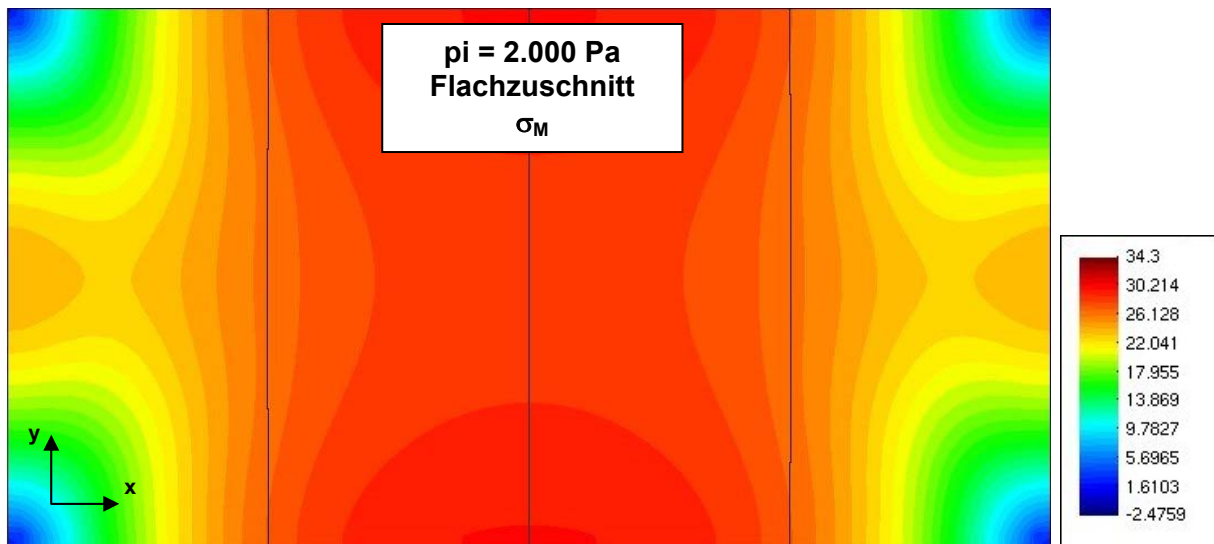


Abb. 4.113 Vergleichsspannungen nach VON MISES  $\sigma_M \text{ [N/mm}^2\text{]}$ , Berstversuch 2003, Flachzuschnitt (Vergleichsrechnung 3),  $p_i = 2.000 \text{ Pa}$

### Vergleich der Ergebnisse und Interpretation

#### - Stich-Differenzen zwischen Messung und Berechnung

Die aus den Biaxialversuchen gewonnenen Werkstoffparameter

( $E_{11} = E_{22} = E_{33} = \text{const.} = 1.100 \text{ N/mm}^2$ ;  $\nu = \text{const.} = 0,45$  für  $T \cong +2^\circ\text{C}$  und  $\dot{\epsilon} \cong 10^{-1} \text{ \%}/\text{min}$ )

liefern unter Ansatz HOOKE'schen Werkstoffverhaltens eine gute Übereinstimmung der gemessenen und der berechneten Stiche in Feldmitte bis zu einem Pneuinnendruck von  $p_i = 2.000 \text{ Pa}$  (Proportionalitätsgrenze).

#### - geometrische Differenzen in Längs- und Querrichtung

Aufgrund des rechteckigen Grundrisses sind die Dehnungen, die Radien bzw. Krümmungen, und damit auch die Normalspannungen in Längs- und Querrichtung different. Die Differenzen der Maximalwerte nehmen mit der Belastung leicht ab. Sie betragen bei  $p_i = 400 \text{ Pa}$  für den spannungsoptimierten Zuschnitt etwas über 1 %, bei  $p_i = 2.000 \text{ Pa}$  etwas weniger als 1%. Das Verhältnis der beiden Spannweiten ist mit  $l_x / l_y = 5,8 \text{ m} / 3,0 \text{ m} = 1,93$  noch zu klein, um deutlichere Differenzen zu erzeugen.

Da die Dehnungen und die Radien nicht über die jeweilige Bogenlänge konstant sind, ergeben sich veränderliche Normalspannungen auch über die Bogenlänge. Die Anwendung der Kesselformel unter der Annahme konstanter Kreisradien zur Ermittlung der Membrankräfte wird daher nur zu einer mehr oder minder genauen Näherungslösung führen.

- Differenzen in den drei Vergleichsrechnungen

Vergleicht man die Ergebnisse für die Formfindungsgeometrie (Vergleichsrechnung 1), den spannungsoptimierten Zuschnitt (Vergleichsrechnung 2) und den Flachzuschnitt (Vergleichsrechnung 3), so ergeben sich deutliche Unterschiede in den maximalen Spannungen (s. Tab. 4.12).

Maximalwerte der Spannungen [N/mm <sup>2</sup> ]						
	Vergleichsrechnung 1 Formfindungsgeometrie		Vergleichsrechnung 2 spannungsoptimierter Zuschnitt		Vergleichsrechnung 3 Flachzuschnitt	
	$p_i = 400$	$p_i = 2.000$	$p_i = 400$	$p_i = 2.000$	$p_i = 400$	$p_i = 2.000$
Pneu- innendruck [Pascal]						
Spannung	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\max \sigma_{11}$	3,41	15,81	9,50	15,36	9,37	27,81*
$\max \sigma_{22}$	3,35	16,48	8,37	17,05	11,47	34,30*
$\max \sigma_{21}$	0,76	3,09	1,35	3,97	1,24	3,79*
$\max \sigma_I$	3,41	16,55	9,60	17,05	11,47	34,30*
$\max \sigma_{II}$	2,99	13,65	4,52	15,26	8,11	23,96*
$\max \sigma_M$	3,01	14,36	8,71	15,72	9,95	29,79*

Tab. 4.12 Vergleichsrechnungen 1 bis 3 (CARAT): Maximale Spannungswerte (Extrapolation der Werte an den GAUSS-Punkten zum Rand der Membranelemente), Berstversuch 2003 (\* Die tatsächlichen Spannungen wären bei Ansatz eines nichtlinearen E-Moduls deutlich geringer, jedoch wäre die Fließgrenze hier in jedem Fall rechnerisch überschritten.)

Der Flachzuschnitt führt zu einer völlig anderen PneuLösung. Er erreicht bei Berechnung mit konstantem E-Modul ( $E = 900 \text{ N/mm}^2$ ) für  $p_i = 2.000 \text{ Pa}$  eine maximale Haupt- und Normalspannung von  $34 \text{ N/mm}^2$ . Die tatsächlichen Spannungen wären zwar bei Ansatz einer genaueren nichtlinearen Arbeitslinie geringer, jedoch wäre die Fließgrenze in jedem Fall rechnerisch überschritten.

Für den Flachzuschnitt können nach derzeitigem Kenntnisstand die rechnerischen Nachweise der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit (unter Berücksichtigung von Abminderungsfaktoren und Teilsicherheitsbeiwerten, bei üblichen ETFE-Pneukonstruktionen und Lastniveaus) nur gelingen, wenn sich durch natürliche Belastung oder gezielte Vorbelastung positive Veränderungen der Werkstoffkenngrößen ergäben, die bei der Bemessung berücksichtigt werden könnten. Dies wäre beispielsweise durch eine Erhöhung der Fließ- und der Bruchspannung als Folge einer Verstreckung in den Hauptspannungsrichtungen der Fall, z.B. durch eine definierte Belastung bei erhöhter Temperatur (z.B. in einer Temperierkammer).

Die Differenzen der maximalen Normal- und Schubspannungen zwischen Formfindungsgeometrie und spannungsoptimiertem Zuschnitt sind für  $p_i = 400 Pa$  sehr groß. Sie betragen etwa den Faktor 2 bis 3. Bei  $p_i = 2.000 Pa$  liegt die Differenz der Normalspannungen jedoch unter 1 %, und der Schubspannungen zwischen 20 und 30 %. Die Differenzen der Vergleichsspannung betragen etwa 10%. Für eine Bemessung mit der Fließgrenze als Grenzzustand müsste im vorliegenden Beispiel also die Vergleichsspannung um etwa 10 % erhöht werden, wenn man die Vergleichsspannungen der Formfindungsgeometrie der Bemessung zugrunde legen wollte. Es ist jedoch zu erwarten, dass sich die Spannungsdifferenzen zwischen Formfindungsgeometrie und spannungsoptimiertem Zuschnitt für das Niveau der Bruchspannung auf ein vernachlässigbares Maß reduzieren.

Bei keiner Vergleichsrechnung ergeben sich sehr große Unterschiede zwischen den maximalen Werten der Normalspannungen und denen der Hauptspannungen. Die Maxima der Vergleichsspannungen sind jeweils etwa 10 – 15 % geringer, als die maximalen Normal- und Hauptspannungen. Für den eingesetzten spannungsoptimierten Zuschnitt (Vergleichsrechnung 2) ergibt sich für  $p_i = 2.000 Pa$  eine maximale Vergleichsspannung von  $\max \sigma_M = 15,72 N/mm^2$ . Der Maximalwert tritt jeweils in der Mitte der beiden äußeren Teilflächen auf. In diesem Bereich nehmen die beiden Hauptspannungen etwa den gleichen Wert an:  $\max \sigma_I \cong \max \sigma_{II} \cong 15-16 N/mm^2$ , d.h.  $\max \sigma_I / \max \sigma_{II} \cong 1$ . Bei Ansatz der Fließbedingung nach VON MISES kann dort auch der Fließeintritt erwartet werden.

#### - Spannungsdifferenzen zwischen Teilflächenverbindung und Teilflächen-Mittbereich

Ein weiteres Ergebnis der Vergleichsrechnungen ist die Beobachtung, dass an den Verbindungslinien der Teilflächen, also an den Flächenschweißnähten, die Spannungen z.T. deutlich geringer sind, als in der Mitte der Teilflächen. Nach Untersuchungen von LINHARD, WÜCHNER und BLETZINGER 2005 [109] tritt diese Spannungsverteilung nur bei pneumatisch vorgespannten Systemen auf. Bei mechanisch vorgespannten Systemen sind hingegen geometriebedingt die Spannungen an den Flächenverbindungen höher, als in der Mitte der Teilflächen. Da die Schweißnahtfestigkeit i.d.R. geringer ist, als die Festigkeit der Folie, stellt dies einen günstigen Umstand für die Bemessung von ETFE-Folienpneus dar, da sich hieraus der Tragfähigkeitsnachweis gegen die Bruchspannung ggf. auf die Randschweißnähte fokussieren ließe, wenn sich diese ungleichmäßige Spannungsverteilung in den Teilflächen auch im Fließbereich fortsetzen würde.

Modelliert man zudem im FE-Modell die Schweißnähte mit ihrer tatsächlichen Dicke (nahezu die doppelte Foliendicke), lässt sich das Niveau der Vergleichsspannungen im Bereich der Schweißnähte noch weiter reduzieren.

#### 4.6.4 FE-Vergleichsrechnung mit ANSYS

##### Rechenmodell

In Kapitel 4.6.3 wurde der Berstversuch mit konstantem E-Modul bis zur Proportionalitätsgrenze (bis zum Pneuinnendruck  $p_i = 2.000$  Pascal, s. Abb. 4.75) simuliert, um den Einfluss des Zuschnitts (spannungsoptimierter Zuschnitt und Flachzuschnitt) auf die Spannungen im Gebrauchslastbereich darzustellen. Um die Bruchspannungen zu ermitteln, wurde nun in Kapitel 4.6.4 die Erstbelastung bis zum Berstdruck von 4.800 Pa mit dem FE-Programm ANSYS rechnerisch simuliert. Die für die gemessene Druck-Stich-Linie (s. Abb. 4.75) gesuchte multilineare (trilineare) Arbeitslinie der ETFE-Folie wurde von JAGFELD durch Vergleich mit den Messungen ermittelt und zur Verfügung gestellt (s. Abb. 4.115). Unter Ansatz eines elastisch-plastischen Materialmodells (elastisch-plastisch-plastisch) konnte mit dieser Arbeitslinie eine sehr gute Übereinstimmung der gemessenen und der rechnerischen Druck-Stich-Linie bis zum Bruch (Bersten) erzielt werden. Die Netzparameter der ANSYS-Simulation (s. Abb. 4.114) entsprechen denen der CARAT-Simulation (s. Abb. 4.77). Die Berechnungen erfolgten an einer nahezu identischen Formfindungsgeometrie, die durch das schrittweise Aufbringen einer Druckdifferenz mit anschließender Spannungsfreisetzung gefunden wurde. Zusätzliche Spannungen aus Abweichungen der Zuschnittsgeometrie von der Formfindungsgeometrie wurden hier nicht berücksichtigt, da für die großen plastischen Verformungen im Bruchzustand kein signifikanter Einfluss auf die Bruchspannung zu erwarten ist. Die ANSYS-Berechnung musste mit einem etwas geringeren E-Modul ( $E = 1.000 \text{ N/mm}^2$ ) durchgeführt werden, als die CARAT-Berechnung ( $E = 1.100 \text{ N/mm}^2$ ), um die Druck-Stich-Linie im linear elastischen Bereich nachzufahren. Die angesetzten Modellparameter sind Tab. 4.13 zu entnehmen.

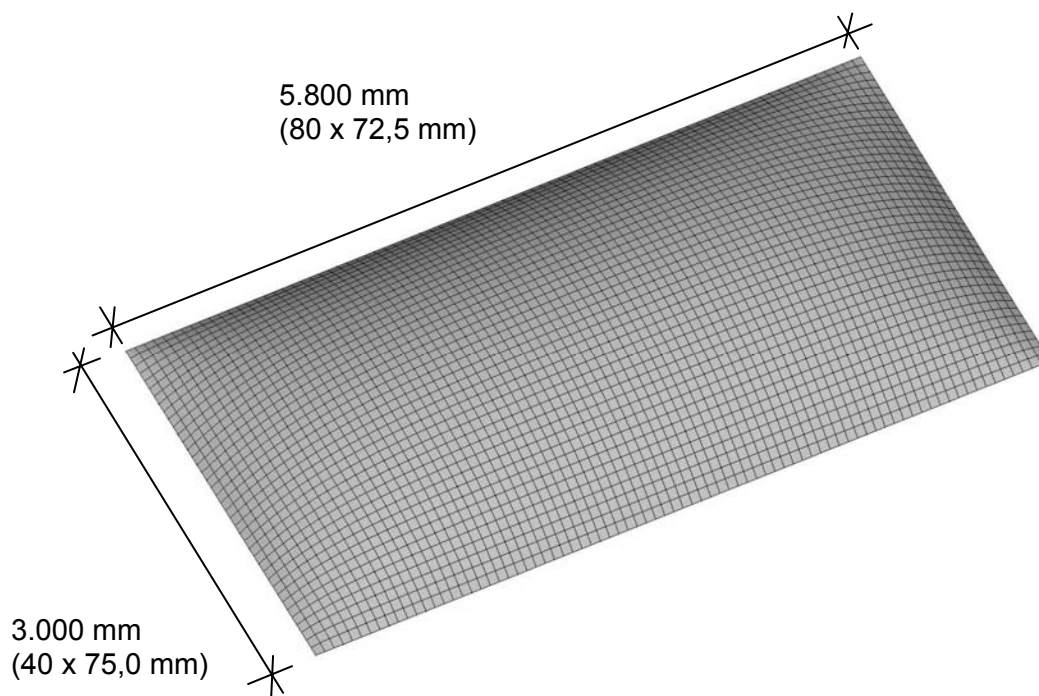


Abb. 4.114 FE-Modellierung des Berstversuches 2003 mit ANSYS: Isometrie der 3D-Fläche als spannungslos idealisierter Zuschnittszustand (Formfindungsgeometrie); Diskretisierung der oberen Folie des Pneus mit  $80 \times 40 = 3.200$  Schalenelementen; JAGFELD



FE-Simulation mit ANSYS - Modellparameter	
FE-Elementart	Schalenelement SHELL 181 (Druckspannungen zulässig; Berücksichtigung Verzerrungen (Dehnungen und Verschiebungen); Berücksichtigung der Dickenänderung)
Anzahl Elemente	80 x 40 = 3.200 (s. Abb. 4.138)
Anzahl Knoten	3.321
Anzahl Freiheitsgrade	22.230
Foliendicke im Ausgangszustand	$d_0 = 250 \mu\text{m}$
Formfindung	Ausgangsgeometrie: ebenes FE-Netzmodell; schrittweise Erhöhung der Druckdifferenz unter Ansatz linearer Elastizität anschließende Spannungsfreisetzung; Annahme: Zuschnittsgeometrie = Formfindungsgeometrie
maximaler Stich in Feldmitte	$\max f_{0,1} = 0,592 \text{ m}$ (Formfindungsgeometrie, ohne Druck)
Materialmodell	multilineare (trilineare) Arbeitslinie (s. Abb. 4.139); elastisch-plastisch-plastisches Materialmodell unter Ansatz isotropen Fließverhaltens (Materialgesetz: MISOPLASTISCH)
E-Modul im linear elastischen Bereich	$E = 1.000 \text{ N / mm}^2$ (konstant in allen Richtungen)
Querkontraktionszahl in allen Bereichen	$\mu = 0,45$ (konstant)

Tab. 4.13 FE-Modellierung des Berstversuches 2003 mit ANSYS: Eingabeparameter, <sup>®</sup>NOWOFLOX ET 6235, d = 250  $\mu\text{m}$ , transparent,  $T = +2^\circ\text{C}$ ; JAGFELD und MORITZ, 2006

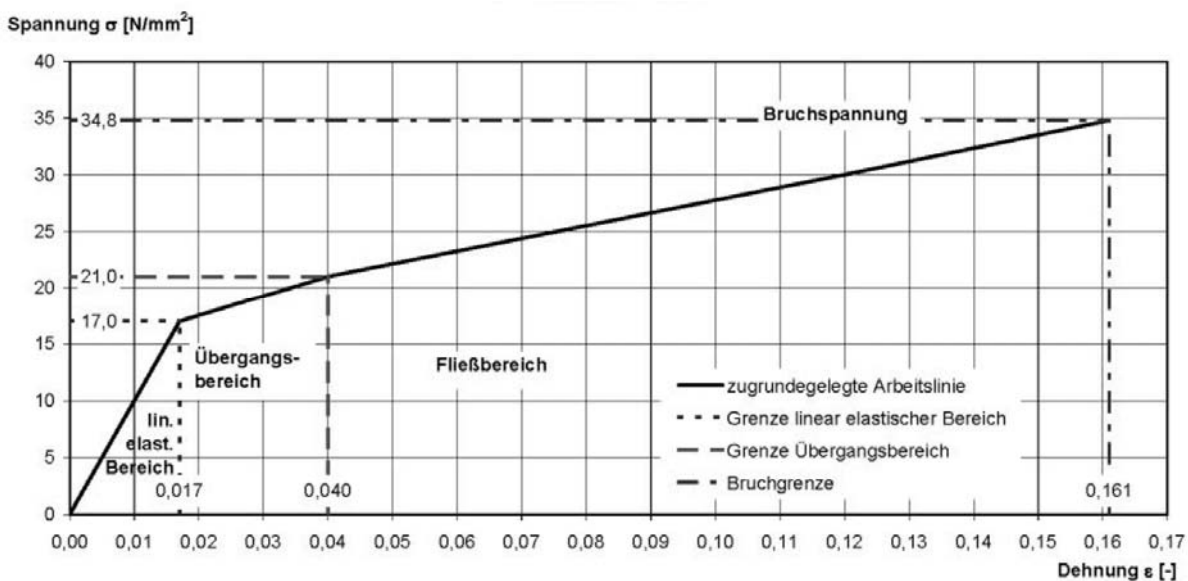
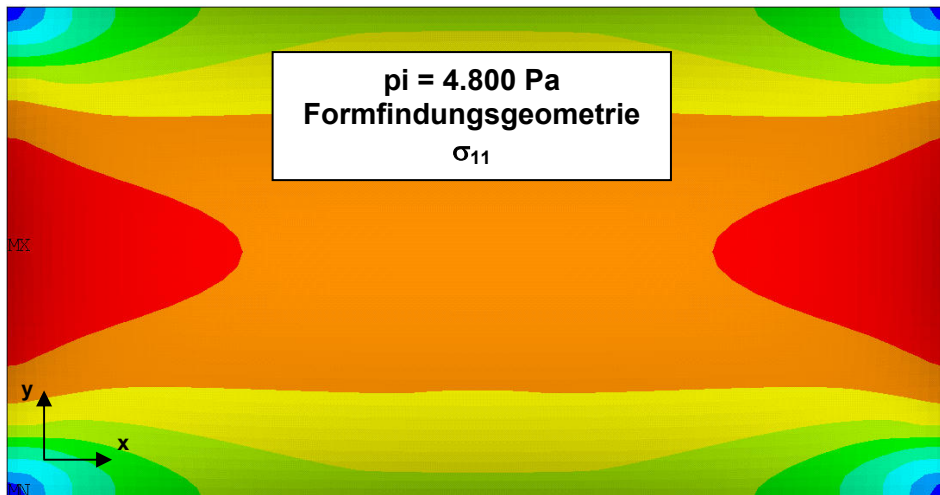


Abb. 4.115 Trilineare (elastisch-plastisch-plastische) Arbeitslinie (Spannungs-Dehnungs-Linie); ANSYS-Simulation des Berstversuches 2003, <sup>®</sup>NOWOFLOX ET 6235, d = 250  $\mu\text{m}$ , transparent;  $T = +2^\circ\text{C}$ ; JAGFELD und MORITZ, 2006

**Ergebnisse**

Abb. 4.116 zeigt die Normalspannungen für  $p_i = 4.800 \text{ Pa}$  : a)  $\sigma_{11} = \sigma_x$  und b)  $\sigma_{22} = \sigma_y$ . Das Spannungsverhältnis an der Stelle maximaler Normalspannungen entspricht der Querkontraktionszahl  $\mu = 0,45$ .

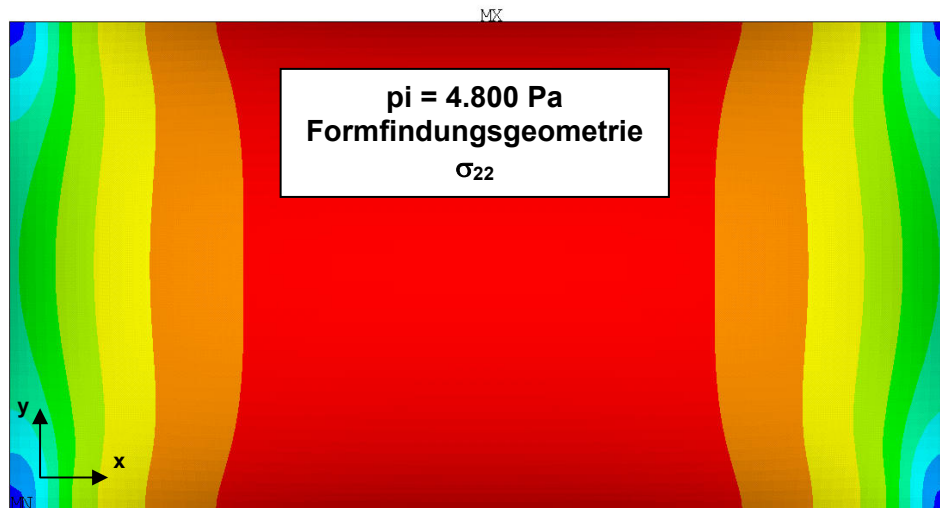
Spannung	Maximum	Minimum
$\sigma_{11} \text{ [N/mm}^2\text{]}$	+ 28,14	- 1,73
$\sigma_{22} \text{ [N/mm}^2\text{]}$	+ 34,79	- 1,75



```

ANSYS 10.0A1
OCT 17 2006
15:05:38
PLOT NO. 3
NODAL SOLUTION
STEP=4
SUB =10
TIME=.480E-03
SX (AVG)
TOP
RSYS=SOLU
DMX =.308371
SMN =-1.728
SMX =28.142
-1.728
1.591
4.91
8.228
11.547
14.866
18.185
21.504
24.823
28.142
    
```

a)



```

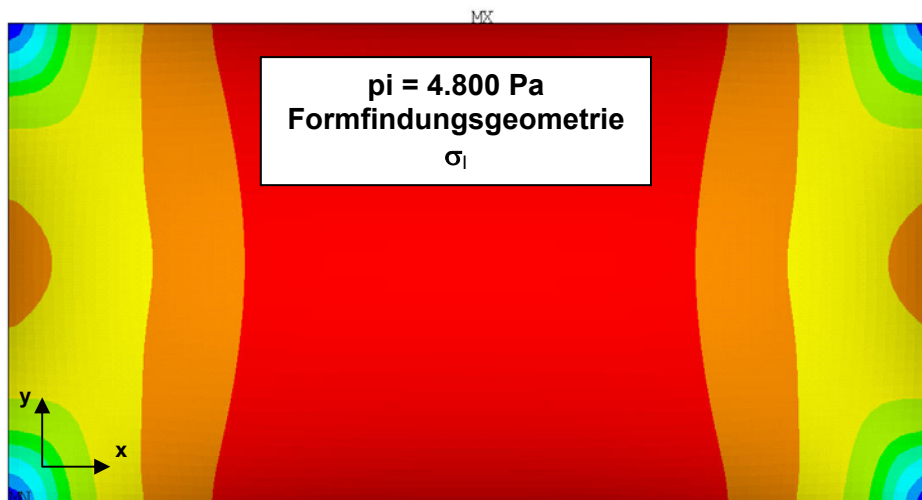
ANSYS 10.0A1
OCT 17 2006
15:05:31
PLOT NO. 2
NODAL SOLUTION
STEP=4
SUB =10
TIME=.480E-03
SY (AVG)
TOP
RSYS=SOLU
DMX =.308371
SMN =-1.752
SMX =34.787
-1.752
2.308
6.368
10.428
14.488
18.548
22.608
26.667
30.727
34.787
    
```

b)

Abb. 4.116 Normalspannungen: a)  $\sigma_{11} = \sigma_x$  und b)  $\sigma_{22} = \sigma_y$  [N/mm<sup>2</sup>], Berstversuch 2003,  $p_i = 4.800 \text{ Pa}$

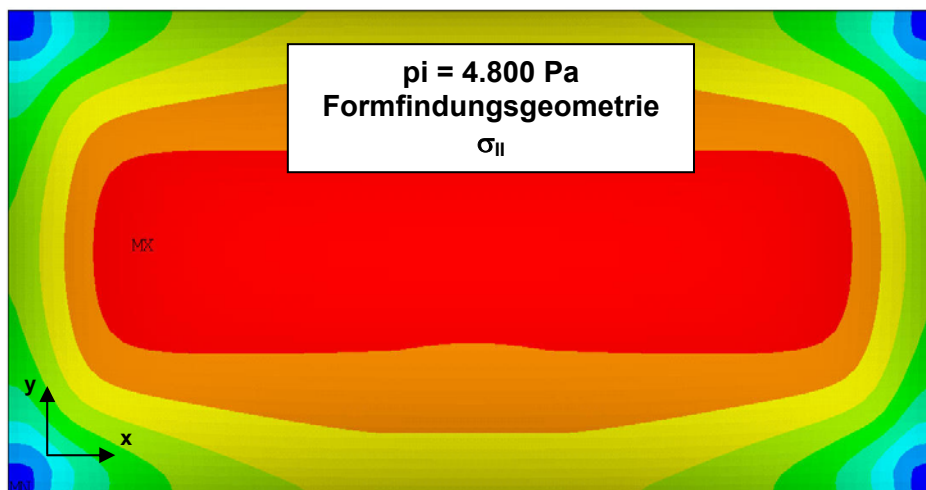
Abb. 4.117 zeigt die Hauptspannungen für  $p_i = 4.800 \text{ Pa}$  : a)  $\sigma_I$  und b)  $\sigma_{II}$ . Das Spannungsverhältnis an der Stelle maximaler Hauptspannungen entspricht der Querkontraktionszahl  $\mu = 0,45$ .

Spannung	Maximum	Minimum
$\sigma_I$ [N/mm <sup>2</sup> ]	+ 34,79	- 0
$\sigma_{II}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	+ 25,73	- 1,01



ANSYS 10.0A1  
 OCT 17 2006  
 15:06:24  
 PLOT NO. 5  
 NODAL SOLUTION  
 STEP=4  
 SUB =10  
 TIME=.480E-03  
 S1 (AVG)  
 TOP  
 DMX =.308371  
 SMX =34.787  
 0  
 3.865  
 7.731  
 11.596  
 15.461  
 19.326  
 23.192  
 27.057  
 30.922  
 34.787

a)



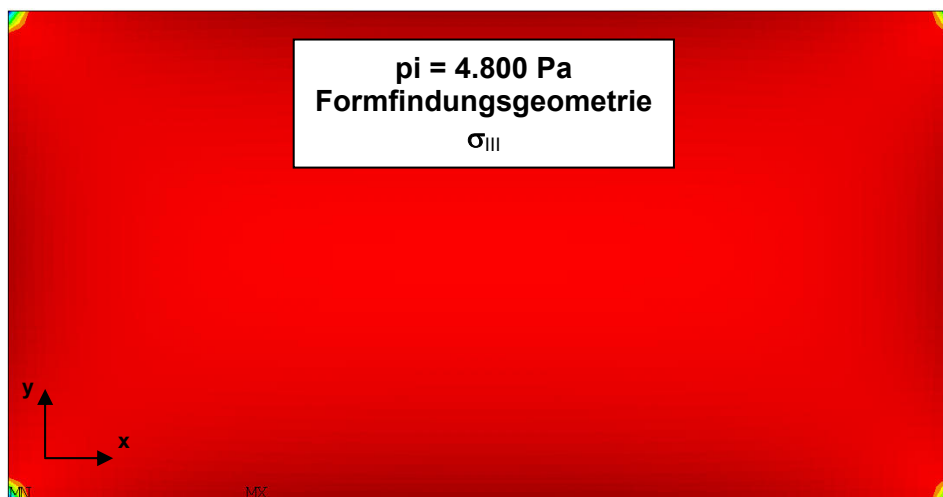
ANSYS 10.0A1  
 OCT 17 2006  
 15:06:30  
 PLOT NO. 6  
 NODAL SOLUTION  
 STEP=4  
 SUB =10  
 TIME=.480E-03  
 S2 (AVG)  
 TOP  
 DMX =.308371  
 SMN =-1.014  
 SMX =25.73  
 -1.014  
 1.957  
 4.929  
 7.9  
 10.872  
 13.843  
 16.815  
 19.786  
 22.758  
 25.73

b)

Abb. 4.117 Hauptspannungen: a)  $\sigma_I$  und b)  $\sigma_{II}$  [N/mm<sup>2</sup>], Berstversuch 2003,  $p_i = 4.800 \text{ Pa}$

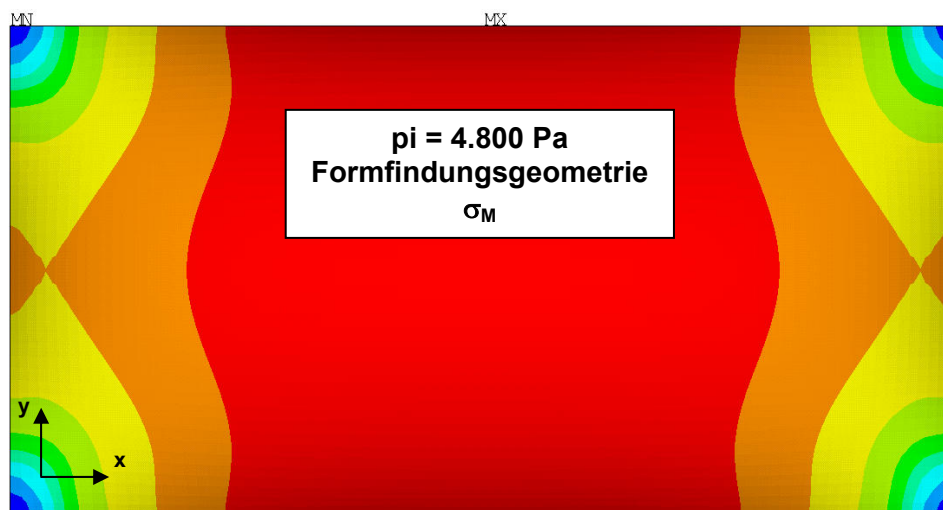
Abb. 4.118 zeigt für  $p_i = 4.800 \text{ Pa}$  : a) die Hauptspannungen  $\sigma_{III} = \sigma_z$  und b) die Vergleichsspannungen  $\sigma_M$  nach VON MISES.

Spannung	Maximum	Minimum
$\sigma_{III} \text{ [N/mm}^2\text{]}$	+ 0	- 2,47
$\sigma_M \text{ [N/mm}^2\text{]}$	+ 30,13	- 2,15



ANSYS 10.0A1  
 OCT 17 2006  
 15:06:38  
 PLOT NO. 7  
 NODAL SOLUTION  
 STEP=4  
 SUB =10  
 TIME=.480E-03  
 S3 (AVG)  
 TOP  
 RSYS=SOLU  
 DMX =.308371  
 SMN =-2.466  
 -2.466  
 -2.192  
 -1.918  
 -1.644  
 -1.37  
 -1.096  
 -.822059  
 -.548039  
 -.27402  
 0

a)



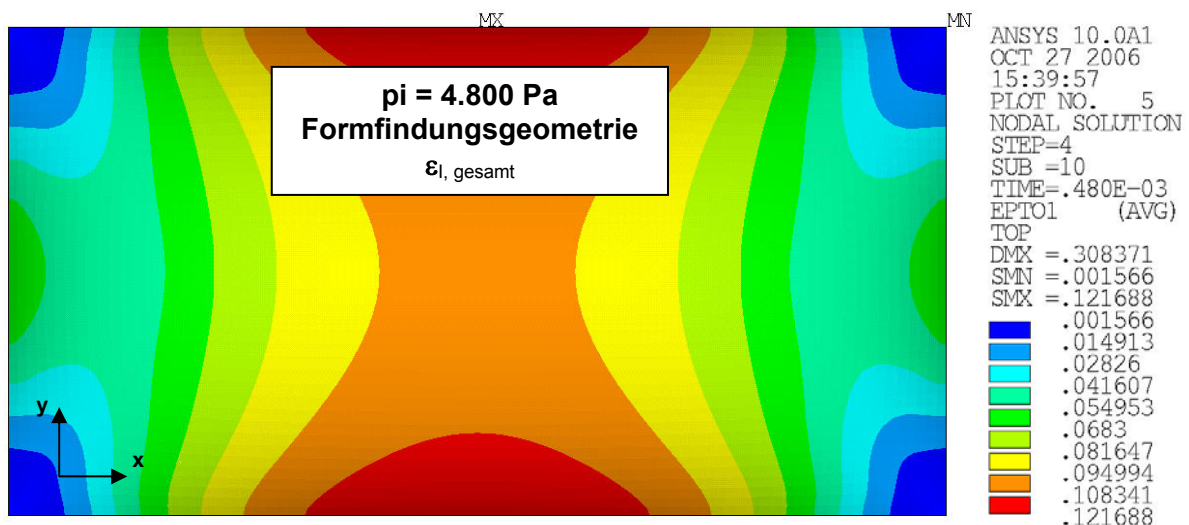
ANSYS 10.0A1  
 OCT 17 2006  
 15:11:28  
 PLOT NO. 12  
 NODAL SOLUTION  
 STEP=4  
 SUB =10  
 TIME=.480E-03  
 SEQV (AVG)  
 TOP  
 DMX =.308371  
 SMN =2.147  
 SMX =30.127  
 2.147  
 5.255  
 8.364  
 11.473  
 14.582  
 17.691  
 20.8  
 23.909  
 27.018  
 30.127

b)

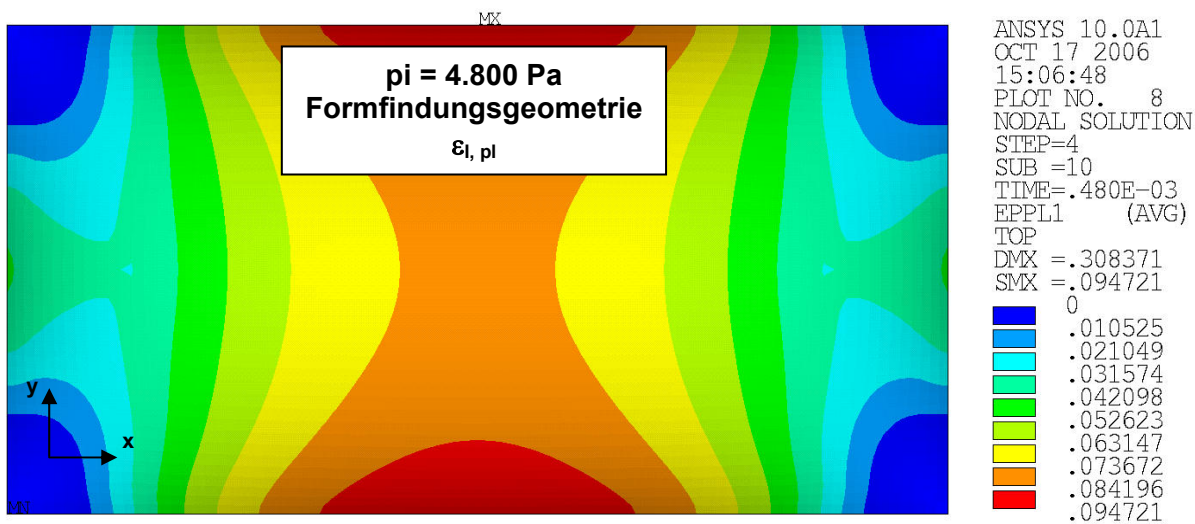
Abb. 4.118 a) Hauptspannungen:  $\sigma_{III} = \sigma_z$  und b) Vergleichsspannungen nach VON MISES  $\sigma_M$  [N/mm<sup>2</sup>], Berstversuch 2003,  $p_i = 4.800 \text{ Pa}$

Abb. 4.119 zeigt für  $p_i = 4.800 \text{ Pa}$  : a) die Hauptdehnungen  $\varepsilon_{I,gesamt}$  und b) den plastischen Dehnungsanteil  $\varepsilon_{I,pl}$ .

Dehnung	Maximum	Minimum
$\varepsilon_{I,gesamt} [-]$	+ 0,122	+ 0,002
$\varepsilon_{I,pl} [-]$	+ 0,095	+ 0,000



a)

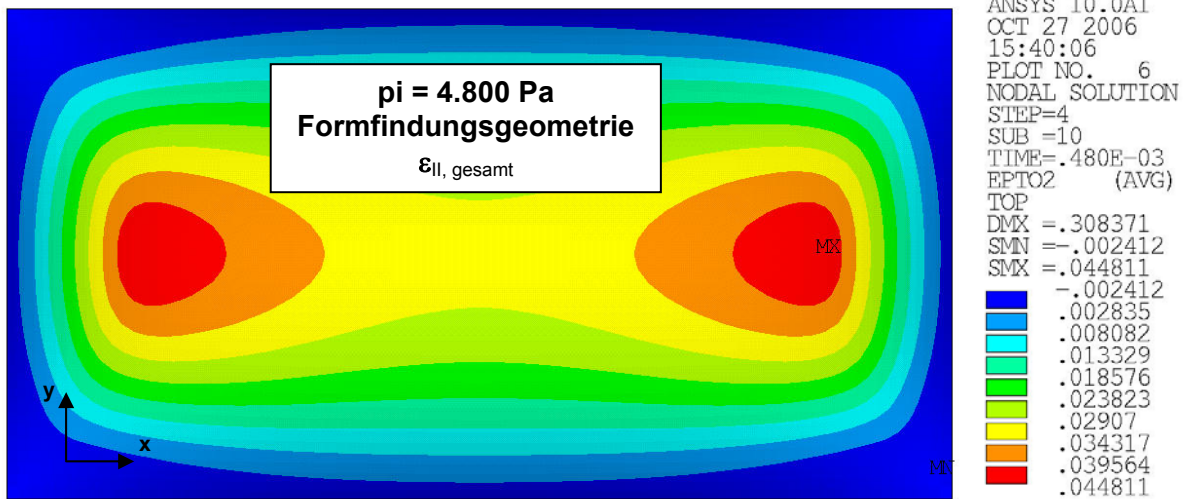


b)

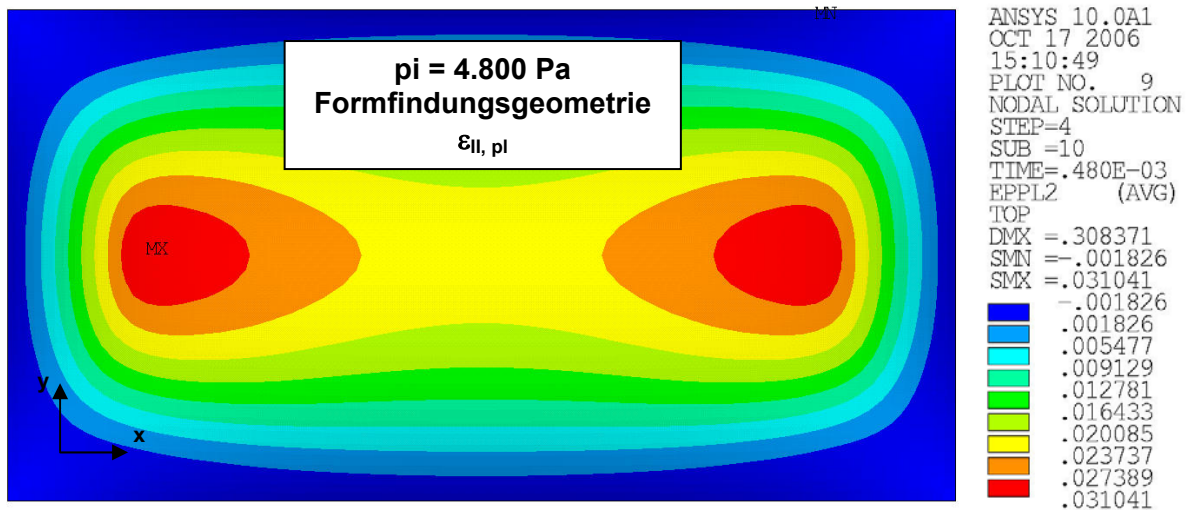
Abb. 4.119 Hauptdehnungen: a)  $\varepsilon_{I,gesamt}$  und b)  $\varepsilon_{I,pl} [-]$ , Berstversuch 2003,  $p_i = 4.800 \text{ Pa}$

Abb. 4.120 zeigt für  $p_i = 4.800 \text{ Pa}$  : a) die Hauptdehnungen  $\varepsilon_{II,gesamt}$  und b) den plastischen Dehnungsanteil  $\varepsilon_{II,pl}$ .

Dehnung	Maximum	Minimum
$\varepsilon_{II,gesamt} [-]$	+ 0,045	- 0,002
$\varepsilon_{II,pl} [-]$	+ 0,031	- 0,002



a)

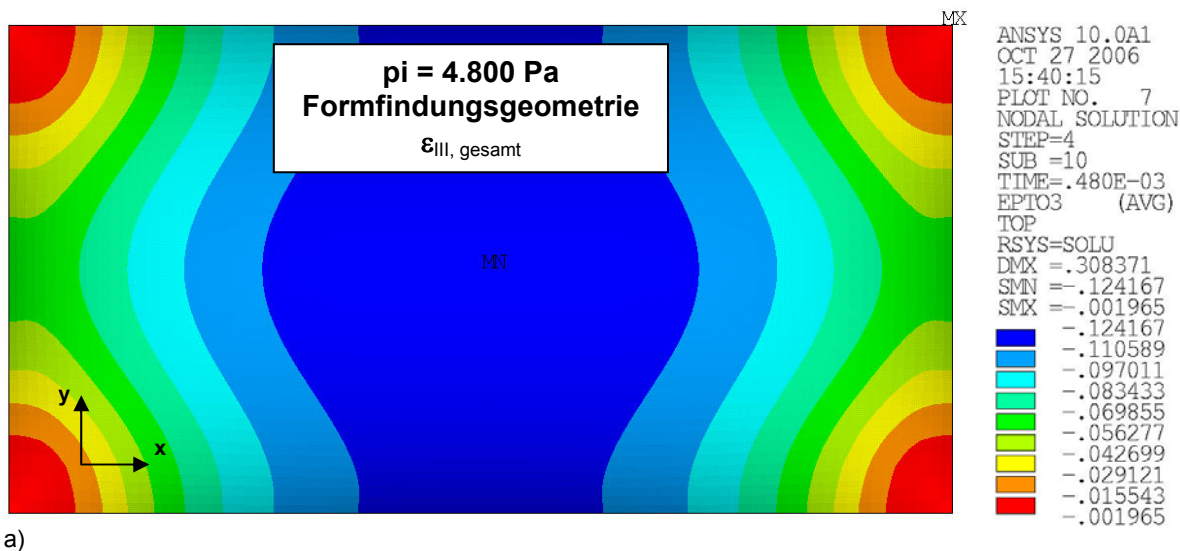


b)

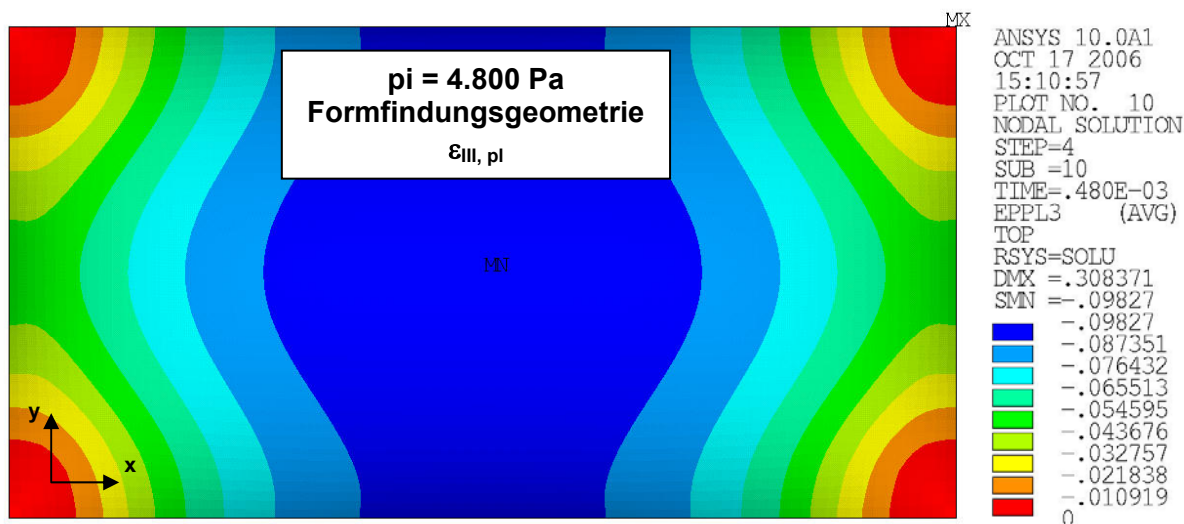
Abb. 4.120 Hauptdehnungen: a)  $\varepsilon_{II,gesamt}$  und b)  $\varepsilon_{II,pl} [-]$ , Berstversuch 2003,  $p_i = 4.800 \text{ Pa}$

Abb. 4.121 zeigt für  $p_i = 4.800 \text{ Pa}$  : a) die Hauptdehnungen  $\varepsilon_{III,gesamt} = \varepsilon_{z,gesamt}$  und b) den plastischen Dehnungsanteil  $\varepsilon_{III,pl} = \varepsilon_{z,pl}$ .

Dehnung	Maximum	Minimum
$\varepsilon_{III,gesamt} [-]$	- 0,002	- 0,124
$\varepsilon_{III,pl} [-]$	- 0,000	- 0,098



a)



b)

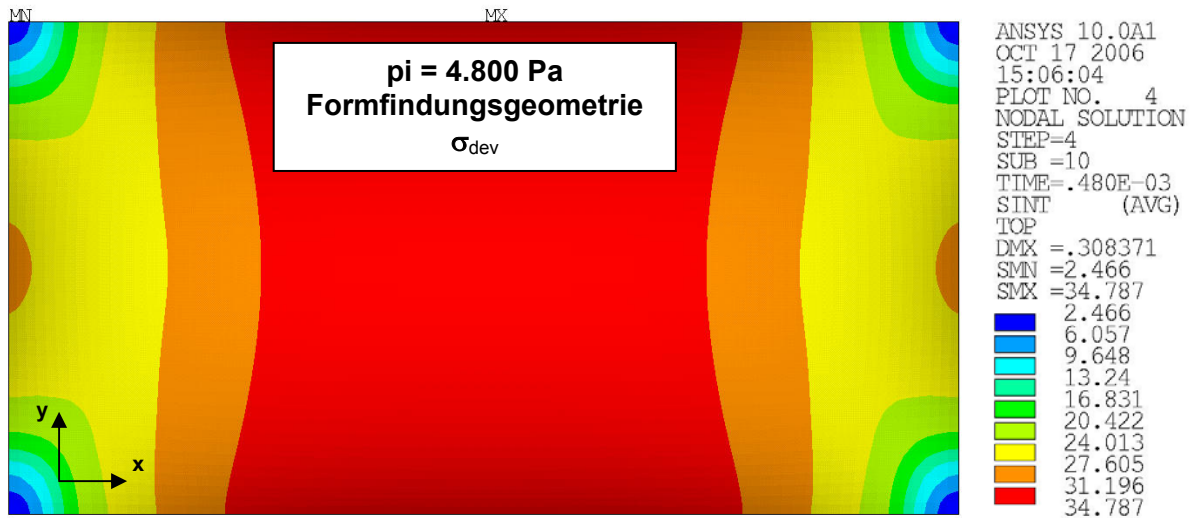
Abb. 4.121 Hauptdehnungen: a)  $\varepsilon_{III,gesamt} = \varepsilon_{z,gesamt}$  und b)  $\varepsilon_{III,pl} = \varepsilon_{z,pl} [-]$ , Berstversuch 2003,  $p_i = 4.800 \text{ Pa}$

Abb. 4.122 zeigt für  $p_i = 4.800 \text{ Pa}$  : a) das Maximum der drei Hauptspannungsdifferenzen (deviatorischer Teil  $\sigma_{dev}$  des Hauptspannungstensors)

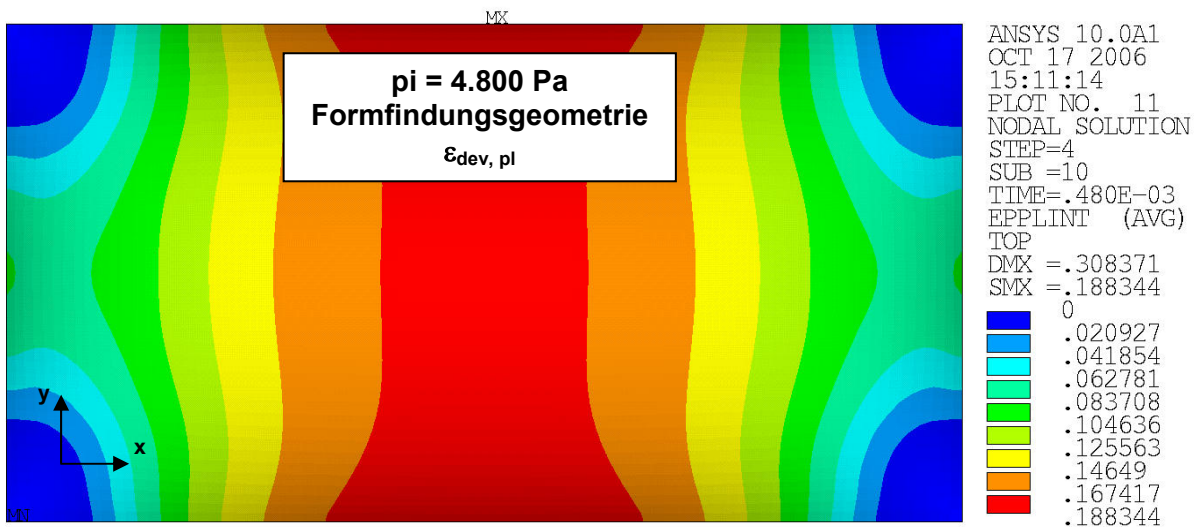
$\sigma_{dev} = \max(|\sigma_I - \sigma_{II}|; |\sigma_{II} - \sigma_{III}|; |\sigma_{III} - \sigma_I|)$ . Es ist ein Maß für die Hauptschubspannungen (Ein hydrostatischer Spannungszustand würde nur Volumenänderung und keine Formänderung bewirken ( $\sigma_I = \sigma_{II} = \sigma_{III} \Rightarrow \sigma_{dev} = 0$ )).

Spannung / Dehnung	Maximum	Minimum
$\sigma_{dev} \text{ [N/mm}^2\text{]}$	+ 34,79	+ 2,47
$\varepsilon_{dev,pl} \text{ [-]}$	+ 0,188	+ 0,00

Abb. 4.122 b) zeigt das Maximum der Hauptdehnungsdifferenzen (plastischer Anteil).



a)



b)

Abb. 4.122 a) Maximum der drei Hauptspannungsdifferenzen  $\sigma_{dev} \text{ [N/mm}^2\text{]}$  und b) Maximum der drei Hauptdehnungsdifferenzen (plastischer Anteil)  $\varepsilon_{dev,pl} \text{ [-]}$ , Berstversuch 2003,  $p_i = 4.800 \text{ Pa}$



### Interpretation der Ergebnisse aus den Vergleichsrechnungen mit ANSYS

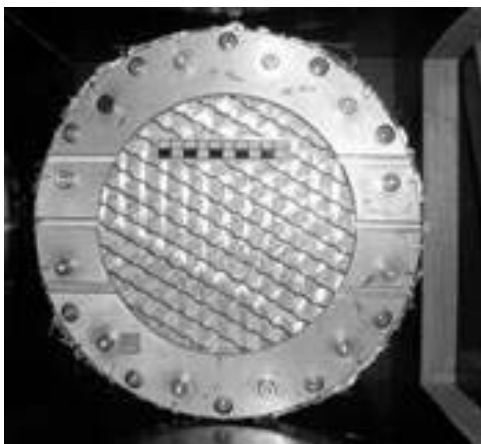
Ziel der FE-Simulation mit ANSYS war die Ermittlung des Ortes und des Wertes der maximalen Spannung (bezogen auf den verformten Querschnitt) beim Bersten.

Sowohl der Berstversuch als auch dessen rechnerische Simulation zeigen, dass das untersuchte Pneu in der Mitte des langen Randes aufreißt. Dort treten die größten Normal- und Hauptspannungen auf.

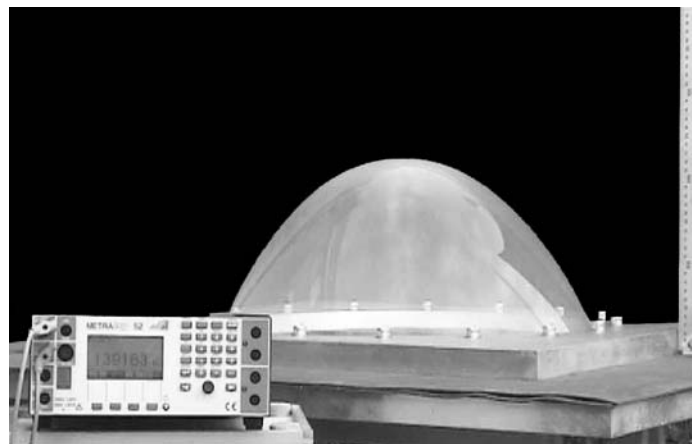
Die bei  $T = +2^{\circ}\text{C}$  und  $\dot{\epsilon}_{MW} \leq 0,13\% / \text{min}$  für den Berstversuch ermittelte Bruchspannung ( $\max \sigma_{22} = \max \sigma_I = 34,79 [N / \text{mm}^2]$ ) liegt im Bereich der im Labor bei  $T = +23^{\circ}\text{C}$  und  $\dot{\epsilon} \cong 200\% / \text{min}$  ermittelten monoaxialen Bruchspannung der Folienschweißnaht (s. Abb. 4.15  $\max \sigma = \max \sigma_I = 36,3 [N / \text{mm}^2]$ ). Es sei angemerkt, dass beide Werte nicht direkt vergleichbar sind, da die Schweißnähte von unterschiedlichen Herstellern angefertigt wurden, die Parameter Dehngeschwindigkeit und Temperatur in beiden Fällen unterschiedlich sind und ggf. die Luftfeuchtigkeit ebenfalls differiert. Zudem verhält sich das Material im Fließbereich nicht mehr isotrop, so dass die Berechnungen nur eine erste Näherung darstellen. Daher kann die Gültigkeit einer Bruchhypothese hieraus nicht abgeleitet werden.

#### 4.6.5 Berstversuche an kleinmaßstäblichen Modellen (Laborversuche)

Berstversuche an kleinen - i.d.R. kreisrunden - Modellen werden seit langem mit unterschiedlichen Zielen durchgeführt. Sie dienen beispielsweise der Ermittlung der Belastbarkeit von Proben bei dynamischen Druckstößen, der Messung der Gasdurchlässigkeit oder auch der Messung des Spannungs-Verformungsverhaltens unter definierten Belastungen (s. Abb. 4.123). Aufgrund ihrer geringen Größe kommen die Proben hier ohne Schweißnähte aus, was im Gegensatz zu den 1:1-Modellen die Untersuchung des Bruchzustandes am Folienmaterial erlaubt. Die Berstversuche an Maßstabsmodellen sind ebenfalls nicht genormt.



a)



b)

Abb. 4.123 Berstversuche an kreisrunden Maßstabsmodellen: a) Fraunhofer Institut für Kurzzeitmechanik - Ernst-Mach-Institut (EMI), Freiburg [63]; b) Labor BLUM, Stuttgart [18], 2004

Von BARTHEL und SCHIEMANN wurde am Lehrstuhl für Tragwerksplanung der TU München ein Versuchsstand entwickelt, mit dem das Spannungs-Verformungsverhalten von ETFE-Folien bis zum Versagen untersucht werden kann. Die kreisförmigen Folienproben werden hier mit einem Aluminiumring (Innendurchmesser 530 mm) auf einer Bodenplatte eingespannt und einer definierten Druckdifferenz ausgesetzt. Neben den Parametern Zeit, Temperatur und Belastung können die Deformationen bis zum Bruchzustand gemessen werden (s. Abb. 4.124). Die Dehngeschwindigkeiten sind mit derartigen Berstversuchen nicht konstant zu halten. Weitere Versuchsanordnungen zur Messung des mechanischen Verhaltens unter mehrachsigen Spannungszuständen sind in Abb. 4.125 dargestellt.

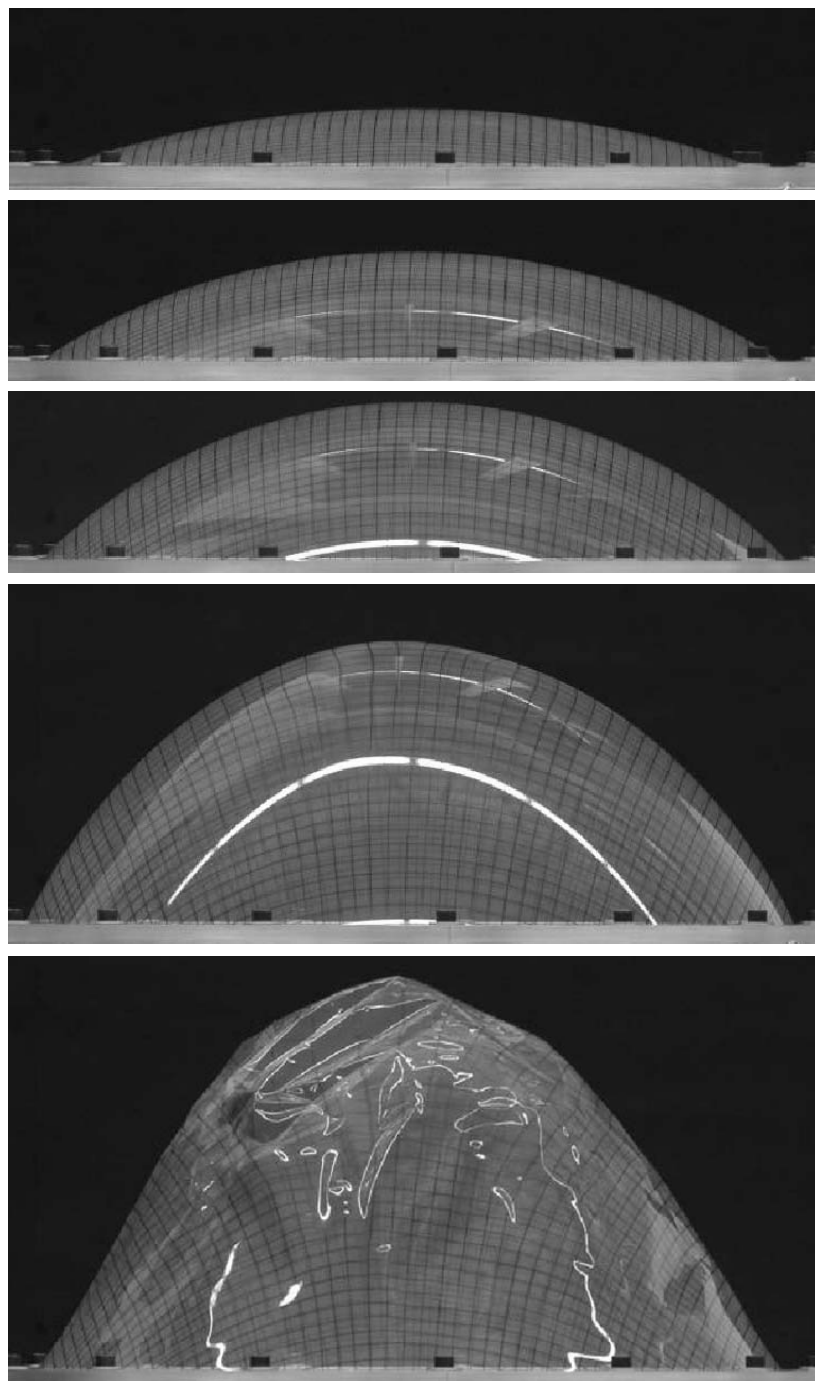


Abb. 4.124

Berstversuch an kreisrunden Labormodellen ( $\varnothing = 530 \text{ mm}$ ),  
(letztes Bild nach dem Bersten)  
BARTHEL und SCHIEMANN,  
TU München, Lehrstuhl für  
Tragwerksplanung 2006

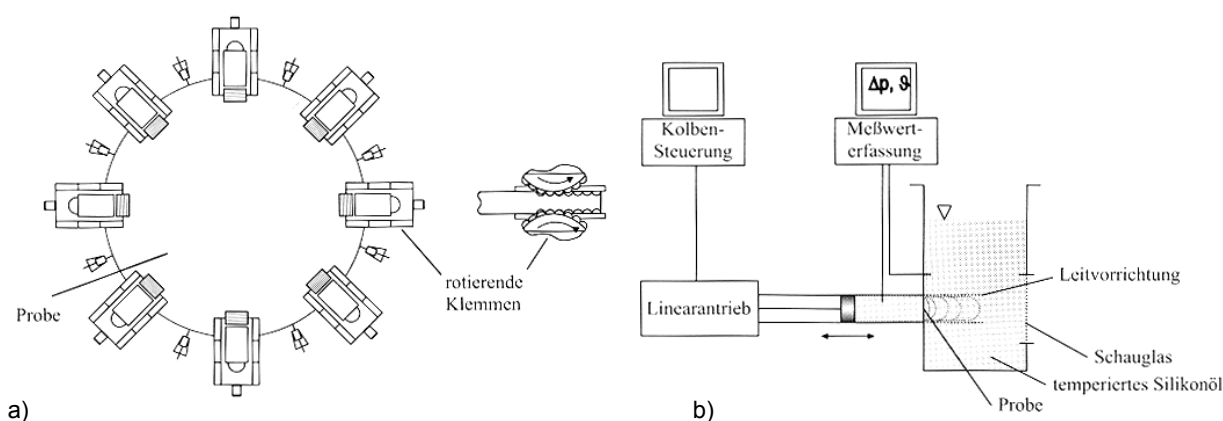


Abb. 4.125 Weitere Versuche zur Bestimmung des mechanischen Verhaltens unter mehrachsigen Spannungszuständen: a) Dehnrheometer nach MEISSNER [111], b) Membrane-Inflation-Rheometer nach HARTWIG [111] (siehe auch Abb. 2.27 (biaxiale Messeinrichtung zur Prüfung von Mantelproben (auch Schlauch- oder Zylinderproben genannt) MINTE 1981 [122])

## 4.7 Prüfung des Weiterreißwiderstandes

### 4.7.1 Weiterreißversuche nach DIN 53363 (an trapezförmigen Proben mit Einschnitt)

Das Prüfverfahren nach DIN 53363:2003-10: Prüfung von Kunststofffolien - Weiterreißversuch an trapezförmigen Proben mit Einschnitt [N8] liefert ein Maß für den Widerstand eines Folienwerkstoffes, den er unter festgelegten Bedingungen bei einer definierten Vorbeanspruchung dem Weiterreißen entgegensetzt. Dieser Versuch lässt nur relative Vergleiche zwischen verschiedenen Werkstoffen zu und hat keinen direkten Bezug zur Bemessung. Entsprechend den Angaben der Norm erlaubt das Prüfverfahren, Proben verschiedener Erzeugnisse miteinander zu vergleichen, sofern sich die Probendicken nicht mehr als 10 % unterscheiden. Das Verfahren ist anwendbar auf Erzeugnisse, die aufgrund ihrer Weichheit beim Einspannen in die Zugprüfmaschine zwischen den Einspannklemmen nicht brechen.

Um das Verhalten des Werkstoffes in Bezug auf sein Weiterreißen beurteilen zu können, wird der normgerechte Probekörper mit einem definierten Einschnitt entsprechend Abb. 4.126 (a) versehen und unter Normklima nach DIN EN ISO 291 (23°C und 50 % rel. Luftfeuchte) durchgeführt. Entsprechend DIN 53 363 kann die Prüfung bei weiteren Temperaturstufen in manchen Fällen zweckmäßig sein.

Die Trapezförmige Probe wird an den zunächst noch im Winkel von  $2 \times 15^\circ$  zueinander stehenden Marken in die parallel zueinander stehenden Einspannklemmen der Zugmaschine eingespannt (s. Abb. 4.126 b) und die Belastung gesteigert. Die Belastungs- bzw. Dehngeschwindigkeit wird nicht definiert.

Als Ergebnis der Prüfung ergibt sich der Weiterreißwiderstand wie folgt:

$$\text{Weiterreißwiderstand} = \frac{F_{\max}}{d} \left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}} \right] \quad (4.19)$$

Mit  $F_{\max}$  = gemessene Höchstkraft in jeder Entnahmerichtung [N]

$d$  = Probekörperdicke [mm]

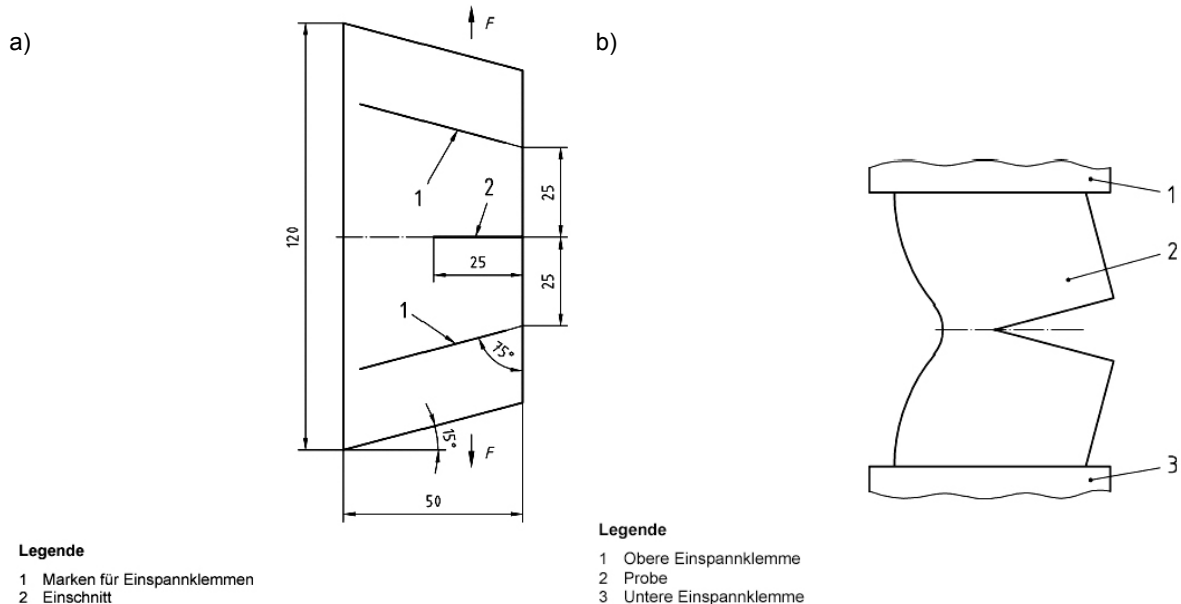


Abb. 4.126 Weiterreißversuch an trapezförmigen Proben mit Einschnitt nach DIN 53 363: a) Probe zur Bestimmung des Weiterreißwiderstandes, b) belastete Probe DIN 53 363 [N8]

#### 4.7.2 Weiterreißversuche nach DIN 53 515 (mit der Winkelprobe nach Graves mit Einschnitt)

Neben dem Verfahren nach DIN 53 363 an trapezförmigen Proben existieren weitere Prüfmethode für Kunststofffolien, u.a. das Verfahren nach DIN 53 515:1990-01 - Weiterreißversuch mit der Winkelprobe nach Graves mit Einschnitt (s. Abb. 4.127) [N10].

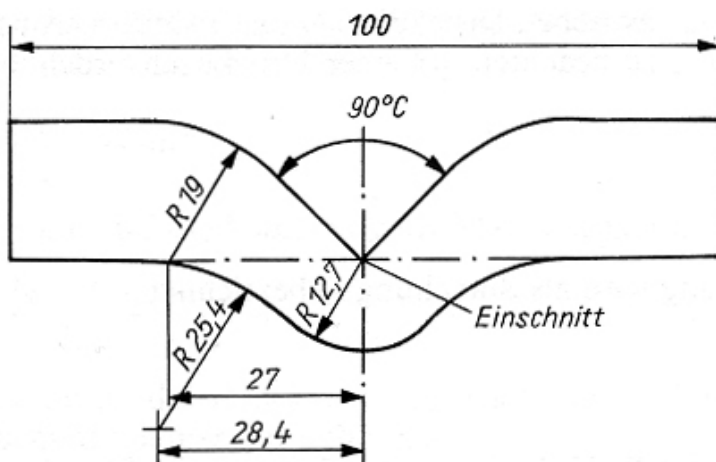


Abb. 4.127 Weiterreißversuch mit der Winkelprobe nach Graves mit Einschnitt nach DIN 53 515- Probekörper [N10]

Im Anhang der DIN 53 363 wird erläutert, weshalb das Verfahren an trapezförmigen Proben mit Einschnitt gegenüber der Winkelprobe nach Graves mit Einschnitt (DIN 53 515) zu bevorzugen ist: *“Die Schaffung des Prüfverfahrens nach dieser Norm (DIN 53 363) war erforderlich geworden, da viele Kunststoff-Folien bei der Prüfung nach DIN 53 515 zunächst eine hohe Festigkeit zeigen, bedingt dadurch, dass der Bogen bei der Graves-Probe in die Hauptspannungslinien beim Auseinanderfahren der Klemmen gezogen wird. Hierbei verlaufen die Spannungslinien hinter dem Einschnitt. Erst nach Auftreten einer entsprechend großen Kraft erfolgt das eigentliche Weiterreißen, wobei sich die Kraft auf einen Bruchteil verringert. Bei Verwendung der neuen trapezförmigen Probe verschwindet die große Kraft, die zwar einen hohen Festigkeitswert darstellt, aber nicht das wirkliche Verhalten der Kunststoff-Folie charakterisiert, besonders bei harten Folien.“*

DIN ISO 34 – Teil 1: 07/2004 - Bestimmung des Weiterreißwiderstandes - Teil 1: Streifen-, winkel-, und bogenförmige Probekörper liefert weitere Vergleichsmöglichkeiten und Anwendungshilfen.

Abb. 4.128 zeigt die Weiterreißfestigkeit verschiedener Fluorpolymerfolien, aufgetragen über die Temperatur (Herstellerangaben <sup>®</sup>HOECHST für <sup>®</sup>HOSTAFLON ET 6235 (in Zahlenwerten): -30°C: 567, 0°C: 468, +23°C: 440 und +80°C: 318 N/m).

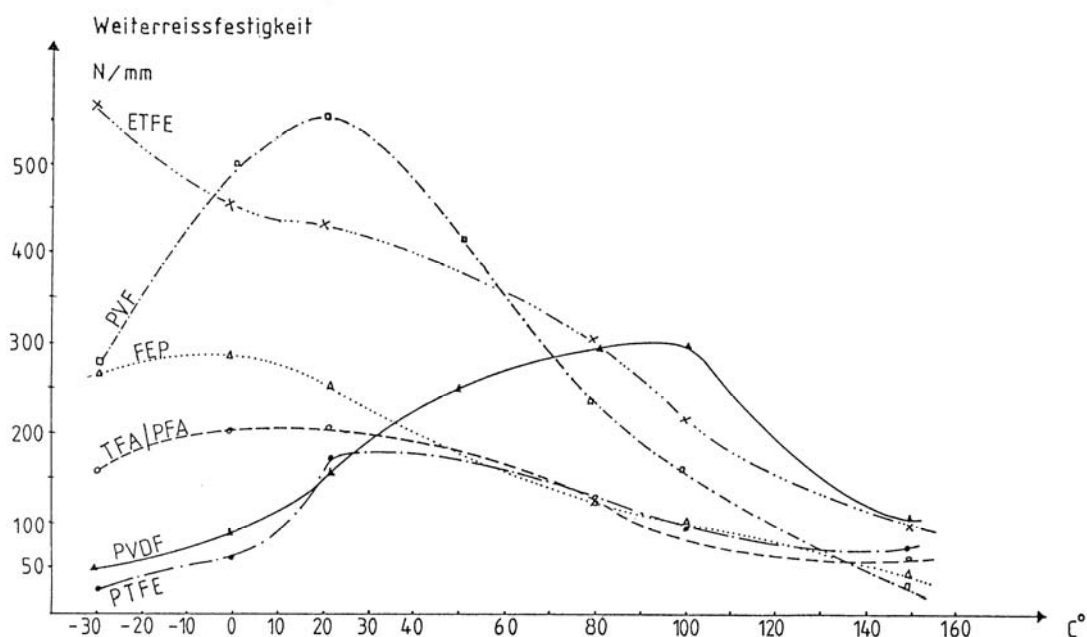


Abb. 4.128 Weiterreißfestigkeit [N/mm] nach DIN 53 363: 1969-05, in Abhängigkeit von der Temperatur [°C] für verschiedene Fluorpolymerfolien, <sup>®</sup>HOSTAFLON ET 6235; Herstellerangaben <sup>®</sup>HOECHST 1983 [79]

Die ETFE-Folie (<sup>®</sup>HOSTAFLON ET 6235) zeigt demnach im baupraktisch relevanten Temperaturbereich eine vergleichsweise hohe Weiterreißfestigkeit. Offensichtlich verläuft für ETFE der Graph der Weiterreißfestigkeit ähnlich zum Verlauf der Zugfestigkeit über die Temperatur (vgl. Abb. 2.2). Ein Zusammenhang beider Kennwertfunktionen wäre nach SCHMIEDEL 1992 [174] denkbar. Er nennt den Weiterreißversuch daher auch als Möglichkeit, das Werkstoffverhalten genauer zu beurteilen, wenn Zugversuche keine befriedigenden Ergebnisse liefern. Die Ableitung eines bemessungsrelevanten Kennwertes aus dem Weiterreißversuch ist derzeit aber noch nicht möglich.

#### 4.8 Prüfung der Durchsturzicherheit

Bei Konstruktionen aus ETFE-Folien stellt sich immer wieder die Frage nach ihrer Begehbarkeit und ihrer Durchsturzicherheit. Diese Frage ist nicht für die Nachweise der Tragfähigkeit oder der Gebrauchstauglichkeit relevant, sondern dient allein der Arbeitssicherheit bei Bau-, und Instandhaltungsmaßnahmen (Inspektion, Wartung, Instandsetzung (Reparatur) und Reinigung).

Diesbezüglich relevante Regelungen findet man in DIN 4426 (Einrichtungen zur Instandhaltung baulicher Anlagen – Sicherheitstechnische Anlagen an Arbeitsplätzen und Verkehrswegen – Planung und Ausführung) v. 09/2001, und in den Regelungen des Fachausschusses Bau der Berufsgenossenschaften:

- BGV C22 (04/1993, früher VBG 37): Unfallverhütungsvorschrift Bauarbeiten
- BG-Information (BGI) 526 (früher ZH 1/44): Beurteilung der Begehbarkeit von Bauteilen
- GS-Bau 18 (02/2001): Prüfgrundsätze: Bedingte Betretbarkeit oder Durchsturzicherheit von Bauteilen bei Bau- oder Instandhaltungsarbeiten

In der BGI 526 wird festgelegt, welche Anforderungen Bauteile erfüllen müssen, damit sie bei Bauarbeiten als Arbeitsplatz oder Verkehrsweg (Zugang) benutzt und gefahrlos betreten bzw. begangen werden können. Bauteile, die diese Anforderungen nicht erfüllen (die abrutschen oder beim Begehen brechen können), gelten als "nichtbegehbar" im Sinne von § 11 UVV "Bauarbeiten" (VBG 37) und erfordern besondere Maßnahmen zum Begehen bzw. zur Absicherung.

Begehbar sind ETFE-Folienkonstruktionen aufgrund ihrer glatten und häufig gekrümmten Oberfläche, ihrer großen Verformungsfähigkeit und ihres zuweilen großen Neigungswinkels i.d.R. nicht. Da ihre Begehbarkeit bislang aus keiner Allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung hervorgeht, werden sie - zumindest in Deutschland - als nicht begehbar eingestuft. Wenn eine Konstruktion jedoch die Prüfung nach GS Bau 18 besteht, gilt sie zumindest als "bedingt begehbar". Definitionsgemäß sind dies Bauteile, die nicht zum Begehen geeignet sind, aber die Anforderungen an die Durchsturzicherheit (Prüfung nach GS-Bau 18) erfüllen. ETFE-Folienkonstruktionen werden daher ausschließlich im Zuge einer Baumaßnahme von befähigtem, geschultem und gesichertem Fachpersonal begangen.

Die Prüfung der Durchsturzicherheit stellt eine dynamische Belastungssimulation dar. Sie wird nicht nur auf Überkopfverglasungen angewendet, sondern beispielsweise auch auf Dachziegel, Kunststoffplatten und Lichtkuppeln. In dieser Prüfung wird der Sturz einer Person (z. B. Fehltritt beim Rückwärtslaufen) durch einen definierten Fallkörper aus einer bestimmten Höhe simuliert. Als Fallkörper ist ein etwa kugelförmiger Sack von maximal 40 cm Durchmesser und 60 cm Höhe, gefüllt mit  $50 \pm 0,5$  kg Glaskugeln von jeweils 2 bis 3 mm Durchmesser, zu verwenden (impact test - soft body). Die Fallhöhe muss mindestens 60 cm betragen\*.

---

\* Sie erhöht sich nach BGI 526, wenn Bauteile untersucht werden, deren Festigkeit den im baurechtlichen Brauchbarkeitsnachweis (Übereinstimmung mit einer Norm oder einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung) festgelegten Mindestanforderungen entspricht oder um höchstens 10 % überschreitet. Werden die Mindestanforderungen um mehr als 10 % überschritten, ist die Fallhöhe proportional zur Mindestanforderung zu vergrößern.

Als Auftreffstellen sind diejenigen Stellen des Bauteiles (Prüfkörpers) zu wählen, bei deren dynamischer Beanspruchung die größte Wahrscheinlichkeit eines Versagens besteht. Ein Versuch gilt als bestanden, wenn der Fallkörper – unabhängig von irgendwelchen Anrissen und Verformungen – noch mindestens 1 Minute nach dem Auftreffen gehalten wird.

Auch die europäische Norm DIN EN 1873 "Vorgefertigte Zubehörteile für Dacheindeckungen - Lichtkuppeln aus Kunststoff - Produktfestlegungen und Prüfverfahren" und der Normentwurf E DIN EN 14963 "Vorgefertigte Zubehörteile für Dacheindeckungen - Dachlichtbänder aus Kunststoff - Klassifizierung, Anforderungen und Prüfverfahren" enthalten derartige Prüfkriterien, die hinsichtlich des Lastniveaus z.T. etwas über den Anforderungen der BGI 526 liegen.

Abb. 4.129 zeigt einen Versuch aus dem Jahr 2003, der in Anlehnung an die Prüfgrundsätze der GS – Bau 18 durchgeführt wurde. Der 50 kg schwere Original-Ledersack der Berufsgenossenschaft Bau wurde hier aus 2 m Höhe auf ein 4,0 m x 8,0 m großes Pneu abgeworfen - zunächst bei einem Pneuinnendruck von 400 Pa – anschließend noch einmal ohne Pneuinnendruck.



Abb. 4.129 Prüfung der Durchsturzsisicherheit in Anlehnung an Richtlinie GS Bau 18, 2003 [53]:  
 a) ETFE-Folienpneu 4,0 x 8,0 m, dreilagig,  $d = 200 / 100 / 200 \mu\text{m}$ , <sup>®</sup>NOWOFLON ET 6235 – transparent, Abwurfhöhe  $h_{ist} \cong 2 \text{ m} > h_{soll} = 0,6 \text{ m}$   
 b) mit Glaskugeln gefüllter 50 kg-Testsack (Fallgewicht) nach Richtlinie GS Bau 18  
 c) Auftreffstelle des zweiten Abwurfs (auf luftleeren Pneu),  
 d) Anschließende Belastung der Auftreffstelle ( $g_{ist} \cong 150 \text{ kg} > g_{soll} = 100 \text{ kg}$ )

Im luftgestützten Fall ( $P_i = 400 \text{ Pa}$ ) fiel das Fallgewicht nach mehrmaligem Hüpfen über den Pneurand. Im Fall ohne Pneuinnendruck ( $P_i = P_{\text{atmos}}$ ) blieb es auf der gespannten Mittellage ( $100 \mu\text{m}$ ) liegen, in beiden Fällen ohne ersichtliche Beschädigungen oder plastische Verformungen der Folie oder der umgebenden Klemmprofile. Danach wurde die Auftreffstelle mit zwei Personen belastet (ca.  $150 \text{ kg}$ ), die das System ebenfalls unbeschadet überstand.

Die Ergebnisse veranschaulichen, dass weder ETFE-Folienpneus noch mechanisch vorgespannte ETFE-Folien durch ein Impulsniveau in der o.g. Größenordnung geschädigt werden - vorausgesetzt, sie entsprechen in konstruktiver Hinsicht dem Stand der Technik, d.h., sie sind ordnungsgemäß mit den Klemmprofilen und diese mit der Unterkonstruktion verbunden. Die Gutmütigkeit des Systems liegt zum einen an der geringen geometrischen Steifigkeit des Systems, und zum anderen an der hohen Duktilität der Folie.

## 4.9 Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse

### Monoaxiale Kurzzeitzugversuche

Die in Abb. 4.7 bei  $T = +23^\circ\text{C}$  beispielhaft dargestellten Spannungs-Dehnungs-Linien lassen sich näherungsweise als trilineare Funktion beschreiben. Die beiden Steifigkeitswechsel (Knickpunkte) markieren Strukturveränderungen der Folie. Der erste Knickpunkt wird als Fließgrenze interpretiert. Er ist bei einer Dehngeschwindigkeit von  $200 \text{ \%/min}$  bei etwa  $16 - 17 \text{ N/mm}^2$  zu erwarten. Bis kurz vor diesem Punkt ist das Verhalten der Folie näherungsweise linear elastisch (Proportionalitätsgrenze). Oberhalb des ersten Knickes schließt sich ein zweiter, flacherer, und ebenfalls fast linearer Bereich an, der als viskoelastisch aufgefasst wird, der also überwiegend relaxierende, zeitlich verzögerte reversible Dehnungen aufweist. Bei etwa  $24 - 25 \text{ N/mm}^2$  folgt ein zweiter Knick, an welchen sich ein noch flacherer Anstieg bis zum Bruch anschließt, der als weitgehend viskos, also mit vornehmlich irreversiblen zeitabhängigen Dehnungsanteile behaftet, interpretiert wird.

Die Bruchspannungen und Bruchdehnungen der Folien ( $100$  bis  $250 \mu\text{m}$ ) gehen für  $T = +23^\circ\text{C}$  ( $\dot{\epsilon} \cong 200 \text{ \%/min}$  für  $\epsilon \leq 0,2 [-]$  sowie  $\dot{\epsilon} \cong 1.000 \text{ \%/min}$  für  $\epsilon > 0,2 [-]$ ) aus Abb. 4.18 und Abb. 4.19 hervor. Die Probekörper erreichen je nach Foliendicke im Mittel Zugfestigkeiten von  $50$  bis  $68 \text{ N/mm}^2$ .

Die Bruchspannungen und Bruchdehnungen der Folien mit Schweißnaht liegen deutlich unter den Werten des Folienmaterials ohne Schweißnaht der gleichen Dicke ( $d = 200 \mu\text{m}$ ) (s. Abb. 4.15, 4.18 und 4.19). Die Bruchfestigkeit der mit kraftgesteuertem, kontinuierlichem, Vorschub hergestellten Schweißnähte erreicht hier etwa  $60 \%$  der Festigkeit der Folie, die Bruchdehnung beträgt etwa  $56 \%$ . Es ist kein signifikanter Unterschied zwischen Schweißnähten in Extrusionsrichtung und in Querrichtung festzustellen.

Der Einfluss der Foliendicke auf die Bruchspannung und die Bruchdehnung der Folie geht ebenfalls aus den Abb. 4.18 und 4.19 hervor. Demnach bleibt mit zunehmender Foliendicke die Bruchspannung in Extrusionsrichtung in etwa konstant, während sie in Querrichtung im Mittel um etwa  $12 \%$  pro  $100 \mu\text{m}$  Dickenzuwachs abfällt. Die Bruchdehnung erfährt einen Dehnungszuwachs um etwa  $10 \%$  pro  $100 \mu\text{m}$  Dickenzuwachs in beiden Entnahmerichtungen.



Der in Extrusions- und Querrichtung unterschiedliche Einfluss der Foliendicke auf die mechanischen Kennwerte lässt auf eine Orientierung der Molekülketten während des Extrusionsprozesses schließen. Ideal-isotropes Verhalten kann demnach nicht für alle ETFE-Foliendicken und Kennwerte von vornherein angenommen werden.

Die Variationskoeffizienten der Bruchspannung und der Spannung bei einer Dehnung von 10 % sind in Abb. 4.16 getrennt nach Extrusionsrichtung E und Querrichtung Q aufgetragen. Für die 108 monoaxial geprüften Folienproben ergeben sich maximale Variationskoeffizienten von  $v_{\sigma_B} = 8,49$  für die Bruchspannung und  $v_{\sigma_{\varepsilon=10\%}} = 4,10$  für die Spannung bei 10 % Dehnung.

Der Einfluss der Temperatur auf die monoaxiale Bruchdehnung, Bruchspannung (Zugfestigkeit) und die Spannung bei einer Dehnung von 10 % ist in Abb. 4.14 dargestellt. Im baupraktischen Temperaturbereich steigt die Bruchdehnung nahezu linear mit der Temperatur an, während die Bruchspannung und die Spannung bei 10 % Dehnung linear fallen. Beispielsweise beträgt die monoaxiale Zugfestigkeit bei + 50° C nur noch 80 % der Festigkeit bei + 23° C. Die Folientemperatur hat daher einen Einfluss auf die Nachweisführung im jeweiligen Belastungsfall.

Der Einfluss der Dehngeschwindigkeit auf die Spannung bei 2 % Dehnung und auf den Sekantenmodul (E-Modul) wird aus Abb. 4.10 und Abb. 4.11 ersichtlich. Demnach ist der Einfluss umso kleiner, je größer die Dehngeschwindigkeit  $\dot{\varepsilon}$  ist. Ab etwa  $\dot{\varepsilon} \cong 100$  % pro min wird ihr Einfluss auf beide Parameter unbedeutend. Der E-Modul beträgt ab dieser Dehngeschwindigkeit  $1.000 \text{ N/mm}^2$ . Falls dieser Zusammenhang für die Bemessungskennwerte auch unter mehrachsiger Beanspruchung Gültigkeit hätte, wäre die Angabe von Grenzwerten für die Bemessungskennwerte auch für den Fall von Windböenlasten mit hohen Dehngeschwindigkeiten auf der Basis von Monoaxialversuchen möglich.

Der Einfluss der Probenabmessungen auf den Sekantenmodul und die Spannung bei 2 % Dehnung ist für  $T = +23^\circ\text{C}$  aus Abb. 4.12 und Abb. 4.13 ersichtlich. Die Diagramme zeigen, dass die Probenabmessungen keinen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse haben, sofern deren Änderung keine Dehngeschwindigkeitsänderung mit sich bringt (vgl. Abb. 4.10 und Abb. 4.11). Große Dehnungen (Belastungen oberhalb der Fließgrenze) können hingegen bei einem großen Verhältnis  $b_0 / l_0$  zu ausgeprägten mehrachsigen Spannungszuständen an den Einspannungen führen, mit der Folge frühzeitigen Versagens. Das Verhältnis  $b_0 / l_0$  sollte daher hinreichend klein gewählt werden (normgerechte Probenabmessungen s. DIN EN ISO 527-3, s. [N23]).

Hinweise für die Prüfung und Auswertung: Auch für den Vergleich von Versuchsergebnissen empfiehlt es sich, die Prüfbedingungen und Probengeometrien nach DIN EN ISO 527-1 und DIN EN ISO 527-3 einzuhalten. Versuche mit einer konstanten Dehngeschwindigkeit sind zu empfehlen. Der Bezug auf wahre Spannungen und Dehnungen liefert mit zunehmender Dehnung auch zunehmende Abweichungen im Kurvenverlauf im Vergleich zu den technisch definierten Werten.

Bei hohen Temperaturen und geringen Dehngeschwindigkeiten ist im Kurzzeitzugversuch die Streckgrenze, d.h. eine horizontale Tangente der Spannungs-Dehnungs-Linie, nicht ausgeprägt. In derartigen Fällen kann die graphisch ermittelte 0,2 %-Dehngrenze als Näherungslösung für die Fließgrenze, als idealisiertem Übergang vom elastischen in den plastischen Dehnungsbereich bei Ansatz eines idealen elastisch-plastischen Materialmodells, herangezogen werden. Diese Methode liefert ähnliche Werte, wie die von

QUINSON und PEREZ 1997 (s. Abb. 4.4) für teilkristalline Thermoplaste empfohlene Methode mittels Messung der Restdehnung. Darüber hinaus gibt es weitere in der Praxis angewendete graphische und analytische Verfahren (s. Abb. 4.3), die jedoch zu mehr oder weniger großen Abweichungen führen. Energetische und optische Untersuchungen könnten die Genauigkeit der einzelnen Verfahren bzgl. des Beginns plastischer Verformungen zeigen.

Mit Kurzzeitzugversuchen lässt sich eine Kriechgrenze, also das Einsetzen erster viskoelastischer (zeitabhängiger reversibler) Dehnungsanteile nicht ermitteln (s. Kap. 4.3). Mit dem in Anhang D vorgestellten graphischen Verfahren kann diese idealisierte Grenze allerdings abgeschätzt werden (s. Abb. D 14). Durch Anwendung des rheologischen Modells von BURGER (4-Parameter-Modell, s. Anhang D, Kap. D 3.4.6) kann die Kriechgrenze über die Separierung der elastischen, viskoelastischen und viskosen Dehnungsanteile im Rückdehnungsversuch, der sich an den monoaxialen Kriechversuch anschließt, bestimmt werden.

### **Biaxiale Kurzzeitzugversuche**

#### Fließspannung und Fließdehnung bei $T = +23^{\circ}\text{C}$ :

Die in Kapitel 4.4 ausgewerteten biaxialen Kurzzeitzugversuche (Beanspruchungsverhältnis 3:1, kraftgesteuert,  $T = +23^{\circ}\text{C}$ ,  $\dot{\varepsilon} \cong 10^1\% / \text{min}$ ) ergeben eine Fließspannung von  $\sigma_F \cong 16,6 \text{ N} / \text{mm}^2$  und eine Fließdehnung von  $\varepsilon_F \cong 1,7\%$  (s. Abb. 4.59).

#### Steifigkeiten bei $T = +23^{\circ}\text{C}$ :

Der unter Ansatz HOOKE'schen Verhaltens für den mehrachsigen ebenen Spannungszustand eines isotropen und homogenen Materials ermittelte zyklusbezogene Sekantenmodul ist nur im Anfangsbereich linear, was ggf. auf die zyklische Belastung und die bei diesen Versuchsbedingungen erforderliche Aneinanderfügung der Spannungs-Dehnungslinien (zyklusbezogene Auswertung) zurückzuführen ist. Der so ermittelte Sekantenmodul beträgt an der Fließgrenze etwa  $E_{S,Z,F} \cong 681 \text{ N} / \text{mm}^2$  (s. Abb. 4.61). Der nach DIN EN ISO 527 zwischen den Dehngrenzen  $\varepsilon_1 = 0,0005[-]$  und  $\varepsilon_2 = 0,0025[-]$  ermittelte E-Modul (Ursprungsmodul) beträgt  $E_t \cong 2.169 \text{ N} / \text{mm}^2$ . Er ist erwartungsgemäß deutlich größer als der an der Fließgrenze ermittelte Sekantenmodul. Die Folie ist also im unteren Dehnungsbereich steifer. Die entsprechenden Schubmoduln an der Fließgrenze und zwischen den o.g. Dehngrenzen ergeben sich zu  $G_{S,Z,F} \cong 232 \text{ N} / \text{mm}^2$  bzw. zu  $G_t \cong 758 \text{ N} / \text{mm}^2$ , die Querkontraktionszahlen zu  $\nu_{S,Z,F} \cong 0,47$  bzw. zu  $\nu_t \cong 0,43$  (s. Abb. 4.61). Durch die Querkontraktionszahl  $\nu$  (bei  $\nu = 0,45[-]$  für Werte oberhalb des Verhältnisses  $\frac{1}{0,45} : 1 = 2,22 : 1$ ) ist bei einem Beanspruchungsverhältnis von 3:1 die Wirkung der größeren Beanspruchung auf die Dehnung in der weniger beanspruchten Richtung größer, als die aus der geringeren Beanspruchung resultierende Dehnung. Damit werden die Dehnungsanteile in der weniger beanspruchten Richtung negativ, d.h. die Folie verkürzt sich in dieser Richtung.

### Fließbedingung

Nach der Literatur beschreibt die Fließbedingung nach VON MISES die Fließgrenze vieler duktiler Werkstoffe. Vorliegende (hier nicht dargestellte) Fließspannungen, ermittelt für verschiedene mehrachsige ebene Spannungszustände ( $T = +23^{\circ}\text{C}$ ; Größenordnung der Dehngeschwindigkeit:  $\dot{\varepsilon} \cong 10^1 \text{ \% / min}$ ), deuten darauf hin, dass die VON MISES'sche Bedingung auch für ETFE-Folien zu einer hinreichend genauen Abschätzung der Fließgrenze bei konstanter Temperatur und Dehngeschwindigkeit führt. Sie kann jedoch keine Temperatur- und Dehngeschwindigkeitseinflüsse berücksichtigen.

Bei Ansatz der Isotropie ergibt sich nach dieser Fließbedingung eine zur Winkelhalbierenden im I und III Quadranten der Hauptspannungsebene ( $\sigma_I; \sigma_{II}$ ) symmetrische Ellipse (s. Abb. 4.60), die bei gleichem Verhalten für Druck- und Zugbeanspruchung (s. Abb. 2.1) auch zur Winkelhalbierenden im II und IV Quadranten symmetrisch ist. Beides wurde als näherungsweise zutreffend festgestellt.

### Fließbereich und Bruch

Analog zu den Monoaxialversuchen nimmt die Steifigkeit oberhalb der Fließgrenze auch bei mehrachsiger Beanspruchung deutlich ab. Bei der Entlastung von einem Spannungsniveau oberhalb der Fließgrenze verbleiben irreversible Dehnungen. Wird die Folie danach erneut belastet, ergeben sich durch das vorherige Recken vergrößerte Fließspannungen und Fließdehnungen, eine reduzierte Steifigkeit sowie ein orthotropes bzw. anisotropes Verhalten. Die Beanspruchung wurde hier nicht bis zum Bruch gesteigert, so dass eine bei hohen Dehnungen anzunehmende Versteifung hier nicht festgestellt werden konnte.

Die hier gezeigten ebenen Biaxialversuche an kreuzförmigen Proben können versuchsbedingt nicht bis zum Bruch gefahren werden (s. Kap. 4.3.1), weshalb sie keine Aussage bzgl. einer Bruchbedingung ermöglichen. Erste Auswertungen von Berstversuchen im Labor (s. Abb. 4.139) zeigen eine deutliche Verfestigung der Folie vor dem Brucheintritt (BARTHEL und SCHIEMANN 2006). Für differenzierte Aussagen über eine Bruchbedingung sind weitere Versuche erforderlich.

### Einfluss der Temperatur

Die Biaxialversuche mit einem konstanten Spannungsverhältnis von 3:1 wurden bei vier Temperaturstufen ( $-25^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $+23^{\circ}\text{C}$ ,  $+35^{\circ}\text{C}$ ) mit einer kraftgesteuerten Prüfgeschwindigkeit ( $v_T = 0,2 \text{ kN / m / s}$ ) durchgeführt. Abb. 4.61 zeigt den Temperatureinfluss auf die Kennwertfunktionen Elastizitätsmodul, Schubmodul und Querkontraktionszahl, dargestellt als zyklenbezogene Größen (Sekantenmoduln) sowie ermittelt nach den in DIN EN ISO 527 vorgegebenen Dehngrenzen  $\varepsilon_1 = 0,0005 [-]$  und  $\varepsilon_2 = 0,0025 [-]$  (Ursprungsmoduln). Grundsätzlich führen höhere Temperaturen zu geringeren Steifigkeiten und einer geringen Zunahme der Querkontraktionszahl.

Der Einfluss der Temperatur auf die Fließspannung und die Fließdehnung ist in Abb. 4.59 aufgetragen. Beide Werte fallen mit steigender Temperatur. In Abb. 4.60 wurde die elliptische Fließbedingung nach VON MISES herangezogen, um Fließkurven für unterschiedliche Temperaturen abzuschätzen.

### Einfluss der Dehngeschwindigkeit

In Kap. 4.4.4 wurde ein Versuch bei unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten bei  $T = +23^{\circ}\text{C}$  ausgewertet. Da die Maximalbeanspruchungen in diesem Versuch oberhalb der Fließgrenze lagen und nacheinander bei unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten aufgebracht wurden, war lediglich die erste Prüfgeschwindigkeit ( $v_{T,1} = 0,02 \text{ kN} / \text{m} / \text{s}$ ) verwertbar.

Das ermittelte Spannungs-Dehnungsverhalten wurde mit dem des Temperaturversuchs bei  $T = +23^{\circ}\text{C}$  aber einer anderen Prüfgeschwindigkeit verglichen (s. Abb. 4.68). Der Vergleich zeigt, dass sich eine höhere Dehngeschwindigkeit zumindest bis zur Fließgrenze so auf die Spannungs-Dehnungs-Beziehung auswirkt, wie eine Absenkung der Temperatur.

### Zeit-Temperatur-Verschiebungsfaktor

Nach Abb. 4.69 wurde über die Fließspannungs- bzw. Fließdehnungskurve (aus den o.g. Temperaturversuchen) für die beiden mittleren Dehngeschwindigkeiten die Größenordnung eines Zeit-Temperatur-Verschiebungsfaktors für die Fließgrenze abgeschätzt. Eine Erhöhung der Dehngeschwindigkeit von  $\dot{\varepsilon}_{(v=0,02)} \cong 0,9 \text{ \%}/\text{min}$  auf  $\dot{\varepsilon}_{(v=0,2)} \cong 5,4 \text{ \%}/\text{min}$  (Faktor 6) entspricht demzufolge einer Temperaturabsenkung von  $T = +33^{\circ}\text{C}$  auf  $T = +23^{\circ}\text{C}$  ( $\Delta T = 10 \text{ Kelvin}$ ). Der Faktor liegt in der Größenordnung bekannter Faustformeln für teilkristalline Thermoplaste, wie in Anhang D, Kap. D 7, dargestellt.

### **DMA Versuche**

Die Methode der DMA zur Erfassung der temperaturabhängigen Eigenschaften eines Werkstoffes ist in Kap. 3.3.4 beschrieben. Aufgrund der Erkenntnisse aus der Auswertungen der zyklischen biaxialen Kurzzeitzugversuche zum Zusammenhang von Zeit und Temperatur der ETFE-Folie, sollte dieser prinzipielle Zusammenhang mit dynamischen Versuchen gezeigt werden. Die Auswertung der Ergebnisse von DMA-Versuchen des Unternehmens <sup>®</sup>DYNEON mit drei unterschiedlichen Frequenzen (1, 10 und 100 Hz) über den Temperaturbereich von 0 bis  $250^{\circ}\text{C}$  an einem prismatischen Probekörper aus dem Granulat <sup>®</sup>DYNEON ET 6235 ist in Kap. 4.5 dargestellt.

Die DMA-Versuche zeigen diesen Zusammenhang. Der Zusammenhang von Dehngeschwindigkeit, Temperatur und E-Modul (bei HOOKE'schem Verhalten ist der E-Modul gleich dem Speichermodul  $E'$ ) ist in Abb. 4.73 für den Temperaturbereich  $0^{\circ}\text{C}$  bis  $100^{\circ}\text{C}$  und den Dehngeschwindigkeitsbereich 0,375 bis 375  $\text{\%/min}$  aufgetragen.

Die anhand der mittleren Dehngeschwindigkeit und der Temperatur ermittelte Größenordnung des Zeit-Temperatur-Verschiebungsfaktors bezüglich dem E-Modul im Dehnungsschwellbereich ( $0,01\% \leq \varepsilon \leq 0,1\%$ ) entspricht der Größenordnung der nach Kapitel 4.4 ermittelten Zeit-Temperatur-Verschiebung für die Fließgrenze: aus zyklischen biaxialen Kurzzeitzugversuchen:  $\Delta T = 10 \text{ K}$  entspricht etwa  $\Delta \dot{\varepsilon} \cong 0,6 \cdot 10^1 [\text{\%/min}]$ ; aus DMA-Versuchen:  $\Delta T = 10 \text{ K}$  entspricht etwa  $\Delta \dot{\varepsilon} \cong 1 \cdot 10^1 [\text{\%/min}]$ . Beide Größen entsprechen der in der Literatur angegebenen Größenordnung für den Zeit-Temperaturverschiebungsfaktor thermoplastischer Werkstoffe (s. Anhang D, Kap. D 7).

Eine kurze Beispielrechnung verdeutlicht, dass Windböenlasten und Schneelasten auf völlig unterschiedliche Werkstoffeigenschaften auf der Widerstandsseite stoßen, sowohl die Steifigkeit betreffend, als auch die der Bemessung zugrunde liegenden Grenzwerte. Der bislang nicht berücksichtigte Zusammenhang von Zeit und Temperatur erklärt die große Widerstandsfähigkeit der ETFE-Folien sowohl gegenüber Windböen bei sommerlichen Temperaturen (und hohen Dehngeschwindigkeiten) als auch gegenüber Schneelasten bei tiefen Temperaturen (und geringen Dehngeschwindigkeiten). Die Zeit-Temperaturverschiebung viskoelastischer Werkstoffe liefert den Schlüssel zum Verständnis der Werkstoffeigenschaften der ETFE-Folie und einen wichtigen Baustein zur Aufstellung eines probabilistischen Sicherheitskonzeptes für diesen Werkstoff.

### Berstversuch

In Kap. 4.6 wurde ein Berstversuch an einem 1:1 Modell vorgestellt, der bei Außentemperatur im Freien durchgeführt wurde (Temperatur  $T \cong +2^\circ\text{C}$ , mittlere Dehngeschwindigkeit  $\dot{\epsilon}_{MW} \leq 0,13\%/\text{min}$ ). Der Versuch zeigt, dass sich der maximale Stich in Feldmitte affin zur Spannungs-Dehnungs-Kennlinie der Folie bei tiefen Temperaturen verhält. Der Fließeintritt ist im Druck-Stich-Diagramm deutlich erkennbar (s. Abb. 4.75). Der Bruch trat bei  $p_{i,Berst,1} = 4.800\text{ Pa}$  in der Mitte des langen Randes ein. Der an diesem einen Pneu gemessene Berstdruck entspricht damit einer 4,8-fachen Bemessungslast  $q = 1,0\text{ kN/m}^2$ .

### FE-Vergleichsrechnung mit ANSYS zur Abschätzung einer Bruchbedingung

Der vorgestellte Berstversuch wurde mit dem FE-Programm ANSYS bis zum Bruch bei Erstbelastung nachgefahren. Aus der multilinenaren FE-Berechnung ergibt sich für den Berstdruck ( $p_{i,Berst,1} = 4.800\text{ Pa}$ ) eine maximale Normal- und Hauptspannung

$\sigma_{Berst} = 34,79\text{ N/mm}^2$ . Dieser Wert liegt nahe der bei  $T = 23^\circ\text{C}$  und  $\dot{\epsilon} \cong 500\%/\text{min}$

gemessenen monoaxialen Bruchfestigkeit der Schweißnaht ( $\sigma_{B,SN} \cong 36,6\text{ N/mm}^2$ , s. Abb. 4.15). Die Ableitung einer Bruchbedingung ist jedoch aufgrund der unterschiedlichen Parameter (Temperatur, Dehngeschwindigkeit und ggf. Luftfeuchtigkeit) nicht möglich. Die tatsächliche Versagensstelle im Berstversuch stimmt mit der rechnerisch ermittelten Stelle maximaler Normal- und Hauptspannungen überein.

### FE-Vergleichsrechnung mit CARAT zur Bestimmung des Einflusses des Zuschnitts

Der vorgestellte Berstversuch wurde mit dem FE-Programm CARAT bis etwa zur Proportionalitätsgrenze bei  $p_{i,linear\text{ elastisch}} = 2.000\text{ Pa}$  mit drei unterschiedlichen Zuschnitten (Formfindungsgeometrie, spannungsoptimierter Zuschnitt und Flachzuschnitt) rechnerisch simuliert.

Die erste Berechnung (Formfindungsgeometrie) geht von dem idealisierten Fall aus, dass die Zuschnittsgeometrie der dreidimensionalen Formfindungsgeometrie entspricht. Die zweite Berechnung erfolgte am tatsächlich ausgeführten spannungsoptimierten Zuschnitt. Diese Geometrie wird auch in der Praxis häufig gewählt. Sie kann mit einigen FE-Programmen

rechnerisch ermittelt werden. Die dritte Berechnung erfolgte am so genannten Flachzuschnitt, der auf linear aneinander gefügten ebenen Folienbahnen basiert. Auch dieser Zuschnitt wird in der Praxis ausgeführt.

Es zeigten sich deutliche Differenzen in den errechneten maximalen Spannungen an der Proportionalitätsgrenze. Sie hängen prinzipiell von der GAUSS'schen Krümmung, der Foliensteifigkeit, der Teilflächegeometrie und der Belastung ab. Mit zunehmender Belastung werden die Differenzen jedoch geringer. Der Flachzuschnitt liefert bereits in diesem Spannungsbereich relativ große maximale Spannungen.

Ein weiteres Ergebnis der Vergleichsrechnungen ist die Beobachtung, dass an den Verbindungslinien der Teilflächen, also an den Flächenschweißnähten, die Spannungen z.T. deutlich geringer sind, als in der Mitte der Teilflächen bzw. an den Pneurändern. Da die Schweißnahtfestigkeit i.d.R. geringer ist, als die Festigkeit der Folie, stellt dies einen günstigen Umstand für die Bemessung von ETFE-Folienpneus dar, da sich hieraus der Tragfähigkeitsnachweis gegen die Bruchspannung auf die Randschweißnaht fokussieren ließe, wenn sich die an der Proportionalitätsgrenze gemachten Beobachtungen bis zur Bruchgrenze fortsetzen.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

### 5.1 Zusammenfassung

ETFE-Folien werden seit etwa 25 Jahren als Last abtragendes Bauteil der Gebäudehülle verwendet. Die Dokumentation und Auswertung von über 200 ausgeführten Projekten nach Größenkategorien, Projektstandort, Nutzung, Bauteilanwendung, Grundrissgeometrie und Bauart zeigen die Anwendungsvielfalt und die derzeitigen Möglichkeiten derartiger Membrankonstruktionen. Aufgrund des günstigen Verhältnisses von Eigengewicht zu Spannweite zählen sie zu den leichten Flächentragwerken. Man unterteilt ETFE-Folienkonstruktionen nach den Bauarten der mechanischen und der pneumatischen Vorspannung.

Die Tragfähigkeit einer ETFE-Folie hängt von ihren mechanischen Eigenschaften im produktionsfrischen Zustand, von deren anschließenden Veränderungen durch weitere Verarbeitungsschritte (z.B. Verschweißung) und von den langfristigen Veränderungen durch die Anwendungs-, Konstruktions- und Umgebungsbedingungen sowie von den auftretenden Einwirkungen ab. Die geplante Nutzungsdauer definiert den Bemessungszeitraum und hat damit einen Einfluss auf die Nachweisführung auf der Einwirkungs- und auf der Widerstandsseite. Das viskoelastische Verhalten der ETFE-Folie bedeutet eine Abhängigkeit des Spannungs-Dehnungszustandes von der Beanspruchungsgeschichte, d.h. es besteht eine Wechselbeziehung zwischen Einwirkungs- und Widerstandsseite, was die Herleitung eines probabilistischen Bemessungskonzeptes erheblich erschwert.

Das derzeit angewendete Bemessungskonzept beruht auf Nachweisen bei Normaltemperatur  $T = +23^{\circ}\text{C}$  sowie auf der Basis von Bemessungskennwerten des produktionsfrischen Materials. Ungünstige Veränderungen der rechnerischen Kennwerte und Kennwertfunktionen (Festigkeits- und Dehngrenzen sowie Steifigkeiten) werden darin durch Konstanten, so genannte Abminderungsfaktoren, berücksichtigt. Die hier vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass dieser Ansatz dem komplexen mechanischen Verhalten des teilkristallinen Thermoplastwerkstoffes nur bedingt gerecht werden kann. Die Umstellung auf ein semiprobabilistisches Bemessungskonzept auf der Basis von Ersatzbeanspruchungen und unter Berücksichtigung von Schadensakkumulationsregeln, wäre für ETFE-Folien denkbar. Hierfür sind Untersuchungen zur Bestimmung der mehrachsigen Zeitstandsbruchfestigkeit erforderlich, die bislang noch nicht vorliegen.

Neben der Dokumentation und Diskussion der bisher veröffentlichten Erkenntnisse, beinhaltet die vorliegende Arbeit die Auswertung von statischen Kurzzeitzugversuchen, in denen Probekörper aus ETFE-Folie ein- und mehrachsigen Spannungszuständen, sowie unterschiedlichen Temperaturen und Dehngeschwindigkeiten ausgesetzt wurden. Es zeigt sich, dass sich ETFE-Folien viskoelastisch verhalten. Dies bedeutet, dass ihre mechanischen Eigenschaften von der Belastung, der Temperatur und der Zeit abhängen, und damit der momentane Spannungs-Dehnungszustand auch von der Beanspruchungsgeschichte (Zeit, Temperatur, Belastung) abhängig ist. Ein wichtiges Ergebnis der Untersuchungen ist die Erkenntnis, dass die Dehngeschwindigkeit als zeitabhängiger Parameter auch auf die Ergebnisse der Kurzzeitzugversuche einen Einfluss hat.

Die Ergebnisse biaxialer Kurzzeitzugversuche geben Hinweise darauf, dass man die Fließbedingung nach VON MISES bei konstanter Temperatur (+23° C) und konstanter Dehngeschwindigkeit ( $\dot{\epsilon} \cong 10^{-1} \text{ %/min}$ ) anwenden kann. Erhöht man die Temperatur oder verringert die Dehngeschwindigkeit wandert die Fließellipse Richtung Ursprung (s. Abb. 4.60). Ob sie dabei ihre grundsätzliche Form beibehält, wäre noch zu zeigen.

Die bisherigen Ergebnisse lassen erwarten, dass für den Fließeintritt und für den Bruch eintritt unterschiedliche Festigkeitshypothesen anzuwenden sind, sofern die Zeit und die Temperatur darin keine Berücksichtigung finden. Ob mit der Hypothese der gespeicherten Gestaltänderungsenergie nach REINER und WEISSENBERG [149]) das Verhalten der ETFE-Folie beschrieben werden kann, muss noch gezeigt werden. Nach [91] ist es die einzige bekannte Festigkeitshypothese, die eine Zeitabhängigkeit berücksichtigt.

Foliensteifigkeit, Fließspannung und Fließdehnung nehmen bei Temperaturerhöhung bzw. bei Verringerung der Dehngeschwindigkeit ab. Dies gilt auch für die Streckspannung, falls eine Streckgrenze ausgeprägt ist. Bei abgesenkter Temperatur oder steigender Dehngeschwindigkeit verhalten sich die Eigenschaftsveränderungen umgekehrt, so dass sich die qualitativen Tendenzen nach Tabelle 5.1 darstellen lassen.

	$E_S$	$G_S$	$\sigma_Y$	$\epsilon_Y$
Erhöhung der Temperatur und/oder Verringerung der Dehngeschwindigkeit	➔	➔	➔	➔
Verringerung der Temperatur und/oder Erhöhung der Dehngeschwindigkeit	➔	➔	➔	➔

Tab. 5.1 Tendenzuelle Veränderungen der charakteristischen Kenngrößen der ETFE-Folie in Abhängigkeit von Temperatur- und Dehngeschwindigkeitsveränderungen; Sekantenmodul  $E_S$ , Schubmodul  $G_S$ , Fließspannung  $\sigma_Y$  (bzw.  $\sigma_F$ ) und Fließdehnung  $\epsilon_Y$  (bzw.  $\epsilon_F$ )

Der grundsätzliche Zusammenhang zwischen der Zeit und der Temperatur ist als Zeit-Temperatur-Verschiebung (ZTV) bekannt und in der Literatur beschrieben. Erst die Berücksichtigung der von der Zeit abhängigen Dehngeschwindigkeit und der Temperatur bzw. der Zusammenhang beider Parameter in Form der Zeit-Temperatur-Verschiebung kann die bisherigen Ergebnisse monoaxialer und biaxialer Untersuchungen zusammenführen. Dieser Zusammenhang erklärt auch das von Ausführenden häufig genannte aber zuvor nicht quantifizierbare "gutmütige" Verhalten der ETFE-Folie. Die Erklärung liegt darin begründet, dass die Fließgrenze sowohl für hohe Dehngeschwindigkeiten bei hohen Temperaturen (z.B. Sturmböen im Sommer) als auch für niedrige Dehngeschwindigkeiten bei niedrigen Temperaturen (Schneelasten im Winter) i.d.R. hoch genug liegt, um ein Fließen zu vermeiden.

Niedrige Dehngeschwindigkeiten und hohe Dauerlasten stellen insbesondere bei hohen Temperaturen ein Problem für ETFE-Folien dar, das sich bei Pneus in Kriechvorgängen und folglich in Stichvergrößerungen äußern kann. Mechanisch vorgespannte Folien können unter äußeren Dauerlasten ebenfalls kriechen. Im Vorspannungszustand unterliegen sie hingegen dem Vorgang der Relaxation. Ein zu groß gewähltes Vorspannungsniveau wird also zu einer Abnahme der Vorspannung führen, bis sich ggf. ein Gleichgewichtszustand einstellt.



Die in Abhängigkeit von der Folientemperatur auftretenden Schwankungen der Vorspannung mechanisch vorgespannter Folien sind jedoch nach derzeitigem Kenntnisstand weitgehend reversibel. Ein Fazit ist, dass ETFE-Folienmembranen nur bei geeigneter konstruktiver Ausbildung und bei begrenzten äußeren Belastungen für sehr warme Klimazonen geeignet sind.

Die anhand von biaxialen Kurzzeitzugversuchen für die Fließgrenze gezeigte Größenordnung der Zeit-Temperatur-Verschiebung wurde mit dynamisch-thermisch-mechanischen Versuchen (DMA) bei unterschiedlichen Frequenzen im Zugdehnungsschwellbereich (bei kleinen Dehnungen) bestätigt. Sie zeigt gute Übereinstimmung mit der in der Literatur für thermoplastische Werkstoffe genannten Größenordnung. Demnach bewirkt im Temperaturbereich zwischen etwa 0 und 70°C und einer Frequenz zwischen 1 und 100 Hz eine Temperaturerhöhung um 10 Kelvin etwa dieselbe Reduktion des E-Moduls, wie eine Verringerung der Dehngeschwindigkeit um etwa eine Zehnerpotenz.

## **5.2 Ausblick**

Die vorgestellten statischen Zugversuche stellen lediglich eine von mehreren Methoden der Beobachtung mechanischer Verhaltensweisen dar. Die bislang durchgeführten Versuche dienten vorrangig der Einschätzung der ETFE-Folie unter praxisnahen Versuchsbedingungen. Für die Aufstellung eines allgemeinen Werkstoffgesetzes und zur Herleitung eines probabilistischen Bemessungskonzeptes wären weitere Versuchsreihen mit jeweils konstanten Temperaturen, Dehngeschwindigkeiten und Spannungszuständen erforderlich.

Strukturelle und energetische Untersuchungen sollten zur Bestätigung der mechanischen Versuche herangezogen werden. Insbesondere die dynamisch-thermisch-mechanische Analyse (DMA) ist ein geeignetes Verfahren zur Klärung grundsätzlicher Zusammenhänge zwischen Zeit und Temperatur.

In der Literatur ist der wichtige Hinweis zu finden, dass das mechanische Verhalten von Polymerwerkstoffen auch von der Luftfeuchtigkeit abhängen kann. Dieser Hinweis wurde bisher wenig beachtet, so dass der Parameter während der Versuche nicht immer ausgewiesen oder dokumentiert wurde. Ob der Einfluss bei ETFE-Folien signifikant ist, muss vorrangig gezeigt werden, bevor mit weiteren Versuchen unter Separierung der nun bekannten Parameter Temperatur, Dehngeschwindigkeit und Spannungszustand begonnen wird.

Für die Herleitung exakter Beziehungen sind im Bereich der Fließgrenze ggf. die wahren Dehnungen und wahren Spannungen zugrunde zu legen, die sich auf das Intervall, also auf die unter Last verformte Geometrie beziehen. Bis zur Proportionalitätsgrenze sind nach einschlägiger Literatur jedoch keine signifikanten Abweichungen bei Ansatz technisch definierter Größen, die sich auf die unbeanspruchte Ausgangsgeometrie beziehen, zu erwarten.

Gemäß Literaturangaben scheint es derzeit aber unklar zu sein, ob der Ansatz wahrer Spannungen und Dehnungen auch im Bereich sehr großer Dehnungen, also bis zum Bruchtritt, möglich und vor allem sinnvoll ist.

Es seien zunächst folgende Untersuchungen empfohlen:

### Glasübergangstemperatur

Verifizierung der Glasübergangstemperatur ( $\alpha$ -Übergang) mit energetischen Methoden (DSC) und thermodynamisch-mechanischen Methoden (DMA); Bestimmung des Erweichungsgebietes der amorphen Phase und der Temperatur- und Frequenzabhängigkeit energie- und entropieelastischen Verhaltens. Ermittlung weiterer Erweichungsgebiete ( $\beta$ -Übergang).

### Kriechbedingung (Kriechgrenze)

Durchführung monoaxialer und biaxialer Kriech- und Relaxationsversuche (Kriechversuche mit jeweils anschließendem Rückdehnungsversuch) bei verschiedenen Temperaturen und Luftfeuchtigkeiten, Spannungsverhältnissen und Lastniveaus zur Bestimmung von Kriechgrenzen für Dauerlasten; Separierung der elastischen, viskoelastischen und viskosen Dehnungsanteile mittels geeignetem rheologischen Modell für viskoelastische Werkstoffe; Anwendung geeigneter Potenzfunktionen zur Herleitung der Eingangsparameter für ein generalisiertes mechanisches Modell (Deformationsmodell).

### Fließbedingung (Fließgrenze)

Verifizierung der Festigkeitshypothese nach VON MISES für die Fließgrenze (Einsetzen plastischer Verformungen) durch biaxiale Kurzzeitzugversuche für verschiedene Spannungsverhältnisse bei jeweils einer Temperatur und einer konstanten Dehngeschwindigkeit; Versuche bei verschiedenen Temperaturen, Dehngeschwindigkeiten und Luftfeuchtigkeiten; Vergleich der Ergebnisse mit strukturellen und energetischen Betrachtungen; Herleitung einer allgemeinen Fließbedingung und einer Vergleichsspannung unter Berücksichtigung der Einfluss nehmenden Parameter.

### Bruchbedingung (Bruchgrenze)

Entwicklung eines Versuchsaufbaus zur Durchführung von Berstversuchen zur Messung der Bruchgrenze (Bruchspannungen, Bruchdehnungen) und ggf. auftretender Verstreckungen im Fließbereich; Durchführung der Versuche bei verschiedenen Temperaturen, Dehngeschwindigkeiten und Luftfeuchtigkeiten; Vergleich der Ergebnisse mit strukturellen und energetischen Betrachtungen (Zuhilfenahme optischer und bruchmechanischer Methoden); Herleitung einer Festigkeitshypothese für den Brucheintritt unter Berücksichtigung der Einfluss nehmenden Parameter.

### Zeit-Temperatur-Verschiebung

Ein wesentlicher Baustein des Verständnisses von den mechanischen Eigenschaften der ETFE-Folie bildet ihre Zeit-Temperatur-Verschiebung. Daher wäre die Ermittlung einer entsprechenden Funktion, z.B. mit Hilfe der von EYRING entwickelten Theorie der Reaktionsgeschwindigkeit auf der Basis einer ARRHENIUS Gleichung, hilfreich. Zur Bestimmung der Parameter sind die bereits genannten Prüfungen bei definierter Temperatur, Dehngeschwindigkeit und ggf. Luftfeuchtigkeit durchzuführen.

### Langzeitfestigkeit (Zeitstandsbruchversuche)

Durchführung monoaxialer Zeitstandsbruchversuche mit verschiedenen Lastniveaus und Temperaturen zur Ermittlung der belastungs-, temperatur- und feuchteabhängigen Widerstandszeit. Entsprechende Durchführung mehrachsiger Zeitstandsbruchversuche mit Hilfe von Berstversuchen; Daraus entwickelte Lebensdauerlinien bilden die Basis für ein semiprobabilistisches Bemessungskonzept.

### Semiprobabilistisches Bemessungskonzept

Herleitung eines semiprobabilistischen Bemessungskonzeptes auf der Basis von Ersatzlasten und unter Berücksichtigung von Schadensakkumulationsregeln; Definition der Versagensmechanismen und der entsprechenden Grenzzustände der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit, differenziert nach mechanisch und pneumatisch vorgespannten Systemen; Berücksichtigung von langfristigen Verschlechterungen der Lebensdauerlinien durch konstante Abminderungsfaktoren oder durch Abminderungsfunktionen; Berücksichtigung der statistischen Verteilung der zugrunde liegenden Daten auf der Einwirkungs- und auf der Widerstandsseite; Alternative: Herleitung eines semiprobabilistischen Bemessungskonzeptes auf der Basis von temperaturabhängigen Einwirkungen (Lasten) und temperaturabhängigen Widerständen. Hierzu wären Versuche erforderlich, aus denen der Zusammenhang zwischen den Lasten und den diesen zugeordneten ungünstigen (maximalen) Bauteiltemperaturen hervorgehen.

### Werkstoffgesetz

ETFE-Folien wurden bislang bis zur Fließgrenze als linear elastisch betrachtet, d.h. elastische und auch linear viskoelastische Anteile werden bei hinreichend schneller Belastung gleichermaßen mit dem HOOKE'schen Gesetz beschrieben. Oberhalb der Fließgrenze wurde näherungsweise plastisches Verhalten unterstellt. Ein allgemeines Werkstoffgesetz müsste jedoch das viskoelastische Verhalten für unterschiedliche Temperaturen und Dehngeschwindigkeiten bis zum Bruch, also für elastische, viskoelastische und viskose Dehnungsanteile erklären können. Ein solches Werkstoffgesetz wäre vermutlich komplex und ließe sich nur unter Zuhilfenahme struktureller und energetischer Betrachtungen entwickeln.

### Konstruktive Einflüsse auf eine probabilistische Bemessung

Untersuchung der Einflüsse der Bauart (pneumatisch, mechanisch), der Bauteilanwendung und Einbausituation (Dach/Wand), der Nutzung (Stadion/Schwimmbad/Atrium etc.), der Anzahl der Lagen (Luftkammern), der GAUSS'schen Krümmung, der Systemredundanz etc. auf die Bemessung, d.h. auf die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit des Gesamtsystems, auf die Definition der Grenzzustände der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit, auf die anzusetzenden Teilsicherheitsbeiwerte, auf die Resttragfähigkeit usw.; Einflüsse der Randgeometrie, der Neigungen und der Krümmungen auf das mögliche Auftreten von Wasser- oder Schneesäcken; Einflüsse der Randverbindung (Steifigkeit, Nachgiebigkeit, tangentielle Reibung, Geometrie von Keder und Nut, Oberflächenbeschaffenheit usw.) auf die Zugfestigkeit der Folie; Einflüsse angrenzender Bauteile (Seil- und Seilnetzunterspannungen, Klemmp Profile) auf die Wärmeabsorption und somit auf die Bemessungstemperatur der Folie; Einflüsse von thermischen Trennungen der Randverbindungen, der Anzahl und Volumina der Kammern und der Raumtemperaturen auf die Bemessungstemperatur der Folienlagen im Fall pneumatisch gestützter Konstruktionen; Einflüsse der Lagenanzahl/Kammern, der Luftvolumina, der Krümmungen und der Randgeometrie auf die sich unter Windlasten einstellenden Pneuinnendrucke, Überlagerung des sich unter Windlasten einstellenden Pneuinnendruckes mit der Windlast (Thermodynamik, Dynamik); Untersuchung der Rückstellkräfte einer mechanisch vorgespannten (Mittel-)Lage zur Berücksichtigung bei der Bemessung von Bauteilen des Primärsystems.

Wie so oft im Bauwesen, eilt auch im Fall der ETFE-Folie die Praxis der Grundlagenforschung etwas voraus. Die vorliegende Arbeit zeigt, dass mehrere hundert Projekte mit ETFE-Folie realisiert wurden, ohne dass ihr Werkstoffverhalten vollständig ergründet oder dokumentiert wäre. Die Arbeit bildet den Versuch einer umfassenden Aufarbeitung der vorliegenden Erkenntnisse. Sie soll zu einem besseren Verständnis der Bauweisen mit ETFE-Folie und des Werkstoffverhaltens der ETFE-Folie beitragen, sowie Ansatzpunkte für weitere Untersuchungen und die hierbei zu berücksichtigenden Parameter liefern.

## Anhang A Projektdokumentation 1980 bis 2006 (chronologisch, nach Jahrgängen geordnet)

Die Projektdokumentation beinhaltet die chronologische Katalogisierung von über 200 Folienkonstruktionen, die seit Beginn der Bauweisen mit ETFE-Folien in den frühen 80er Jahren des letzten Jahrhunderts bis heute gebaut wurden. Es existieren sicher weitere Projekte, die hier nicht dokumentiert sind. Die auffindbaren Projektdaten wurden in Hinblick auf Größe, Standort, Nutzung, Geometrie und Bauart ausgewertet. Die entsprechenden Diagramme sind in Kapitel 1 der vorliegenden Arbeit dargestellt. Die Untersuchung der Standorte zeigt beispielsweise, dass ETFE-Folienkonstruktionen bislang nur in einer begrenzten Anzahl von Ländern realisiert wurden.

<b>A</b> = Österreich (6)	<b>E</b> = Spanien (4)	<b>J</b> = Japan (1)
<b>AUS</b> = Australien (2)	<b>F</b> = Frankreich (3)	<b>MEX</b> = Mexiko (1)
<b>CH</b> = Schweiz (7)	<b>GB</b> = Großbritannien (43)	<b>NL</b> = Niederlande (16)
<b>CN</b> = China (2)	<b>GR</b> = Griechenland (1)	<b>SGP</b> = Singapur (1)
<b>D</b> = Deutschland (134)	<b>H</b> = Ungarn (1)	<b>SLO</b> = Slowenien (1)
<b>DK</b> = Dänemark (1)	<b>IND</b> = Indien (1)	<b>USA</b> = United States of America (2)

Tab. A 1 Landeskürzel und Anzahl der Projekte im jeweiligen Land (in Klammern)

Jahr und Nr.	Projektbezeichnung	Land	Anmerkungen
<b>1980 - 1991</b>			
1980 - 01	Sonnenforum Hamburg ETFE-DOM	D	
1980 - 02	Sonnenforum Hamburg ETFE-Kugel	D	
1982 - 01	Mangrovenhalle Burger's Park Arnheim	NL	
1984 - 01	Phänomena Dome	CH	
1985 - 01	Nord LB Niedersachsenpavillon	D	
1986 - 01	Hallenbad im Bungalow Park Het Heijderbos	NL	
1988 - 01	Tropenhalle Burger's Park Arnheim	NL	
1990 - 01	Chelsea and Westminster Hospital	GB	
1980er - 01	Versuchsgewächshaus in Stuttgart Hohenheim	D	
1980er - 02	Halle in Winsen an der Luhe	D	
1980er - 03	Fischzuchtanlage in Niederaußem	D	
1980er - 04	Solarer Speicherkollektor "Solar Gold 2000"	D	mehrlagig, mech. vorgespannt
1980er - 05	Freizeitbad Sherwoodforrest	GB	
1980er - 06	Freizeitzentrum Gennep	NL	
1980er - 07	Freizeitzentrum NL	NL	
1980er - 08	Radioteleskop "Plateau de Burre"	CH	einlagige Beschichtung
<b>1992</b>			
1992 - 01	Pressezentrum Weltwirtschaftsgipfel (WWG)	D	
1992 - 02	"Galerie am Park"	D	
1992 - 03	"Aqualand" Köln	D	
1992 - 04	Inselbad "Bahía"	D	
<b>1993</b>			
1993 - 01	Wüstenhalle (Desert Hall) im Burger's Park Arnheim	NL	
1993 - 02	Elefantenhaus Zoo Münster	D	
1993 - 03	Erlebnisbad "Basso"	D	
1993 - 04	Sheddach Huttwill	CH	einlagig, mech. vorgespannt
<b>1994</b>			
1994 - 01	Messestand "Tankstelle von Morgen"	D	einlagig, mech. vorgespannt
1994 - 02	Raubtierhaus Hellabrunn	D	
1994 - 03	Atelier "Mimesis"	D	
1994 - 04	Gerry Weber Centre Court	D	
1994 - 05	Mercedes Benz Niederlassung Magdeburg	D	

## ETFE-Folie als Tragelement

---

### 1995

1995 - 01	ZDF Mediadrom	D	
1995 - 02	Freizeitbad Vegesack	D	
1995 - 03	MCC Lord's Shop	GB	
1995 - 04	Resort Centre Nansei	J	
1995 - 05	Nowofol Oberlichte Werk II	D	
1995 - 06	Schwimmbad Teistungen	D	
1995 - 07	Valencia Ozone Research Labs	E	einlagig, Tragluftkuppel
1995 - 08	Nowofol Vordach Entrée	D	

### 1996

1996 - 01	Kur- & Familienbad Tabarz	D	
1996 - 02	Festo Pneuhalles "Airtecture"	D	
1996 - 03	Hampshire Tennis & Health Centre (HTCH)	GB	
1996 - 04	Elefantenhaus Zoo Duisburg	D	
1996 - 05	Schildkrötenhaus im Tierpark Hellabrunn	D	
1996 - 06	Georg-Arnold-Bad	D	
1996 - 07	Kristall Kur- & Freizeitbad Bad Klosterlausnitz	D	
1996 - 08	Hublinse im Olympia Park (MOG) München	D	
1996 - 09	"Aquarell" Haltern	D	
1996 - 10	Walkway Messe "Pneumatics"	D	
1996 - 11	Jüdisches Museum	A	einlagige Unterhängdecke
1996 - 12	Delphinarium Zoo Duisburg	D	

### 1997

1997 - 01	Wellenbad "Miramar"	D	
1997 - 02	Cumberland Infirmary	GB	
1997 - 03	Siemens Deckelhalle	D	einlagig, abgehängte Decke
1997 - 04	ZDF-Fernsehgarten	D	

### 1998

1998 - 01	Freizeitbad "Ana Mare"	D	
1998 - 02	Orange Operations Centre (Call Centre) Darlington	GB	
1998 - 03	Afrikahaus (Elefantenhaus) Zoo Dresden	D	
1998 - 04	E.on Verwaltungsgebäude (ehemals IAW)	D	
1998 - 05	Earth (Science) Centre	GB	
1998 - 06	Adshel Headquater	GB	
1998 - 07	Daimler Chrysler Design Center	D	
1998 - 08	André Heller "Meteorit"	D	
1998 - 09	University of Hertfordshire – Faculty of Art and Design	GB	

### 1999

1999 - 01	Lacon House	GB	
1999 - 02	Michaelsen Walkway	D	
1999 - 03	Warmbad "Prienavera"	D	
1999 - 04	Warmbad "Prienavera" - Vordach	D	einlagig, mech. vorgespannt
1999 - 05	Skyspan Europe - Hubpneu	D	
1999 - 06	Kristall Kur- & Freizeitbad Lübbenau	D	
1999 - 07	Adastral House	GB	
1999 - 08	Palacio Vistalegre	E	
1999 - 09	Freizeitbad "Nautica"	D	
1999 - 10	Naturkundemuseum "Wildwalk @ Bristol"	GB	
1999 - 11	Regenwaldhaus Herrenhausen	D	
1999 - 12	Braun Headquater Kronberg	D	

### 2000

2000 - 01	Kristall-, Kur- und Gradiertherme Bad Wilsnack	D	
2000 - 02	Freizeitbad "Moby Dick"	D	
2000 - 03	EXPO 2000 - Entrée	D	
2000 - 04	Cycle Bowl – Fassade	D	
2000 - 05	Cycle Bowl – Dach	D	
2000 - 06	Menschenaffenhaus Tierpark Hellabrunn	D	
2000 - 07	Schöllerbank Wien	A	

2000 - 08	Sporthalle Schwerin	D	
2000 - 09	"Wohnen 2000" Hannover	D	
2000 - 10	Skylight Eindhoven	NL	
2000 - 11	Solarlux Showroom	D	
2000 - 12	Vulkanpark Kretz	D	
2000 - 13	Magna Science Centre "Airship"	GB	
2000 - 14	Bishops Avenue London	GB	
2000 - 15	Milennium Point Visitors Centre	GB	
2000 - 16	Giraffenhaus Zoo Duisburg	D	
2000 - 17	Sainsbury PLC Headquarters	GB	
2000 - 18	Festo Technologie Zentrum Esslingen	D	
2000 - 19	Hermesschirme – transparente Dachfugen	D	einlagig, mech. vorgespannt
2000 - 20	Primatenhaus Zoo Leipzig	D	
2000 - 21	Naturhistorisches Museum "Darwin Centre"	GB	
2000 - 22	Venezuela Pavillon EXPO 2000 Hannover	D	einlagig, mech. vorgespannt
<b>2001</b>			
2001 - 01	Skyspan FEZ - Fertigungshalle	D	einlag., gering pneum. vorgesp.
2001 - 02	Skyspan FEZ - Skylight	D	
2001 - 03	Garden of Eden (Eden Project)	GB	
2001 - 04	E.on Informationszentrum Walchenseekraftwerk	D	einlagig, mech. vorgespannt
2001 - 05	Erlebnisbad "Triamare"	D	
2001 - 06	Hallen- und Freibadanlage "WEBALU" Werdau	D	
2001 - 07	Hallen- und Freibadanlage "WEBALU" Werdau - Vordach	D	einlagig, mech. vorgespannt
2001 - 08	Tankstelle Fürstenrieder Straße "F2"	D	
2001 - 09	Woonwinkel Center "Villa Arena" Amsterdam	NL	
2001 - 10	British National Space Science Centre (NSSC)	GB	
2001 - 11	BMW- IAA Pavillon 2001 - Unterdruck-Fassadenpneus	D	
2001 - 12	Entrance Covering Apenheul Zoo	NL	
2001 - 13	Hampshire County Cricket Club	GB	
2001 - 14	"Avifauna" Papageienhaus Alphen	NL	
2001 - 15	Vodafone World Headquater	GB	
2001 - 16	Manchester Piccadilly Railway Station	GB	
2001 - 17	Geschwister-Scholl Gymnasium Waldkirch	D	
2001 - 18	"Splash Landings" - Alton Towers	GB	
<b>2002</b>			
2002 - 01	Nowofol Walkway Werksgelände	D	
2002 - 02	Underground Station Heron Quays London	GB	
2002 - 03	Oxford Centre for Diabetes, Endocrinology and Metabolism	GB	
2002 - 04	Gewächshaus "Botanika im Park"	D	
2002 - 05	Bishop David Brown School London	GB	
2002 - 06	Zollinger Halle Ludwigsburg	D	
2002 - 07	Toyota "Bubble" Paris	F	
2002 - 08	Elisabethinum Axams	A	
2002 - 09	Masoala Regenwald Dachhülle	CH	
2002 - 10	Masoala Regenwald Giebelfassaden	CH	
2002 - 11	Bürogebäude Riem	D	
2002 - 12	Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU)	D	einlagig, mech. vorgespannt
2002 - 13	Solbad Revierpark Vonderort	D	
2002 - 14	Kapuziner Karreé	D	
2002 - 15	Sonnenkollektor BSR	D	einlagig, mech. vorgespannt
2002 - 16	Villaban Freiburg	D	
2002 - 17	Atrium Papendorpsweg Utrecht	NL	
2002 - 18	Emma-Jäger-Bad Pforzheim	D	
2002 - 19	Cultureel Educatief Centrum Ganzenhoef Amsterdam	NL	
2002 - 20	Kings College Hospital London	GB	
2002 - 21	Sonderschule Garbsen	D	
2002 - 22	Vordach Hotel Graf Eberhard	D	einlagig, mech. vorgespannt

## ETFE-Folie als Tragelement

---

### 2003

2003 - 01	Königliches Finanzministerium (HM Treasury) London	GB	
2003 - 02	Metro Centre Gateshead	GB	
2003 - 03	Festo Technologiezentrum Paris	F	
2003 - 04	South Cambridge District Council	GB	
2003 - 05	"Gießhalle" Landschaftspark Nord Duisburg	D	
2003 - 06	Freizeitbad Sonneberg	D	
2003 - 07	Sahara Star Hotel Mumbai	IND	
2003 - 08	Vordach Terminal 2 - Flughafen München MUC	D	
2003 - 09	Ganzjahresbad "Elypso"	D	
2003 - 10	Time Warner Building	USA	
2003 - 11	Geschäftshaus Rauch	A	
2003 - 12	Kingsdale School London	GB	
2003 - 13	GTZ Bad Tölz	D	einlagig, mech. vorgespannt
2003 - 14	New Oxford Nuffield Hospital	GB	
2003 - 15	Waschanlage "Car Royal" Berlin	D	einlagig, mech. vorgespannt
2003 - 16	Tanaka Business School London	GB	
2003 - 17	Schmetterlingshaus "Papiliorama"	CH	
2003 - 18	"Pinas" Den Helder	NL	
2003 - 19	Walkway BMW München	D	
2003 - 20	Pneumatic protection for a monastery model	E	Traglufthalle

### 2004

2004 - 01	RTL II München	D	
2004 - 02	Komodowaranhaus Zoo London	GB	
2004 - 03	Cosmos Saarbrücken	D	
2004 - 04	Kristall Palm Beach (Umbau) Stein	D	
2004 - 05	Orang-Utan-Haus Tierpark Hagenbeck Hamburg	D	
2004 - 06	Shopping Mall Punta Langosta	MEX	
2004 - 07	Art Center College of Design Pasadena	USA	
2004 - 08	Tankstelle Germering	D	
2004 - 09	Tankstelle Georg-Brauchle-Ring	D	
2004 - 10	Tankstelle Gilching	D	
2004 - 11	Amsterdam Arena	NL	einlagig, mech. vorgespannt
2004 - 12	Schuifdak	NL	einlagig, mech. vorgespannt
2004 - 13	Frankenalbtherme Bad Hersbruck	D	
2004 - 14	Trichterschirme IHK Würzburg	D	einlagig, mech. vorgespannt
2004 - 15	Oval am Basler Platz	D	
2004 - 16	Dom Aquaree – Hotelatrium	D	
2004 - 17	Dom Aquaree – Atrium Bürogebäude	D	
2004 - 18	Dom Aquaree – Shopping Mall	D	
2004 - 19	Fussball Globus WM 2006 <sup>®</sup>	D	
2004 - 20	Stratford & Ebbsfleet Stations London	GB	
2004 - 21	Festo Budapest	H	
2004 - 22	IASON Graz	A	einlagig, mech. vorgespannt
2004 - 23	Fachbereich Biowissenschaften TUM	D	
2004 - 24	Jean-Paul-Therme Bad Steben	D	
2004 - 25	South East Essex College	GB	einlagig, mech. vorgespannt
2004 - 26	Messestand Schwing, BAUMA 2004	D	
2004 - 27	Garden of Eden Biome Link Conapy	GB	einlagig, mech. vorgespannt
2004 - 28	Weserberglandtherme Bad Karlshafen	D	

### 2005

2005 - 01	Allianz Arena	D	
2005 - 02	AWD Arena	D	einlagig, mech. vorgespannt
2005 - 03	IABG Ottobrunn	D	
2005 - 04	"Tropical Island"	D	
2005 - 05	Scene Fluglabor Holzkirchen- Pnehülle	D	



2005 - 06	Scene Fluglabor Holzkirchen- Vordach	D	einlagig, mech. vorgespannt
2005 - 07	Messturm Landshut	D	einlagig, mech. vorgespannt
2005 - 08	Føsilo Kopenhagen (Seed Silos)	DK	
2005 - 09	Swinburne University Melbourne	AUS	
2005 - 10	Jean Paul Gaultier Paris	F	
2005 - 11	Shopping Mall Athen – "The Mall"	GR	
2005 - 12	Schlumberger Research Centre Cambridge	GB	
2005 - 13	Jugendherberge Kiel	D	
2005 - 14	Johannisbad Freiberg	D	
2005 - 15	Kindertagesstätte "Plappersnut" Wismar	D	
2005 - 16	"Atlantis" Aquapark Ljubljana	SLO	
2005 - 17	"Gerdauring 25" Hamburg	D	
2005 - 18	"HafenCity" Hamburg	D	
2005 - 19	Kensington City Academy Liverpool	GB	
2005 - 20	Festo "Brennstoffzelle" Rohrbach	D	
2005 - 21	Hauptschule Xanten	D	
2005 - 22	Allwetterbad Lintorf	D	
2005 - 23	Learning Centre Southampton	GB	
2005 - 24	Duxford Airspace Museum	GB	
2005 - 25	Straßenmeisterei Ansfelden	A	
2005 - 26	"Vitamar" Kleinostheim (Neubau)	D	
2005 - 27	"Alnwick Garden" - Pavilion and Visitor Centre	GB	
2005 - 28	Regionalbad Rheinwelle Bingen	D	
2005 - 29	Presse-Pavillon Berlin	D	u.a einlagig, mech. vorgespannt
2005 - 30	Mauerseglerbauten	CH	
2005 - 31	Euroborg-Stadion Groningen	NL	einlagig, mech. vorgespannt
2005 - 32	Kristalltherme Ludwigsfelde	D	
2005 - 33	Dolphin Centre Romford	GB	
<b>2006</b>			
2006 - 01	Clarke Quay Canopies	SGP	Schirmrand mech. vorgespannt
2006 - 02	Southern Cross Station Melbourne	AUS	
2006 - 03	Olympia-Schwimmstadion München	D	Oberlage, schlaff
2006 - 04	Bundestagsarena Berlin	D	einlagig, mech. vorgespannt
2006 - 05	Membrankissenversuchsstand IBP	D	
2006 - 06	Gastankstelle Linde AG	D	
2006 - 07	Meilenwerk Düsseldorf	D	
2006 - 08	Islazul Centro Commercial	E	
2006 - 09	National Olympic Stadium "Birdnest" Beijing, Fertigstellung 2008	CN	einlagig, mech. vorgespannt
2006 - 10	National Olympic Swimming Centre Beijing, Fertigstellung 2008	CN	

Tab. A 2 Projekte 1980 bis 2006 (chronologisch, nach Jahrgängen geordnet) (Jahr der Fertigstellung, Projektbezeichnung, Land (Staat) und ggf. Anmerkungen zur Vorspannungsart)

**1980 - 01      ETFE-Dom**

Standort	3. Internationales Sonnenforum Hamburg 1980
Fertigstellung	<b>1980</b>
Bauherr	H. u. J. Kleinwächter, Bomin Solar, Lörrach (D)
Architekt	
TWPL	
Membranstatik	H. Koch, Koit/Koch Hightex, Rimsting (D)
Membranbau	H. Koch, Koit/Koch Hightex, Rimsting (D)
ETFE-Folie	einlagig, mech. vorgespannt (100 – 150 µm)
Feldgröße	Seilabstand ca. 0,8 m, Feldlänge ca. 16 m
Gesamtfläche	Durchmesser ca. 14 m, Höhe ca. 14 m
Anwendung	Einhausung und Beschichtung Parabolspiegel

**1980 - 02      ETFE-Kugel**

Standort	3. Internationales Sonnenforum Hamburg 1980
Fertigstellung	<b>1980</b>
Bauherr	
Architekt	
TWPL	
Membranstatik	H. Koch, Koit/Koch Hightex, Rimsting (D)
Membranbau	H. Koch, Koit/Koch Hightex, Rimsting (D)
ETFE-Folie	einlagig, mechanisch vorgespannt (150 µm)
Feldgröße	
Gesamtfläche	
Anwendung	Einhausung Parabolspiegel

**1982 - 01      Mangrovenhalle Burger's Park Arnheim**

Standort	Arnheim (NL)
Fertigstellung	<b>1982</b>
Bauherr	Zoo Arnheim (NL)
Architekt	ABT, Arnheim (NL)
TWPL	Dr. Grotkop und Partner, Bremen (D)
Membranstatik	Dr. Grotkop und Partner, Bremen (D)
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig (o/m/u: 150 / 50 / 90 µm)
Feldgröße	ca. 3 m x 5 m = ca. 15 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	ca. 800 m <sup>2</sup> , überd. Fläche: 15 x 50 = ca. 750 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hallendach, Botanischer Garten

**1984 - 01      Phänomena Dome**

Standort	Zürich (CH)
Fertigstellung	<b>1984</b>
Bauherr	Muller Events
Architekt	Häring + Co. KG, Pratteln (CH)
TWPL	Häring + Co. KG, Pratteln (CH)
Membranstatik	
Membranbau	Koit / Koch Hightex GmbH, Rimsting (D)
ETFE-Folie	
Feldgröße	
Gesamtfläche	
Anwendung	Hallendach, Ausstellungsgebäude

<b>1985 - 01</b>	<b>Nord LB Niedersachsenpavillon</b>	Standort	Hannover Messegelände (D)
		Fertigstellung	<b>1985</b>
		Bauherr	Nord LB, Hannover (D), Wirtschaftsministerium Niedersachsen, Hannover (D)
		Architekt	
		TWPL	
		Membranstatik	
		Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
		ETFE-Folie	Pneus, zweilagig (o/u: 100 / 100 µm)
		Feldgröße	3 m x 6 m = ca. 18 m <sup>2</sup>
		Gesamtfläche	ca. 960 m <sup>2</sup> , überdachte Fläche: ca. 394 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Hallendach, Ausstellung, temporär
<b>1986 - 01</b>	<b>Hallenbad im Bungalow Park Het Heijderbos</b>	Standort	Hommersumseweg, Heijen (NL)
		Fertigstellung	<b>1986</b>
		Bauherr	
		Architekt	
		TWPL	
		Membranstatik	
		Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
		ETFE-Folie	
		Feldgröße	
		Gesamtfläche	ca. 3.600 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Hallendach, Schwimmbad
<b>1988 - 01</b>	<b>Tropenhalle Burger's Park Arnheim</b>	Standort	Arnheim (NL)
		Fertigstellung	<b>1988</b>
		Bauherr	Zoo Arnheim (NL)
		Architekt	ABT, Arnheim (NL)
		TWPL	Dr. Grotkop und Partner, Bremen (D)
		Membranstatik	Dr. Grotkop und Partner, Bremen (D)
		Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
		ETFE-Folie	Pneus, dreilagig (o/m/u: 150 / 30 / 100 mm) Pneunennendruck 300 – 500 Pa
		Feldgröße	ca. 3 m x 6 m = 18 m <sup>2</sup> (765 Dachsegmente)
		Gesamtfläche	ca. 13.770 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Hallendach, Botanischer Garten
<b>1990 - 01</b>	<b>Chelsea and Westminster Hospital</b>	Standort	Fulham Road, London (GB)
		Fertigstellung	<b>1990</b>
		Bauherr	North West Thames Reg. Health Auth. (GB)
		Architekt	Shepherd, Robson, Waterman Arch. (GB)
		TWPL	Buro Happold, Bath (GB)
		Membranstatik	Dr. Grotkop und Partner, Bremen (D)
		Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
		ETFE-Folie	Pneus, dreilagig (o/m/u: 200/30/150 µm)
		Feldgröße	ca. 4 m x 3 m = ca. 12 m <sup>2</sup>
		Gesamtfläche	ca. 4.200 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Atriumdach, Klinikgebäude

**1980er - 01 Versuchsgewächshaus in Stuttgart Hohenheim**

Standort	Stuttgart Hohenheim (D)
Fertigstellung	<b>Mitte bis Ende der 80er Jahre</b>
Bauherr	Univ. Hohenheim, Staatsschule f. Gartenb. (D)
Architekt	
TWPL	
Membranstatik	
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	Pneus, mehrlagig
Feldgröße	
Gesamtfläche	
Anwendung	Hallendach, Gewächshaus

**1980er - 02 Halle in Winsen an der Luhe**

Standort	Winsen an der Luhe (D)
Fertigstellung	<b>Mitte bis Ende der 80er-Jahre</b>
Bauherr	
Architekt	
TWPL	
Membranstatik	
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	Pneus, mehrlagig
Feldgröße	
Gesamtfläche	
Anwendung	Hallendach, z.B. Lager, Gewächshaus, etc.

**1980er - 03 Fischzuchtanlage in Niederaußem**

Standort	Braunkohlekraftwerk Niederaußem (D)
Fertigstellung	<b>Mitte bis Ende der 80er-Jahre</b>
Bauherr	Rheinisch-Westfälische Elektrizitätswerke (D)
Architekt	
TWPL	
Membranstatik	
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig (o/m/u: 150/30/100 µm)
Feldgröße	3,2 m x 32 m = ca. 102 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	3 Felder (nur Nordseite): ca. 307 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hallendach, Fischzuchtanlage

**1980er - 04 Solarer Speicherkollektor "Solar Gold 2000"**

Standort	Lörrach
Fertigstellung	<b>Mitte bis Ende der 80er-Jahre</b>
Bauherr	Bomin Solar Research, Lörrach (D)
Architekt	Bomin Solar Research, Lörrach (D)
TWPL	Bomin Solar Research, Lörrach (D)
Membranstatik	Koit / Koch Hightex, Rimsting (D)
Membranbau	Koit / Koch Hightex, Rimsting (D)
ETFE-Folie	Folien, mechanisch gespannt, dreilagig
Feldgröße	Breite 1,2 m, Höhe 0,4 m, Länge 2 bis 14 m
Gesamtfläche	
Anwendung	Modulhülle, Solarkollektor

**1980er - 05 Freizeitbad Sherwoodforrest**

Standort	Sherwoodforrest (GB)
Fertigstellung	<b>Mitte bis Ende der 80er Jahre</b>
Bauherr	
Architekt	
TWPL	
Membranstatik	Dr. Grotkop und Partner, Bremen (D)
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	
Feldgröße	
Gesamtfläche	
Anwendung	Hallendach, Schwimmbad

**1980er - 06 Freizeitzentrum Gennep**

Standort	Gennep (NL)
Fertigstellung	<b>Mitte bis Ende der 80er Jahre</b>
Bauherr	Sporthuis Centrum, Rotterdam (NL)
Architekt	
TWPL	
Membranstatik	Dr. Grotkop und Partner, Bremen (D)
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig (150 / 30 /100 µm), Pneunennendruck 200 – 500 Pa
Feldgröße	Kantenlänge der Dreiecke ca. 6 m
Gesamtfläche	ca. 3.250 m <sup>2</sup> , Kuppeldurchm.: 75 m, H = 30 m
Anwendung	Hallendach, Schwimmbad

**1980er - 07 Freizeitzentrum NL**

Standort	(NL)
Fertigstellung	<b>Mitte bis Ende der 80er Jahre</b>
Bauherr	
Architekt	
TWPL	
Membranstatik	
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	
Feldgröße	
Gesamtfläche	
Anwendung	Hallendach, Schwimmbad

**1980er - 08 Radioteleskop "Plateau de Burre"**

Standort	Pl. De Burre (2.550 m ü. NN), Grenoble (CH)
Fertigstellung	<b>Mitte bis Ende der 80er Jahre</b>
Bauherr	MAN Technologie GmbH, München (D)
Auftraggeber	IRAM – Institut für Radioastronomie (D)
TWPL	keine
Membranstatik	keine
Membranbau	Koit / Koch Hightex GmbH, Rimsting (D)
ETFE-Folie	Pneus, einlagig, 30 µm, metallbedampft
Feldgröße	ca. 216 m <sup>2</sup> , Teilsegmente zw. 0,7 u. 1,7 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	Durchmesser Teleskop: ca. 15 m
Anwendung	ETFE-beschicht. Radioteleskop alu-bedampft

**1992 - 01      Pressezentrum Weltwirtschaftsgipfel (WWG)**

Standort	München (D)
Fertigstellung	<b>1992</b>
Bauherr	Bundespresseamt
Architekt	Ulrich Lippsmeier, Starnberg (D)
TWPL	Posselt Consult, Übersee/Chiemsee (D)
Membranstatik	Tensys Ltd., Bath (GB)
Membranbau	Koit / Koch Hightex GmbH, Rimsting (D)
ETFE-Folie	Pneus, zweilagig (o/u: 150/150 µm)
Feldgröße	ca. 17 m x 5 m = ca. 85 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	ca. 42 m x 85 m = ca. 3.600 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hallendach, temporäres Pressezentrum (5. - 8. Juli 1992, danach Nutzung als Lagerhalle Koit)

**1992 - 02      “Galerie am Park“**

Standort	Messehalle 14 A, Messe München (D)
Fertigstellung	<b>1992</b>
Bauherr	Messe München GmbH
Architekt	W.N.S. Product Design GmbH
TWPL	Posselt Consult
Membranstatik	Tensys Ltd., Bath (GB)
Membranbau	Koit / Koch Hightex GmbH, Rimsting (D)
ETFE-Folie	nur Außenlage (200 µm)
Feldgröße	
Gesamtfläche	ca. 3.000 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hallendach, Außenlage, Ausstellung, temporär

**1992 - 03      “Aqualand“ Köln**

Standort	Köln
Fertigstellung	<b>1992</b>
Bauherr	Aqualand Freizeitbad GmbH (D)
Architekt	Bode, Kassel (D)
TWPL	Dr. Grotkop und Partner, Bremen (D)
Membranstatik	Dr. Grotkop und Partner, Bremen (D)
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig
Feldgröße	kurze Spannweite max. ca. 3,50 m
Gesamtfläche	ca. 1.750 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hallendach, Schwimmbad

**1992 - 04      Inselbad “Bahía“**

Standort	Bocholt (D)
Fertigstellung	<b>1992</b>
Bauherr	Stadtwerke Bocholt (D)
Architekt	H. Schick u. Partner, Karlsruhe (D)
TWPL	Gaumnitz u. Bauerochse, Köln / Aachen (D)
Membranstatik	Dr. Grotkop und Partner, Bremen (D)
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	dreilagig, Pneus
Feldgröße	ca. 25 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	ca. 2.500 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hallendach, Schwimmbad

<b>1993 - 01</b>	<b>Wüstenhalle Burger's Park Arnheim</b>	Standort	Arnheim (NL)
		Fertigstellung	<b>1993</b>
		Bauherr	Zoo Arnheim (NL)
		Architekt	ABT, Arnheim (NL)
		TWPL	
		Membranstatik	
		Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
		ETFE-Folie	Pneus, dreilagig
		Feldgröße	
		Gesamtfläche	ca. 6.000 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Hallendach, Botanischer Garten
<b>1993 - 02</b>	<b>Elefantenhaus Zoo Münster</b>	Standort	Allwetterzoo Münster, Sentruper Straße, Münster (D)
		Fertigstellung	<b>1993</b>
		Bauherr	Zoologischer Garten Münster
		Architekt	Dipl.-Ing. Hand Ostendorf, Münster (D)
		TWPL	Dr. Grotkop und Partner, Bremen (D)
		Membranstatik	Dr. Grotkop und Partner, Bremen (D)
		Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
		ETFE-Folie	Pneus, dreilagig
		Feldgröße	
		Gesamtfläche	ca. 750 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Hallendach, Tiergehege
<b>1993 - 03</b>	<b>Erlebnisbad "Basso"</b>	Standort	Bad Schmiedeberg (D)
		Fertigstellung	<b>1993</b>
		Bauherr	
		Architekt	Behrmann Consult, Hagen (D)
		TWPL	Dr. Grotkop und Partner, Bremen (D)
		Membranstatik	Dr. Grotkop und Partner, Bremen (D)
		Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
		ETFE-Folie	Pneus, dreilagig
		Feldgröße	
		Gesamtfläche	ca. 1.050 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Hallendach, Schwimmbad
<b>1993 - 04</b>	<b>Sheddach Huttwil</b>	Standort	Huttwil (CH)
		Fertigstellung	<b>1993</b>
		Bauherr	
		Architekt	
		TWPL	
		Membranstatik	
		Membranbau	Texlon International GmbH, Giswil (CH)
		ETFE-Folie	einlagig, mech. vorgespannt
		Feldgröße	
		Gesamtfläche	
		Anwendung	Hofüberdachung, Lagerhallen

<b>1994 - 01</b>	<b>Messestand "Tankstelle von Morgen"</b>	Standort	Messe Automechanika, Frankfurt (D)
		Fertigstellung	<b>1994</b>
		Bauherr	Kleindienst Waschanlagen, Augsburg (D)
		Architekt	Wolfgang Nikolaus Schmidt, Wiesbaden (D)
		TWPL	IF Ingenieurgem. Flächentragw., Radolfzell (D)
		Membranstatik	IF Ingenieurgem. Flächentragw., Radolfzell (D)
		Membranbau	Strohmeier & Wagner, Konstanz (D)
		ETFE-Folie	Mech. vorgesp. Folie, einlagig
		Feldgröße	$d_{\text{Ring}} = \text{ca. } 6 \text{ m}$ , $t_{\text{Ring}} = \text{ca. } 3,8 \text{ m}$
		Gesamtfläche	ca. 800 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Überdachung/Vordach, Ausstellung, temporär
<b>1994 - 02</b>	<b>Raubtierhaus Hellabrunn</b>	Standort	Tierpark Hellabrunn, München (D)
		Fertigstellung	<b>1994</b>
		Bauherr	Münchener Tierpark Hellabrunn, München (D)
		Architekt	Herbert Kochta, München (D)
		TWPL	Schlaich, Bergermann u. Partner, Stuttgart (D)
		Membranstatik	IPL, Radolfzell (D), Schlaich, Bergermann u. Partner, Stuttgart (D)
		Membranbau	Koit / Koch Hightex GmbH, Rimsting (D)
		ETFE-Folie	Pneus, zweilagig
		Feldgröße	max. Spannweite 2 m (untere Lage 2 m x 2 m)
		Gesamtfläche	ca. 2.000 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Hallendach auf Seilnetz, Tiergehege
<b>1994 - 03</b>	<b>1994 - 03</b>	Standort	München (D)
		Fertigstellung	<b>1994</b>
		Bauherr	Mimesis Atelier, München (D)
		Architekt	Peter Haimerl, München (D)
		TWPL	
		Membranstatik	Tensys Ltd., Bath (GB)
		Membranbau	Koit / Koch Hightex GmbH, Rimsting (D)
		ETFE-Folie	
		Feldgröße	
		Gesamtfläche	ca. 150 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Fassade, Atelier
<b>1994 - 04</b>	<b>Gerry Weber Centre Court</b>	Standort	Halle / Westfalen (D)
		Fertigstellung	<b>1994</b>
		Bauherr	Sportpark Halle GmbH, Halle (D)
		Architekt	Dach: S., B. & P., Stuttgart (D)
		TWPL	Schlaich, Bergermann u. Partner, Stuttgart (D)
		Membranstatik	Tensys Ltd., Bath (GB)
		Membranbau	Pneus: Koit / Koch Hightex GmbH, Rimsting (D)
		ETFE-Folie	Pneus, zweilagig
		Feldgröße	5,5 m x 32 m = ca. 176 m <sup>2</sup>
		Gesamtfläche	2 x 700 m <sup>2</sup> = ca. 1.400 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Hallendach (Tennis-)Stadion, verfahrbar



<b>1994 – 05</b>	<b>Mercedes Benz Niederlassung Magdeburg</b>	Standort	Magdeburg (D)
		Fertigstellung	<b>1994 (Sanierung 2000)</b>
		Bauherr	Mercedes Benz, NL Magdeburg (D)
		Architekt	Mercedes Benz, NL Magdeburg (D)
		TWPL	
		Membranstatik	
		Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
		ETFE-Folie	Pneus
		Feldgröße	
		Gesamtfläche	ca. 1.400 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Oberlichte Geschäftsgebäude
<b>1995 - 01</b>	<b>ZDF Mediadrom</b>	Standort	Messe München (D)
		Fertigstellung	<b>1995</b>
		Bauherr	Mediadrom GmbH (Beteiligung ZDF)
		Architekt	Wolfgang Nikolaus Schmidt, Wiesbaden (D)
		TWPL	IF Ingenieurgem. Flächentragw., Radolfzell (D)
		Membranstatik	IF Ingenieurgem. Flächentragw., Radolfzell (D)
		Membranbau	Poly-Nederland (Polyned) BV (NL)
		ETFE-Folie	Mech./pneum. vorgesp. Folie auf Seilnetz
		Feldgröße	ca. 30 m x 6 m = 180 m <sup>2</sup> , 1 m Maschenweite
		Gesamtfläche	3 x 180 m <sup>2</sup> = ca. 540 m <sup>2</sup> (Fenster seilnetzverst.)
Anwendung	Tragluft Halle, Ausstellung, temporär		
<b>1995 - 02</b>	<b>Freizeitbad Vegesack</b>	Standort	Bremen Vegesack
		Fertigstellung	<b>1995</b>
		Bauherr	
		Architekt	
		TWPL	
		Membranstatik	Dr. Grotkop und Partner, Bremen (D)
		Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
		ETFE-Folie	
		Feldgröße	
		Gesamtfläche	
Anwendung	Hallendach, Schwimmbad		
<b>1995 - 03</b>	<b>MCC Lord's Shop</b>	Standort	London (GB)
		Fertigstellung	<b>1995</b>
		Bauherr	
		Architekt	David Morley Architects (GB)
		TWPL	
		Membranstatik	
		Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
		ETFE-Folie	
		Feldgröße	
		Gesamtfläche	ca. 240 m <sup>2</sup>
Anwendung	Oberlichte, Ladengeschäft		

<b>1995 - 04</b>	<b>Resort Centre Nansei</b>	Standort	Mei (J)
		Fertigstellung	<b>1995</b>
		Bauherr	Intermedia
		Architekt	Professor Kikutake
		TWPL	
		Membranstatik	Tensys Ltd., Bath (GB)
		Membranbau	Koito / Koch Hightex GmbH, Rimsting (D)
		ETFE-Folie	Pneus, mehrlagig
		Feldgröße	
		Gesamtfläche	ca. 500 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Atriumdach, Sportstätte (Yachtclub)
<b>1995 - 05</b>	<b>Oberlichte Nowofol Werk II</b>	Standort	Nowofol Werk II, Siegsdorf (D)
		Fertigstellung	<b>1995</b>
		Bauherr	Nowofol GmbH & Co. KG, Siegsdorf (D)
		Architekt	Lechner + Lechner Architekten, Traunstein (D)
		TWPL	
		Membranstatik	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
		Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
		ETFE-Folie	zweilagige Pneus, 200 / 200 µm
		Feldgröße	ca. 10 m x 2 m = 20 m <sup>2</sup>
		Gesamtfläche	ca. 200 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Oberlichte, Betriebsgebäude
<b>1995 - 06</b>	<b>Schwimmbad Teistungen</b>	Standort	Klosterweg, Teistungen (D)
		Fertigstellung	<b>1995</b>
		Bauherr	
		Architekt	
		TWPL	
		Membranstatik	Dr. Grotkop und Partner, Bremen (D)
		Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
		ETFE-Folie	
		Feldgröße	
		Gesamtfläche	ca. 400 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Hallendach, Schwimmbad
<b>1995 - 07</b>	<b>Valencia Ozone Research Labs EUPHORE</b>	Standort	CEAM Parque de Technologies, Valencia (E)
		Fertigstellung	<b>1995</b>
		Bauherr	La Fundación Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo (E)
		Architekt	
		TWPL	
		Membranstatik	
		Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
		ETFE-Folie	einlagig, Traglufthalle
		Feldgröße	
		Gesamtfläche	ca. 130 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Traglufthalle, Laborgebäude

<b>1995 - 08</b>	<b>Nowofol Vordach Entrée</b>	Standort	Nowofol Werk II, Siegsdorf (D)
		Fertigstellung	<b>1995</b>
		Bauherr	Nowofol GmbH & Co. KG, Siegsdorf (D)
		Architekt	Lechner + Lechner Architekten, Traunstein (D)
		TWPL	
		Membranstatik	Koit / Koch Hightex GmbH, Rimsting (D)
		Membranbau	Koit / Koch Hightex GmbH, Rimsting (D)
		ETFE-Folie	zweilagiges Pneu, 200 / 200 µm
		Feldgröße	Untere Lage auf Gitterrost ca. 80 cm x 80 cm
		Gesamtfläche	ca. 15 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Vordach Betriebsgebäude
<b>1996 - 01</b>	<b>Kur- &amp; Familienbad Tabarz</b>	Standort	Schwimmbadweg, Tabarz (D)
		Fertigstellung	<b>1996</b>
		Bauherr	
		Architekt	Behrmann Consult, Hagen (D)
		TWPL	
		Membranstatik	
		Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
		ETFE-Folie	
		Feldgröße	
		Gesamtfläche	ca. 1.080 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Hallendach, Schwimmbad
<b>1996 - 02</b>	<b>Festo Pnehalle "Airtecture"</b>	Standort	Esslingen-Berkheim (D)
		Fertigstellung	<b>1996</b>
		Bauherr	Festo KG, Esslingen (D)
		Architekt	Festo KG, Esslingen (D)
		TWPL	Festo KG, Esslingen (D)
		Membranstatik	Tensys Ltd., Bath (GB)
		Membranbau	Koit / Koch Hightex GmbH, Rimsting (D)
		ETFE-Folie	Pneus (Folienfenster)
		Feldgröße	ca. 0,5 m x 10 m = 5 m <sup>2</sup>
		Gesamtfläche	ca. 360 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Oberlichte und Fenster, Ausstellung
<b>1996 - 03</b>	<b>Hampshire Tennis &amp; Health Centre (HTCH)</b>	Standort	Eastleigh, Southampton (GB)
		Fertigstellung	<b>1996</b>
		Bauherr	Hampshire Tennis & Health Club (GB)
		Architekt	Euan Borland & Associates (GB)
		TWPL	Buro Happold, Bath (GB)
		Membranstatik	
		Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
		ETFE-Folie	Folienbahnen auf Seilschar
		Feldgröße	
		Gesamtfläche	ca. 6.000 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Hallendach (inner layer), Sportstätte (Tennis)

**1996 - 04      Elefantenhaus Zoo Duisburg**

Standort	Zoo Duisburg, Duisburg (D)
Fertigstellung	<b>1996</b>
Bauherr	Zoo Duisburg AG, Duisburg (D)
Architekt	Peter Rasbach, Oberhausen (D)
TWPL	Posselt Consult, Übersee/Chiemsee (D)
Membranstatik	Tensys Ltd., Bath (GB)
Membranbau	Koit / Koch Hightex GmbH, Rimsting (D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig, max d = 200 µm, Hubpneu
Feldgröße	runde Pneus: ∅ 2 x 4.850 mm, 1 x 2.650 mm
Gesamtfläche	ca. 130 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hallendach, Tiergehege

**1996 - 05      Schildkrötenhaus im Tierpark Hellabrunn**

Standort	Tierpark Hellabrunn, München (D)
Fertigstellung	<b>1996</b>
Bauherr	Münchener Tierpark Hellabrunn AG, München (D)
Architekt	Herbert Kochta, München (D)
TWPL	
Membranstatik	Tensys Ltd., Bath (GB)
Membranbau	Koit / Koch Hightex GmbH, Rimsting (D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig
Feldgröße	
Gesamtfläche	ca. 300 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hallendach, Tiergehege

**1996 - 06      Georg-Arnold-Bad**

Standort	Dresden (D)
Fertigstellung	<b>1996</b>
Bauherr	Stadt Dresden (D)
Architekt	Planungsgruppe Bad (D)
TWPL	Schneider (D)
Membranstatik	
Membranbau	Koit / Koch Hightex GmbH, Rimsting (D)
ETFE-Folie	
Feldgröße	
Gesamtfläche	ca. 1.400 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hallendach, Schwimmbad

**1996 - 07      Kristall Kur- & Freizeitbad Bad Klosterlausnitz**

Standort	Bad Klosterlausnitz (D)
Fertigstellung	<b>1996</b>
Bauherr	Gemeinde Bad Klosterlausnitz (D)
Architekt	David & Strobilius (D)
TWPL	
Membranstatik	Tensys Ltd., Bath (GB)
Membranbau	Koit / Koch Hightex GmbH, Rimsting (D)
ETFE-Folie	
Feldgröße	
Gesamtfläche	ca. 2.500 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hallendach, Schwimmbad

<b>1996 - 08</b>	<b>Hublinse im Olympia Park (MOG) München</b>	Standort	München (D)
		Fertigstellung	<b>1996</b>
		Bauherr	Olympia Park München, München (D)
		Architekt	Behnisch & Partner, Stuttgart (D)
		TWPL	Posselt Consult, Übersee/Chiemsee (D)
		Membranstatik	Tensys Ltd., Bath (GB)
		Membranbau	Koit / Koch Hightex GmbH, Rimsting (D)
		ETFE-Folie	Unterlage auf Seilnetz, Hostafilon ET 200 µm
		Feldgröße	ca. 450 m <sup>2</sup> (Unterlage auf Seilnetz, Hubpneu)
		Gesamtfläche	ca. 450 m <sup>2</sup>
	Anwendung	Hofüberdachung, Betriebsgebäude	
<b>1996 - 09</b>	<b>“Aquarell“ Haltern</b>	Standort	Haltern am See (D)
		Fertigstellung	<b>1996</b>
		Bauherr	Stadtwerke Haltern
		Architekt	Scheibenpflug & Kummetat, Gelsenkirchen (D)
		TWPL	
		Membranstatik	Tensys Ltd., Bath (GB)
		Membranbau	Koit / Koch Hightex GmbH, Rimsting (D)
		ETFE-Folie	Pneus
		Feldgröße	
		Gesamtfläche	ca. 135 m <sup>2</sup>
	Anwendung	Hallendach, Schwimmbad	
<b>1996 - 10</b>	<b>Walkway Messe “Pneumatics“</b>	Standort	Messegelände, Hannover (D)
		Fertigstellung	<b>1996</b>
		Bauherr	Messe Hannover
		Architekt	Herzog + Partner, München (D)
		TWPL	Mero GmbH & Co. KG (D)
		Membranstatik	Tensys Ltd., Bath (GB)
		Membranbau	Skyspan Europe GmbH, Rimsting (D)
		ETFE-Folie	
		Feldgröße	
		Gesamtfläche	ca. 630 m <sup>2</sup>
	Anwendung	Vordach Walkway, Ausstellung, temporär	
<b>1996 - 11</b>	<b>Jüdisches Museum</b>	Standort	Wien (A)
		Fertigstellung	<b>1996</b>
		Bauherr	Ekazent
		Architekt	Eichinger & Knechtl, Wien (A)
		TWPL	
		Membranstatik	Tensys Ltd., Bath (GB)
		Membranbau	Skyspan Europe GmbH, Rimsting (D)
		ETFE-Folie	Pneus und Unterhängdecke
		Feldgröße	
		Gesamtfläche	ca. 88 m <sup>2</sup>
	Anwendung	Hofüberdachung, Ausstellung	

**1996 - 12 Delphinarium Zoo Duisburg**

Standort	Zoo Duisburg, Duisburg (D)
Fertigstellung	<b>1996</b>
Bauherr	Zoo Duisburg AG, Duisburg (D)
Architekt	Peter Rasbach, Oberhausen (D)
TWPL	Posselt Consult, Übersee/Chiemsee (D)
Membranstatik	Tensys Ltd., Bath (GB)
Membranbau	Skyspan Europe GmbH, Rimsting (D)
ETFE-Folie	Pneus
Feldgröße	
Gesamtfläche	ca. 400 m <sup>2</sup>
Anwendung	Oberlichte, Tiergehege (Delphinarium)

**1997 - 01 Wellenbad "Miramar"**

Standort	Weinheim (D)
Fertigstellung	<b>1996 und 1997</b>
Bauherr	Miramar, Weinheim (D)
Architekt	Kist
TWPL	Häring + Co. KG, Pratteln (CH)
Membranstatik	Tensys Ltd., Bath (GB)
Membranbau	Koit / Koch Hightex GmbH, Rimsting (D)
ETFE-Folie	Pneu, dreilagig
Feldgröße	max. 65 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	ca. 2.200 m <sup>2</sup> (Dach), ca. 600 m <sup>2</sup> (Anbau)
Anwendung	Hallendach, Schwimmbad

**1997 - 02 Cumberland Infirmary**

Standort	Carlisle (GB)
Fertigstellung	<b>1997</b>
Bauherr	
Architekt	Llewelyn Davis Weeks Architects, London (GB)
TWPL	
Membranstatik	
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	
Feldgröße	
Gesamtfläche	ca. 1.000 m <sup>2</sup>
Anwendung	Atriumdach, Klinikgebäude

**1997 - 03 Siemens Deckelhalle**

Standort	Siemens Deckelhalle, München (D)
Fertigstellung	<b>1997</b>
Bauherr	Siemens Design u. Messe GmbH, München (D)
Architekt	Herzog + Partner, München (D), José-Luis Moro, Stuttgart (D), Bauer & Partner (D)
TWPL	
Membranstatik	Tensys Ltd., Bath (GB)
Membranbau	Koit / Koch Hightex GmbH, Rimsting (D)
ETFE-Folie	ETFE-Folie, girlandenförmig angehängt
Feldgröße	
Gesamtfläche	ca. 1.150 m <sup>2</sup>
Anwendung	Innenanwendung (Klimahülle), Bürogebäude

**1997 - 04 ZDF-Fernsehgarten**

Standort	Mainz (D)
Fertigstellung	<b>1997</b>
Bauherr	ZDF
Architekt	Albert-Speer & Partner, Frankfurt/Main (D)
TWPL	Bollinger + Grohmann, Frankfurt/Main (D) / Posselt Consult, Übersee/Chiemsee (D)
Membranstatik	Tensys Ltd., Bath (GB)
Membranbau	Koit / Koch Hightex GmbH, Rimsting (D)
ETFE-Folie	Pneus, zweilagig (o/u: 200/200 µm)
Feldgröße	max. ca. 25 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	ca. 1.000 m <sup>2</sup>
Anwendung	Überdachung Freianlagen, Fernsehstudio

**1998 - 01 Freizeitbad "Ana Mare"**

Standort	Geyer (D)
Fertigstellung	<b>1998</b>
Bauherr	Freizeit GmbH Geyer, Geyer (D)
Architekt	Waldvogel (D)
TWPL	
Membranstatik	Tensys Ltd. Bath (GB)
Membranbau	Skyspan Europe GmbH, Rimsting (D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig
Feldgröße	
Gesamtfläche	ca. 850 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hallendach, Schwimmbad

**1998 - 02 Orange Operations Centre (Call Centre) Darlington**

Standort	Darlington (GB)
Fertigstellung	<b>1998</b>
Bauherr	Hutchinson Telecommunications (GB)
Architekt	Nicholas Grimshaw & Partners, London (GB)
TWPL	WSP (GB)
Membranstatik	
Membranbau	Foiltec, Bremen
ETFE-Folie	Pneus
Feldgröße	Skylight-Durchmesser: 6 m
Gesamtfläche	ca. 400 m <sup>2</sup>
Anwendung	Oberlichte, Bürogebäude

**1998 - 03 Afrikahaus (Elefantenhaus) Zoo Dresden**

Standort	Tiergartenstraße, Dresden (D)
Fertigstellung	<b>1998</b>
Bauherr	Tierpark Dresden (D)
Architekt	AIT Bauplanungs GmbH, Dresden (D)
TWPL	
Membranstatik	Dr. Grotkop und Partner, Bremen (D)
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig
Feldgröße	
Gesamtfläche	ca. 1.505 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hallendach, Tiergehege

**1998 - 04 E.on Verwaltungsgebäude**

Standort	E.on-Verwaltung, München
Fertigstellung	<b>1998</b>
Bauherr	E.on (ehem. Isar Amper Werke IAW)
Architekt	Hauschild + Boesel Architekten, München (D)
TWPL	Posselt Consult, Übersee/Chiemsee (D); CBP Cronauer, München (D)
Membranstatik	Tensys Ltd., Bath (GB)
Membranbau	Koiti / Koch Hightex GmbH, Rimsting (D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig
Feldgröße	max. 30 m x 3,70 m = ca. 111 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	ca. 950 m <sup>2</sup>
Anwendung	Atriumdach, Bürogebäude

**1998 - 05 Earth (Science) Centre**

Standort	Doncaster (GB)
Fertigstellung	<b>1998</b>
Bauherr	
Architekt	Alsop & Störmer Architects, London (GB)
TWPL	Atelier one, London (GB)
Membranstatik	
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig
Feldgröße	
Gesamtfläche	ca. 600 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hallendach und Fassade, Ausstellung

**1998 - 06 Adshel Headquater**

Standort	London (GB)
Fertigstellung	<b>1998</b>
Bauherr	
Architekt	Apicella Associates, London (GB)
TWPL	
Membranstatik	
Membranbau	
ETFE-Folie	ETFE-Folie
Feldgröße	
Gesamtfläche	ca. 250 m <sup>2</sup>
Anwendung	Vordach, Bürogebäude

**1998 - 07 Daimler Chrysler Design Centre**

Standort	Sindelfingen (D)
Fertigstellung	<b>1998</b>
Bauherr	Daimler-Chrysler, Sindelfingen (D)
Architekt	Renzo Piano (CH), C. Kohlbecker (D) et. al.
TWPL	Ove Arup & Partner, IFB Dr. Barschel & P. (D)
Membranstatik	IF Essrig + Dürr, Reichenau (D)
Membranbau	Cenotec GmbH, Greven (D)
ETFE-Folie	Pneus, zweilagig, Oberlage ETFE 200 µm
Feldgröße	Breite 1,9 m
Gesamtfläche	ca. 1.300 m <sup>2</sup>
Anwendung	Innenanwendung (Lichtflügel), Ausstellung

]



<b>1998 - 08</b>	<b>André Heller "Meteorit"</b>	Standort	Altenessener Straße, Essen (D)
		Fertigstellung	<b>1998</b>
		Bauherr	RWE Systems Immobilien GmbH & Co. KG, Essen (D)
		Architekt	André Heller, Wien (A)
		TWPL	
		Membranstatik	
		Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
		ETFE-Folie	
		Feldgröße	
		Gesamtfläche	ca. 25 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Skulptur
<b>1998 - 09</b>	<b>University of Hertfordshire – Faculty of Art and Design</b>	Standort	Hatfield (GB)
		Fertigstellung	<b>1998</b>
		Bauherr	University of Hertfordshire (GB)
		Architekt	
		TWPL	
		Membranstatik	
		Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
		ETFE-Folie	
		Feldgröße	
		Gesamtfläche	ca. 270 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Atriumdach, Bildungseinrichtung
<b>1999 - 01</b>	<b>Lacon House</b>	Standort	London (GB)
		Fertigstellung	<b>1999</b>
		Bauherr	
		Architekt	Siddel Gibson Architects
		TWPL	
		Membranstatik	
		Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
		ETFE-Folie	
		Feldgröße	
		Gesamtfläche	ca. 250 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Atriumdach, Bürogebäude
<b>1999 - 02</b>	<b>Michaelsen Walkway</b>	Standort	Bremen (D)
		Fertigstellung	<b>1999</b>
		Bauherr	
		Architekt	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
		TWPL	
		Membranstatik	
		Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
		ETFE-Folie	Pneus
		Feldgröße	
		Gesamtfläche	ca. 32 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Überdachung Walkway, Wohngebäude

<b>1999 - 03</b>	<b>Warmbad "Prienavera"</b>	Standort	Prien / Chiemsee (D)
		Fertigstellung	<b>1999</b>
		Bauherr	Marktgemeinde Prien/Chiemsee (D)
		Architekt	Zeller & Romstätter, Traunstein (D)
		Tragwerksplaner	Zeller, Traunstein (D)
		Membranstatik	Tensys Ltd., Bath (GB)
		Membranbau	Koch Membrane Structures, Rimsting (D)
		ETFE-Folie	Pneus, dreilagig (o/m/u: 200/80-100/200 µm)
		Feldgröße	max. 4,5 m x 42 m = 189 m <sup>2</sup>
		Gesamtfläche	ca. 1.800 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Hallendach, Schwimmbad
<b>1999 - 04</b>	<b>Warmbad "Prienavera" - Vordach</b>	Standort	Prien / Chiemsee (D)
		Fertigstellung	<b>1999</b>
		Bauherr	Marktgemeinde Prien/Chiemsee (D)
		Architekt	Zeller & Romstätter, Traunstein (D)
		Tragwerksplaner	Zeller, Traunstein (D)
		Membranstatik	Tensys Ltd., Bath (GB)
		Membranbau	Koch Membrane Structures, Rimsting (D)
		ETFE-Folie	Mech. vorgesp. Folie (200 µm)
		Feldgröße	durchschnittlich 12 m <sup>2</sup> pro Feld
		Gesamtfläche	17 Felder á 12 m <sup>2</sup> = ca. 200 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Vordach, Schwimmbad
<b>1999 - 05</b>	<b>Skyspan Europe - Hubpneu</b>	Standort	Rimsting (D)
		Fertigstellung	<b>1999</b>
		Bauherr	Skyspan Europe GmbH, Rimsting (D)
		Architekt	Skyspan Europe GmbH, Rimsting (D)
		TWPL	Skyspan Europe GmbH, Rimsting (D)
		Membranstatik	Skyspan Europe GmbH, Rimsting (D)
		Membranbau	Skyspan Europe GmbH, Rimsting (D)
		ETFE-Folie	Pneus, dreilagig
		Feldgröße	ca. 5,5 m x 5,5 m
		Gesamtfläche	ca. 30 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Oberlicht (Hubpneu), Bürogebäude
<b>1999 - 06</b>	<b>Kristall Kur- &amp; Freizeitbad Lübbenau</b>	Standort	Lübbenau (D)
		Fertigstellung	<b>1999</b>
		Bauherr	Stadt Lübbenau (D)
		Architekt	David & Strobilius
		TWPL	Goetz und Neun, Nürnberg (D)
		Membranstatik	Tensys Ltd., Bath (GB)
		Membranbau	Skyspan Europe GmbH, Rimsting (D)
		ETFE-Folie	Pneus, dreilagig
		Feldgröße	
		Gesamtfläche	ca. 840 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Hallendach, Schwimmbad

<b>1999 - 07</b>	<b>Adastral House</b>	Standort	Theobalds Road, London (GB)
		Fertigstellung	<b>1999</b>
		Bauherr	
		Architekt	Siddel, Gibson, Camden, London (GB)
		TWPL	
		Membranstatik	
		Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
		ETFE-Folie	
		Feldgröße	
		Gesamtfläche	ca. 250 m <sup>2</sup>
Anwendung	Atriumdach, Bürogebäude		
<b>1999 - 08</b>	<b>Palacio Vistalegre</b>	Standort	Madrid (E)
		Fertigstellung	<b>1999</b>
		Bauherr	A. Beltran, Palumi S.A., Madrid (E)
		Architekt	Schlaich, Bergermann u. Partner, Stuttgart (D)
		TWPL	Schlaich, Bergermann u. Partner, Stuttgart (D)
		Membranstatik	Tensys Ltd., Bath (GB)
		Membranbau	Skyspan Europe, Rimsting (D)
		ETFE-Folie	Hubpneu, zweilagig, Oberlage: PVC/PES Gewebe, Unterlage: ETFE-Folie auf Seilnetz
		Feldgröße	Maschenweite Seilnetz: 1,5 m
		Gesamtfläche	Linsendurchmesser: d = ca. 50 m, ca. 2.500 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hallendach, Stadion (Stierkampfarena)		
<b>1999 - 09</b>	<b>Freizeitbad "Nautica"</b>	Standort	Herrenkrugstraße, Magdeburg (D)
		Fertigstellung	<b>1999</b>
		Bauherr	
		Architekt	Behrmann Consult, Hagen (D)
		TWPL	
		Membranstatik	
		Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
		ETFE-Folie	Pneus, dreilagig
		Feldgröße	Bogenspannweite: ca. 30 m
		Gesamtfläche	ca. 1.700 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hallendach, Schwimmbad		
<b>1999 - 10</b>	<b>Naturkundemuseum "Wildwalk @ Bristol"</b>	Standort	Bristol (GB)
		Fertigstellung	<b>1999</b>
		Bauherr	
		Architekt	Michael Hopkins & Partners, London (GB)
		TWPL	
		Membranstatik	
		Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
		ETFE-Folie	Pneus, dreilagig
		Feldgröße	
		Gesamtfläche	ca. 1.300 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hallendach, Ausstellung		

**1999 - 11      Regenwaldhaus Herrenhausen**

Standort	Herrenhäuser Gärten, Hannover (D)
Fertigstellung	<b>1999</b>
Bauherr	Freunde d. Herrenh. Gärten e.V., Hannover (D)
Architekt	Gordon Wilson & Ray Hole (GB)
Tragwerksplaner	Dr. Grotkop und Partner, Bremen (D)
Membranstatik	Dr. Grotkop und Partner, Bremen (D)
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig
Feldgröße	max. 3 m x 16 m = ca. 48 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	ca. 1.000 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hallendach, Botanischer Garten

**1999 - 12      Braun Headquater Kronberg**

Standort	Braun AG, Kronberg (D)
Fertigstellung	<b>1999</b>
Bauherr	Braun AG (Braun GmbH), Kronberg (D)
Architekt	Schneider+Schumacher, Frankfurt/Main (D)
TWPL	Bollinger + Grohmann, Frankfurt/Main (D)
Membranstatik	Dr. Grotkop und Partner, Bremen (D)
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig
Feldgröße	max. Spannweite 4,35 m
Gesamtfläche	ca. 855 m <sup>2</sup>
Anwendung	Oberlichte (schwenkbar), Bürogebäude

**2000 - 01      Kristall-, Kur- und Gradietherme Bad Wilsnack**

Standort	Bad Wilsnack (D)
Fertigstellung	<b>2000</b>
Bauherr	Stadt Bad Wilsnack (D)
Architekt	Udo Goetz, Nürnberg (D)
TWPL	Goetz und Neun, Nürnberg (D)
Membranstatik	Engineering + Design, Rosenheim (D)
Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig (o/m/u: 200/80/150 µm)
Feldgröße	17,54 m x 3,42 m = ca. 60,0 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	ca. 1.620 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hallendach, Schwimmbad

**2000 - 02      Freizeitbad "Moby Dick"**

Standort	Rülzheim (D)
Fertigstellung	<b>2000</b>
Bauherr	Stadt Rülzheim (D)
Architekt	Schick & Partner, Karlsruhe (D)
Tragwerksplaner	Ing.-Büro Stefan Schlechter, Albstadt (D)
Membranstatik	Engineering + Design, Rosenheim (D)
Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig (o/m/u: 200/80/200 µm)
Feldgröße	21,13 m x 3,83 m = ca. 81 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	ca. 1.570 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hallendach, Schwimmbad (Umbau 2000)

**2000 - 03 EXPO 2000 - Entreé**

Standort	Expo-Gelände, Hannover (D)
Fertigstellung	<b>2000</b>
Bauherr	Noell - Stahl- u. Maschinenbau, Würzburg (D)
Architekt	von Gerkan, Marg und Partner, Hamburg (D)
Tragwerksplaner	
Membranstatik	Tensys Ltd. Bath (GB)
Membranbau	Skyspan Europe GmbH, Rimsting (D)
ETFE-Folie	Pneus, zweilagig
Feldgröße	ca. 7,5 m x 7,5 m = ca. 56 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	ca. 400 m <sup>2</sup>
Anwendung	Überdachung Walkway, Ausstellung

**2000 - 04 "Cycle Bowl" – Fassade**

Standort	Hannover (D), EXPO-Gelände
Fertigstellung	<b>2000</b>
Bauherr	Duales System Deutschland (D)
Architekt	Atelier Brückner, Stuttgart (D)
TWPL	Dr. Grotkop und Partner, Bremen (D)
Membranstatik	Dr. Grotkop und Partner, Bremen (D); IPL (D)
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig
Feldgröße	ca. 18 m x 3 m = ca. 54 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	28 x 54 m <sup>2</sup> = ca. 1500 m <sup>2</sup>
Anwendung	Fassade (Verschattung), Ausstellung, temp.

**2000 - 05 "Cycle Bowl" – Dach**

Standort	Hannover (D), EXPO-Gelände
Fertigstellung	<b>2000</b>
Bauherr	Duales System Deutschland (D)
Architekt	Atelier Brückner, Stuttgart (D)
Tragwerksplaner	Dr. Grotkop und Partner, Bremen (D)
Membranstatik	Dr. Grotkop und Partner, Bremen (D), IPL (D)
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	1 Pneu, zweilag., seiluntersp. integr. Schläuche
Feldgröße	Durchmesser: ca. 25 m
Gesamtfläche	ein Pneu mit ca. 500 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hallendach (Verschattung), Ausstellung, temp.

**2000 - 06 Menschenaffenhaus Tierpark Hellabrunn**

Standort	Tierpark Hellabrunn, München (D)
Fertigstellung	<b>2000</b>
Bauherr	Zoo München (D)
Architekt	Herbert Kochta, München (D)
TWPL	
Membranstatik	Tensys Ltd., Bath (GB)
Membranbau	Skyspan Europe GmbH, Rimsting (D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig
Feldgröße	
Gesamtfläche	ca. 1.800 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hallendach, Tiergehege

**2000 - 07 Schöllerbank Wien**

Standort	Wien (A)
Fertigstellung	<b>2000</b>
Bauherr	SKWB Schoellerbank, Wien (A)
Architekt	C. Jabornegg, A. Pálffy, Wien (A)
TWPL	Ingenieurbüro Karlheinz Wagner, Wien (A)
Membranstatik	Ingenieurbüro Karlheinz Wagner, Wien (A)
Membranbau	Skyspan Europe GmbH, Rimsting (D)
ETFE-Folie	Tensys Ltd., Bath (GB), Pneus, dreilagig
Feldgröße	3,6 m x 15 m = ca. 54 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	15 m x 18 m = ca. 270 m <sup>2</sup>
Anwendung	Atriumdach, Bürogebäude

**2000 - 08 Sporthalle Schwerin**

Standort	Krebsfördener Weg, Schwerin (D)
Fertigstellung	<b>2000</b>
Bauherr	
Architekt	Büro Bernhard Gärtner, Bülow (D)
TWPL	
Membranstatik	
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	
Feldgröße	
Gesamtfläche	ca. 456 m <sup>2</sup>
Anwendung	Oberlichte, Sportstätte (Sporthalle)

**2000 - 09 "Wohnen 2000"**

Standort	Ortskamp, Hannover-Kronsberg (D)
Fertigstellung	<b>2000</b>
Bauherr	
Architekt	Willen Associates Architekten, Wiesbaden (D)
TWPL	
Membranstatik	Dr. Grotkop und Partner, Bremen (D)
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig
Feldgröße	3,6 m x 8,2 m = ca. 30 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	ca. 1.730 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hofüberdachung, Wohngebäude

**2000 - 10 Skylight Eindhoven**

Standort	Eindhoven (NL)
Fertigstellung	<b>2000</b>
Bauherr	
Architekt	Guido Bakker Architecten, Veenendaal (NL)
Tragwerksplaner	
Membranstatik	Tentech, Utrecht (NL)
Membranbau	Tentech, Utrecht (NL)
ETFE-Folie	Pneus
Feldgröße	2,0 x 5,0 m = ca. 10 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	15 x 10 m <sup>2</sup> = ca. 150 m <sup>2</sup>
Anwendung	Oberlichte, Bürogebäude

**2000 - 11 Solarlux Showroom**

Standort	Bissendorf, Niedersachsen (D)
Fertigstellung	<b>2000</b>
Bauherr	Solarlux, Bissendorf (D)
Architekt	Architekturbüro Peter Wörmann, Ostbevern (D)
TWPL	Gantert & Wiemeier, Münster (D)
Membranstatik	Gantert & Wiemeier, Münster (D)
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig
Feldgröße	
Gesamtfläche	ca. 900 m <sup>2</sup>
Anwendung	Atriumdach (Verschattung), Ausstellung

**2000 - 12 Vulkanpark Kretz**

Standort	Niekenicher Straße, Plaidt (Osteifel) (D)
Fertigstellung	<b>2000</b>
Bauherr	
Architekt	Büro Henrich, Bendorf (D)
TWPL	
Membranstatik	
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	
Feldgröße	
Gesamtfläche	ca. 800 m <sup>2</sup>
Anwendung	Oberlichte, Ausstellung (Ausgrabungsst.), temp.

**2000 - 13 Magna Science Centre "Airship"**

Standort	Sheffield Road, Templeborough, Rotherh. (GB)
Fertigstellung	<b>2000</b>
Bauherr	The Magna Trust (GB)
Architekt	Wilkinson Eyre Architects, London (GB)
TWPL	
Membranstatik	
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	Pneus
Feldgröße	
Gesamtfläche	8 Pneus = ca. 1.500 m <sup>2</sup>
Anwendung	Innenanwendung (Luftschiffhülle), Skulptur

**2000 - 14 Bishops Avenue London**

Standort	Bishops Avenue, London (GB)
Fertigstellung	<b>2000</b>
Bauherr	
Architekt	
TWPL	
Membranstatik	
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	
Feldgröße	
Gesamtfläche	ca. 200 m <sup>2</sup>
Anwendung	Oberlicht (verfahrbar), Wohngebäude (Pool)

**2000 - 15 Millennium Point Visitors Centre**

Standort	Birmingham (GB)
Fertigstellung	<b>2000</b>
Bauherr	
Architekt	Nicholas Grimshaw & Partners, London (GB)
TWPL	
Membranstatik	
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	
Feldgröße	
Gesamtfläche	ca. 2.000 m <sup>2</sup>
Anwendung	Atriumdach, Ausstellung

**2000 - 16 Giraffenhaus Zoo Duisburg**

Standort	Zoo Duisburg, Duisburg (D)
Fertigstellung	<b>2000</b>
Bauherr	Zoo Duisburg AG, Duisburg (D)
Architekt	Peter Rasbach, Oberhausen (D)
TWPL	H. Schumacher, Duisburg (D)
Membranstatik	
Membranbau	Skyspan Europe GmbH, Rimsting (D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig (o/m/u: 200/100/200 µm)
Feldgröße	
Gesamtfläche	
Anwendung	Hallendach, Tiergehege

**2000 – 17 Sainsbury PLC Headquarters**

Standort	Union Street, London (GB)
Fertigstellung	<b>2000</b>
Bauherr	
Architekt	GHM Rock, Townsend, Hertfordshire (GB)
TWPL	
Membranstatik	
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	
Feldgröße	
Gesamtfläche	ca. 350 m <sup>2</sup>
Anwendung	Atriumdach, Bürogebäude

**2000 – 18 Festo Technologie Zentrum**

Standort	Ruiter-Straße, Esslingen (D)
Fertigstellung	<b>2000</b>
Bauherr	Festo AG & Co., Esslingen (D)
Architekt	Architekturbüro Jaschek, Stuttgart (D)
TWPL	Ingenieurbüro Rathgeb, Esslingen (D)
Membranstatik	Ingenieurbüro IPL, Radolfzell (D)
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig
Feldgröße	Spannweite: 2,45 m x 13 m bis 21 m
Gesamtfläche	ca. 2.655 m <sup>2</sup>
Anwendung	Atriumdach (Verschattung), Bürogebäude



<b>2000 – 19</b>	<b>Hermesschirme – transparente Dachfugen</b>	Standort	Hannover (D)
		Fertigstellung	<b>2000</b>
		Bauherr	Deutsche Messe Hannover, Hannover (D)
		Architekt	Herzog + Partner, München (D)
		TWPL	IEZ, Natterer GmbH
		Membranstatik	Skyspan Europe GmbH, Rimsting (D)
		Membranbau	Skyspan Europe GmbH, Rimsting (D)
		ETFE-Folie	einlagig (200 µm)
		Feldgröße	20 m x 2 m = ca. 40 m <sup>2</sup>
		Gesamtfläche	ca. 3.800 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Überdachung Walkway, Ausstellung
<b>2000 – 20</b>	<b>Primatenhaus Zoo Leipzig</b>	Standort	Zoo Leipzig, Leipzig (D)
		Fertigstellung	<b>2000</b>
		Bauherr	Max-Planck-Gesellschaft e.V., München(D)
		Architekt	Herbert Kochta, München (D)
		TWPL	
		Membranstatik	Tensys Ltd., Bath (GB)
		Membranbau	Skyspan Europe GmbH, Rimsting (D)
		ETFE-Folie	
		Feldgröße	
		Gesamtfläche	ca. 1.940 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Hallendach, Tiergehege
<b>2000 – 21</b>	<b>Naturhistorisches Museum “Darwin Centre“</b>	Standort	London (GB)
		Fertigstellung	<b>2000</b>
		Bauherr	
		Architekt	HOK International Ltd., London (GB)
		TWPL	
		Membranstatik	
		Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
		ETFE-Folie	
		Feldgröße	
		Gesamtfläche	ca. 276 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Atriumdach, Ausstellung
<b>2000 – 22</b>	<b>Venezuela Pavillon EXPO 2000</b>	Standort	EXPO-Gelände Hannover
		Fertigstellung	<b>2000</b>
		Bauherr	
		Architekt	
		TWPL	
		Membranstatik	
		Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
		ETFE-Folie	einlagig, mechanisch vorgespannt, 200 µm
		Feldgröße	
		Gesamtfläche	
		Anwendung	Überdachung, inner layer, Pavillon, temporär

**2001 – 01 Skyspan FEZ - Fertigungshalle**

Standort	Skyspan Europe FEZ, Rimsting (D)
Fertigstellung	<b>2001</b>
Bauherr	Skyspan Europe GmbH, Rimsting (D)
Architekt	Entwurf: Microsystems, München (D), Ausführungspl.: Anselm Kanno, Rosenheim (D)
TWPL	Skyspan Europe GmbH, Rimsting (D)
Membranstatik	Skyspan Europe GmbH, Rimsting (D)
Membranbau	Skyspan Europe GmbH, Rimsting (D)
ETFE-Folie	Unterhängdecke, einlagig (Oberl. PTFE-Glas)
Feldgröße	
Gesamtfläche	
Anwendung	Innenanwendung (Klimamembran), Werkstätten

**2001 – 02 Skyspan FEZ - Skylight**

Standort	Skyspan Europe FEZ, Rimsting (D)
Fertigstellung	<b>2001</b>
Bauherr	Skyspan Europe GmbH, Rimsting (D)
Architekt	Entwurf: Microsystems, München (D), Ausführungspl.: Anselm Kanno, Rosenheim (D)
TWPL	
Membranstatik	Skyspan Europe GmbH, Rimsting (D)
Membranbau	Skyspan Europe GmbH, Rimsting (D)
ETFE-Folie	ETFE, Pneus dreilagig
Feldgröße	
Gesamtfläche	ca. 150 m <sup>2</sup>
Anwendung	Oberlichte, Werkstätten

**2001 – 03 Garden of Eden (Eden Project)**

Standort	Garden of Eden, St. Austell, Cornwall (GB)
Fertigstellung	<b>2001</b>
Bauherr	The Eden Project Ltd. (GB)
Architekt	Nicholas Grimshaw & Partners, London (GB)
Tragwerksplaner	Anthony Hunt Associates, London (GB)
Membranstatik	Anthony Hunt Associates, London (GB)
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	Pneus, 625 Sechs-, 16 Fünf- und 190 Dreiecke
Feldgröße	Kantenmaß: max. 5,2 m, Fläche: max. 80 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	ca. 30.000 m <sup>2</sup> (Oberfläche)
Anwendung	Hallendach, Botanischer Garten

**2001 – 04 E.on Informationszentrum Walchenseekraftwerk**

Standort	Kochel am See (D)
Fertigstellung	<b>2001</b>
Bauherr	E.on.-Wasserkraft GmbH (D)
Architekt	Hauschild & Boesel, München (D)
TWPL	Planungsgesellschaft Dittrich, München (D)
Membranstatik	Engineering + Design, Rosenheim (D)
Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
ETFE-Folie	Mech. vorgesp. Folie, einlagig (200 µm)
Feldgröße	23 m x 34 m / 2 = ca. 391 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	ca. 391 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hofüberdachung, Ausstellung

**2001 – 05 Erlebnisbad “Triamare“**

Standort	Bad Neustadt a.d. Saale (D)
Fertigstellung	<b>2001</b>
Bauherr	Stadt Bad Neustadt (D)
Architekt	Scharf & R�uth, Bad Kissingen (D)
TWPL	Ingenieurb�uro Albus, Bad Neustadt (D)
Membranstatik	Engineering + Design, Rosenheim (D)
Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig (o/m/u: 200/150/80 �m)
Feldgr�o�e	16,63 m x 3,25 m = ca. 54,0 m <sup>2</sup>
Gesamtfl�ache	ca. 400 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hallendach, Schwimmbad

**2001 – 06 Hallen- und Freibadanlage “WEBALU“**

Standort	Werdau (D)
Fertigstellung	<b>2001</b>
Bauherr	Sport und Freizeit GmbH, Werdau (D)
Architekt	Schick & Partner, Karlsruhe (D)
TWPL	Bauerochse & Winzen, Aachen (D)
Membranstatik	Engineering + Design, Rosenheim (D)
Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
ETFE-Folie	Pneus dreilagig, Vordach einlagig
Feldgr�o�e	max. 4,38 m x 25 m = ca. 110 m <sup>2</sup>
Gesamtfl�ache	ca. 1.400 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hallendach, Schwimmbad

**2001 – 07 Hallen- und Freibadanlage “WEBALU“ - Vordach**

Standort	Werdau (D)
Fertigstellung	<b>2001</b>
Bauherr	Sport und Freizeit GmbH, Werdau (D)
Architekt	Schick & Partner, Karlsruhe (D)
TWPL	Bauerochse & Winzen, Aachen (D)
Membranstatik	Engineering + Design, Rosenheim (D)
Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
ETFE-Folie	Pneus dreilagig, Vordach einlagig
Feldgr�o�e	4,44 m x 1,7 m = ca. 7,5 m <sup>2</sup>
Gesamtfl�ache	ca. 100 m <sup>2</sup>
Anwendung	Vordach, Schwimmbad

**2001 – 08 Tankstelle Fürstenrieder Straße “F2“**

Standort	F�rstenrieder Stra�e, M�nchen (D)
Fertigstellung	<b>2001</b>
Bauherr	Allguth GmbH, M�nchen (D)
Architekt	Architekten Haak & H�pfner, M�nchen (D)
Tragwerksplaner	Ingenieurb�uro Brengelmann, M�nchen (D)
Membranstatik	Engineering + Design, Rosenheim (D)
Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig (o/m/u: 200/80/200 �m)
Feldgr�o�e	8,00 m x 4,15 m = ca. 33 m <sup>2</sup>
Gesamtfl�ache	ca. 220 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hof�berdachung u. Oberlichte, Tankstelle

**2001 – 09 Woonwinkel Center “Villa Arena“**

Standort	Amsterdam (NL)
Fertigstellung	<b>2001</b>
Bauherr	Vastgoed Ontwikkeling B.V., Den Haag (NL)
Architekt	Bentham Crouwel, Amsterdam (NL)
TWPL	Ingenieursgroup van Rossum, Amsterdam (NL)
Membranstatik	Skyspan Europe GmbH, Rimsting (D)
Membranbau	Skyspan Europe GmbH, Rimsting (D)
ETFE-Folie	Tensys Ltd., Bath (GB), Pneus, zweilagig
Feldgröße	
Gesamtfläche	ca. 3.600 m <sup>2</sup>
Anwendung	Atriumdach, Geschäftsgeb. (Shopping Mall)

**2001 – 10 British National Space Science Centre (NSSC)**

Standort	Leicester (GB)
Fertigstellung	<b>2001</b>
Bauherr	British National Space Center (GB)
Architekt	Nicholas Grimshaw & Partners, London (GB)
Tragwerksplaner	Ove Arup & Partners, London (GB)
Membranstatik	Tensys Ltd. Bath (GB)
Membranbau	Skyspan Europe GmbH, Rimsting (D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig
Feldgröße	3 m x 20 m = ca. 60 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	ca. 2.000 m <sup>2</sup>
Anwendung	Fassade (Hülle), Ausstellung

**2001 – 11 BMW- IAA 2001 - Unterdruck-Fassadenpneus**

Standort	Messe Frankfurt (D)
Fertigstellung	<b>2001</b>
Bauherr	BMW Group, München (D)
Architekt	Bollinger & Grohmann, Frankfurt (D)
TWPL	Seele, Augsburg (D)
Membranstatik	Wilhelm und Rein, Stuttgart (D)
Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
ETFE-Folie	Pneus, zweilagig (a/i: 200/200 µm)
Feldgröße	ca. 10 x 6 m = 60m <sup>2</sup> (Unterdruck-Pneus)
Gesamtfläche	ca. 1.000 m <sup>2</sup>
Anwendung	Fassade (Giebel), Ausstellung

**2001 – 12 Entrance Covering Apenheul Zoo**

Standort	Zoo Apenheul, Apeldoorn (NL)
Fertigstellung	<b>2001</b>
Bauherr	Zoo Apenheul (NL)
Architekt	Guido Bakker Architecten, Veenendaal (NL)
Tragwerksplaner	
Membranstatik	Tentech, Utrecht (NL)
Membranbau	Tentech, Utrecht (NL)
ETFE-Folie	Pneus
Feldgröße	max. 3,0 m x 5,0 m = ca. 15 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	ca. 870 m <sup>2</sup>
Anwendung	Überdachung Walkway, Tiergehege (zool. Anl.)

**2001 – 13 Hampshire County Cricket Club**

Standort Southampton (GB)  
 Fertigstellung **2001**  
 Bauherr  
 Architekt Michael Hopkins & Partners, London (GB)  
 TWPL  
 Membranstatik  
 Membranbau Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)  
 ETFE-Folie Pneus  
 Feldgröße  
 Gesamtfläche ca. 300 m<sup>2</sup>  
 Anwendung Atriumdach, Sportstätte (Cricket Club)

**2001 – 14 “Avifauna“ Papageienhaus**

Standort Alphen aan den Rijn (NL)  
 Fertigstellung **2001**  
 Bauherr  
 Architekt Van der Breggen Arch. (NL)  
 TWPL  
 Membranstatik  
 Membranbau Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)  
 ETFE-Folie  
 Feldgröße  
 Gesamtfläche ca. 580 m<sup>2</sup>  
 Anwendung Hallendach, Tiergehege

**2001 – 15 Vodafone World Headquater**

Standort Newbury (GB)  
 Fertigstellung **2001**  
 Bauherr  
 Architekt Fletcher Priest Architects, London (GB)  
 TWPL  
 Membranstatik  
 Membranbau Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)  
 ETFE-Folie  
 Feldgröße  
 Gesamtfläche ca. 1.830 m<sup>2</sup>  
 Anwendung Atriumdach, Bürogebäude (7 Gebäude)

**2001 – 16 Manchester Piccadilly Railway Station**

Standort Manchester (GB)  
 Fertigstellung **2001**  
 Bauherr  
 Architekt Building Design Partnership, Manchester (GB)  
 TWPL  
 Membranstatik  
 Membranbau Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)  
 ETFE-Folie  
 Feldgröße  
 Gesamtfläche ca. 2500 m<sup>2</sup>  
 Anwendung Hallendach, Bahnhof

<b>2001 – 17</b>	<b>Geschwister-Scholl Gymnasium Waldkirch</b>	Standort	Hindenburgstr., Waldkirch (D)
		Fertigstellung	<b>2001 (Umbau und Erweiterung)</b>
		Bauherr	
		Architekt	Architekturbüro Schindler, Waldkirch (D)
		TWPL	
		Membranstatik	Plantec, Bremen (D)
		Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
		ETFE-Folie	Pneus, dreilagig
		Feldgröße	
		Gesamtfläche	ca. 650 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Atriumdach, Bildungseinrichtung
<b>2001 – 18</b>	<b>“Splash Landings“ - Alton Towers</b>	Standort	Alton Towers, Alton, Staffordshire (GB)
		Fertigstellung	<b>2001</b>
		Bauherr	Tussauds Group Limited (GB)
		Architekt	Shepherd Design, York (GB)
		TWPL	
		Membranstatik	
		Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
		ETFE-Folie	
		Feldgröße	
		Gesamtfläche	ca. 3.500 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Hallendach, Schwimmbad
<b>2002 – 01</b>	<b>Walkway Nowofol Übergang Werk I und III</b>	Standort	Nowofol Betriebsgelände, Siegsdorf (D)
		Fertigstellung	<b>2002</b>
		Bauherr	Nowofol, Siegsdorf (D)
		Architekt	Lechner + Lechner Architekten, Traunstein (D)
		TWPL	
		Membranstatik	Covertex GmbH, Obing (D)
		Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
		ETFE-Folie	dreilagige Pneus (200 / 100 / 200 µm)
		Feldgröße	11 m x 2,50 m = ca. 27 m <sup>2</sup>
		Gesamtfläche	ca. 27,5 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Überdachung Walkway, Bürogebäude
<b>2002 – 02</b>	<b>Underground Station Heron Quays</b>	Standort	Canary Wharf, London (GB)
		Fertigstellung	<b>2002</b>
		Bauherr	
		Architekt	Alsop Architects, London (GB)
		TWPL	
		Membranstatik	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
		Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
		ETFE-Folie	einlagig, eben vorgespannt, matt
		Feldgröße	
		Gesamtfläche	ca. 1.000 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Innenanwendung (Lichtfelder), Bahnhof

<b>2002 – 03</b>	<b>Oxford Centre for Diabetes, Endocrinology and Metabolism (OCDEMS)</b>	Standort	Old Road, Headington, Oxford (GB)
		Fertigstellung	<b>2002</b>
		Bauherr	OCDEMS, Oxford (GB)
		Architekt	Shepherd, Robson, London (GB)
		TWPL	
		Membranstatik	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
		Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
		ETFE-Folie	
		Feldgröße	
		Gesamtfläche	ca. 750 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Atriumdach, Klinikgebäude
<b>2002 – 04</b>	<b>Gewächshaus “Botanika im Park“</b>	Standort	Rhododendronpark und Botanischer Garten, Markusallee, Bremen (D)
		Fertigstellung	<b>2002</b>
		Bauherr	Frei Hansestadt Bremen
		Architekt	Prof. Hartmut Stechow, Bremen (D)
		TWPL	Dr. Grotkop und Partner, Bremen (D)
		Membranstatik	Dr. Grotkop und Partner, Bremen (D)
		Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
		ETFE-Folie	
		Feldgröße	
		Gesamtfläche	ca. 2.200 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Hallendach, Botanischer Garten
<b>2002 – 05</b>	<b>Bishop David Brown School</b>	Standort	Buchanan House, Holborn, London (GB)
		Fertigstellung	<b>2002</b>
		Bauherr	
		Architekt	RDJW Architects Ltd., West Sussex (GB)
		TWPL	
		Membranstatik	
		Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
		ETFE-Folie	
		Feldgröße	
		Gesamtfläche	ca. 200 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Atriumdach, Bildungseinrichtung
<b>2002 – 06</b>	<b>Zollinger Halle Ludwigsburg</b>	Standort	Rheinlandstraße, Ludwigsburg (D)
		Fertigstellung	<b>2002</b>
		Bauherr	
		Architekt	Bottega & Erhardt, Stuttgart (D)
		TWPL	
		Membranstatik	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
		Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
		ETFE-Folie	
		Feldgröße	
		Gesamtfläche	ca. 83 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Innenanwendung (Trennwand), Bürogebäude

**2002 – 07 Toyota "Bubble" Paris**

Standort	Int. Automobil Salon in Paris (F)
Fertigstellung	<b>2002</b>
Bauherr	
Architekt	Born & Strukamp Messebau GmbH, Düss. (D)
TWPL	
Membranstatik	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	Pneu, Folie
Feldgröße	
Gesamtfläche	ca. 50 m <sup>2</sup>
Anwendung	Innenanwendung (Messestand), Ausstellung

**2002 – 08 Elisabethinum Axams**

Standort	Axams (A)
Fertigstellung	<b>2002</b>
Bauherr	Seraphisches Liebeswerk, Axams (A)
Architekt	Architekturbüro Fessler, Innsbruck (A)
TWPL	Dipl.-Ing. Zoidl, Innsbruck (A)
Membranstatik	
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	
Feldgröße	
Gesamtfläche	ca. 192 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hofüberd. (verfahrbar), Bildungseinrichtung

**2002 – 9 Masoala Regenwald - Dachhülle**

Standort	Zoo Zürich (CH)
Fertigstellung	<b>2002</b>
Bauherr	Zoo Zürich (CH)
Architekt	Gautschi + Storrer, Zürich (CH)
TWPL	MWV, Zürich (CH) u. ABT, Arnheim (NL)
Membranstatik	Engineering + Design, Rosenheim (D)
Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
ETFE-Folie	Dach: 4-lagig (o/m/u: 200/200/100/180 µm)
Feldgröße	Dach: max. 106 m x 3,9 m = ca. 414 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	Dach: ca. 11.400 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hallendach, Botanischer Garten

**2002 – 10 Masoala Regenwald - Giebelfassaden**

Standort	Zoo Zürich (CH)
Fertigstellung	<b>2002</b>
Bauherr	Zoo Zürich (CH)
Architekt	Gautschi + Storrer, Zürich (CH)
TWPL	MWV, Zürich (CH) u. ABT, Arnheim (NL)
Membranstatik	Engineering + Design, Rosenheim (D)
Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
ETFE-Folie	Fassaden, 3-lagig (a/m/i: 200/100/180 µm)
Feldgröße	Fassaden: max. 25 m x 4 m = ca. 100 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	Fassade: ca. 3.200 m <sup>2</sup>
Anwendung	Giebelfassaden, Botanischer Garten



**2002 – 11 Bürogebäude Riem**

Standort	München Riem (D)
Fertigstellung	<b>2002</b>
Bauherr	H. Spude, Höller (D)
Architekt	Baumann und Freunde, Moosach (D)
TWPL	Engineering + Design, Rosenheim (D)
Membranstatik	Engineering + Design, Rosenheim (D)
Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig (o/m/u: 200/100/200 µm)
Feldgröße	Dach: 8 m x 2,9 m = 23,2 m <sup>2</sup> (Fass.: 2,25 m <sup>2</sup> )
Gesamtfläche	Dach: ca. 120 m <sup>2</sup> , Fassade: ca. 15 m <sup>2</sup>
Anwendung	Atriumdach und Giebelfassaden, Bürogebäude

**2002 – 12 Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU)**

Standort	Osnabrück (D)
Fertigstellung	<b>2002</b>
Bauherr	DBU, Osnabrück (D)
Architekt	Herzog + Partner, München (D)
TWPL	Barthel & Maus, München (D)
Membranstatik	Barthel & Maus, München (D)
Membranbau	B&O Hightex, Breitbrunn (D)
ETFE-Folie	Mech. vorgesp. Folie, einlagig (225 µm)
Feldgröße	ca. 8,0 m x 1,4 m = ca. 11,2 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	ca. 1.950 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hallendach, Ausstellung / Bürogebäude

**2002 – 13 Solbad Revierpark Vonderort**

Standort	Oberhausen-Vonderort (D)
Fertigstellung	<b>2002</b>
Bauherr	Revierpark Vonderort GmbH, Oberh. (D)
Architekt	Blass Architekten, Euskirchen (D)
TWPL	Dach: Engineering + Design, Rosenheim (D)
Membranstatik	Engineering + Design, Rosenheim (D)
Membranbau	Covertex GmbH, Obing
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig (o/m/u: 250/100/250 µm)
Feldgröße	max. (5,75 m + 1,05 m)/2 x 17,06 m = ca. 58 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	ca. 1.000 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hallendach, Schwimmbad

**2002 – 14 Kapuziner Karree**

Standort	Kapuziner Graben, Aachen (D)
Fertigstellung	<b>2002</b>
Bauherr	
Architekt	Ingenhoven, Overdiek & Partner, Düsseld. (D)
TWPL	Dr. Grotkop und Partner, Bremen (D)
Membranstatik	Dr. Grotkop und Partner, Bremen (D)
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	
Feldgröße	Spannweite: ca. 3,5 m
Gesamtfläche	ca. 500 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hofüberdachung, Büro- und Geschäftsgebäude

**2002 – 15      Sonnenkollektor BSR**

Standort	Prototyp, Lörrach (D)
Fertigstellung	<b>2002</b>
Bauherr	Bomin Solar Research GmbH
Architekt	Bomin Solar Research GmbH
TWPL	Bomin Solar Research GmbH
Membranstatik	Dipl.-Ing. Dieter Linke
Membranbau	Dipl.-Ing. Dieter Linke
ETFE-Folie	mechanisch vorgespannte Folie (200 µm)
Feldgröße	1,0 m x 3,15 m = ca. 3,15 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	ca. 12,6 m <sup>2</sup>
Anwendung	Modulhülle, Solarkollektor

**2002 – 16      Villaban Freiburg**

Standort	Marie-Curie-Str., Freiburg (D)
Fertigstellung	<b>2002</b>
Bauherr	Villaban GmbH, Freiburg (D)
Architekt	Bulling – Bross – Brockman, Freiburg (D)
TWPL	IF - Tritthardt + Ayrle, Radolfzell, (D)
Membranstatik	IF - Tritthardt + Ayrle, Radolfzell (D)
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	Pneus
Feldgröße	ca. 10 x 10 m
Gesamtfläche	ca. 100 m <sup>2</sup>
Anwendung	Oberlichte (Firstkuppel), Geschäftsgebäude

**2002 – 17      Atrium Papendorpsweg Utrecht**

Standort	Papendorpsweg, Utrecht (NL)
Fertigstellung	<b>2002</b>
Bauherr	
Architekt	Swanke Hayden Connell, London (GB)
TWPL	
Membranstatik	
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	
Feldgröße	
Gesamtfläche	ca. 240 m <sup>2</sup>
Anwendung	Atriumdach, Bürogebäude

**2002 – 18      Emma-Jäger-Bad**

Standort	Pforzheim (D)
Fertigstellung	<b>2002</b>
Bauherr	Stadt Pforzheim (D)
Architekt	Scheibenflug & Kummetat, Gelsenkirchen (D)
TWPL	
Membranstatik	Skyspan Europe GmbH, Rimsting (D)
Membranbau	Skyspan Europe GmbH, Rimsting (D)
ETFE-Folie	dreilagig
Feldgröße	
Gesamtfläche	ca. 470 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hallendach, Schwimmbad

**2002 – 19      Cultureel Educatief Centrum Ganzenhoef**

Standort	Ganzenhoef, Amsterdam (NL)
Fertigstellung	<b>2002</b>
Bauherr	HBG (NL)
Architekt	Hans van Heeswijk
TWPL	Van de Lune
Membranstatik	Skyspan Europe GmbH, Rimsting (D)
Membranbau	Skyspan Europe GmbH, Rimsting (D)
ETFE-Folie	zweilagig
Feldgröße	ca. 25 m x 3,5 m = ca. 87 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	ca. 960 m <sup>2</sup>
Anwendung	Atriumdach, Bildungseinrichtung

**2002 – 20      Kings College Hospital**

Standort	London (GB)
Fertigstellung	<b>2002</b>
Bauherr	
Architekt	Nightingale Associates, London (GB)
TWPL	
Membranstatik	
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	Pneus
Feldgröße	ca. 3,6 m x 26 m = ca. 93 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	ca. 500 m <sup>2</sup>
Anwendung	Atriumdach, Klinikgebäude

**2002 – 21      Sonderschule Garbsen**

Standort	Garbsen (D)
Fertigstellung	<b>2002 (Atrium), 2001 (Pausenhof)</b>
Bauherr	
Architekt	Burggraf & Dähne, Dresden (D)
TWPL	
Membranstatik	
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	
Feldgröße	
Gesamtfläche	ca. 250 m <sup>2</sup> (2001); 145 m <sup>2</sup> (2002)
Anwendung	Atriumdach (Verschattung) u. Hofüberdachung (Pausenhof), Bildungseinrichtung

**2002 – 22      Hotel Graf Eberhard**

Standort	Bad Urach (D)
Fertigstellung	<b>2002</b>
Bauherr	Schmids Hotel u. Erlebnisgastr., Bad Urach (D)
Architekt	
TWPL	
Membranstatik	Clauss Markisen Projekt GmbH, Bissingen (D)
Membranbau	Clauss Markisen Projekt GmbH, Bissingen (D)
ETFE-Folie	einlagig, mechanisch vorgespannt
Feldgröße	ca. 30 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	ca. 30 m <sup>2</sup>
Anwendung	Vordach Freibereich, Hotel

**2003 – 01      Königliches Finanzministerium (HM Treasury)**

Standort	King Charles Street, London (GB)
Fertigstellung	<b>2003</b>
Bauherr	
Architekt	Foster & Partners, London (GB)
TWPL	
Membranstatik	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	Pneus
Feldgröße	
Gesamtfläche	ca. 1.720 m <sup>2</sup>
Anwendung	Atriumdach, Bürogebäude

**2003 – 02      Metro Centre Gateshead**

Standort	Gateshead (GB)
Fertigstellung	<b>2003</b>
Bauherr	
Architekt	Haskoll Architects & Designers, London (GB)
TWPL	
Membranstatik	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	Pneus
Feldgröße	
Gesamtfläche	ca. 800 m <sup>2</sup>
Anwendung	Atriumdach, Geschäftgebäude (Shopping Mall)

**2003 – 03      Festo Technologiezentrum Paris**

Standort	Paris (F)
Fertigstellung	<b>2003</b>
Bauherr	Festo AG & Co. KG, Esslingen (D)
Architekt	Architekturbüro Jaschek, Stuttgart (D)
TWPL	Dr. Grotkop und Partner, Bremen (D)
Membranstatik	Dr. Grotkop und Partner, Bremen (D)
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig (o/m/u: 200/100/200 µm)
Feldgröße	Spannweite ca. 3,30 m
Gesamtfläche	ca. 470 m <sup>2</sup>
Anwendung	Atriumdach (Verschattung), Bürogebäude

**2003 – 04      South Cambridge District Council**

Standort	Cambourne Business Park, Cambridge (GB)
Fertigstellung	<b>2003</b>
Bauherr	
Architekt	Aukett, Fitzroy Robinson, London (GB)
TWPL	
Membranstatik	
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	Pneus
Feldgröße	
Gesamtfläche	ca. 800 m <sup>2</sup>
Anwendung	Atriumdach, Bürogebäude

**2003 – 05 “Gießhalle“ Landschaftspark Nord**

Standort	Landschaftspark Nord, Duisburg (D)
Fertigstellung	<b>2003</b>
Bauherr	
Architekt	Planinghaus Architekten, Darmstadt (D)
TWPL	Schlaich, Bergemann u. Partner, Stuttgart (D)
Membranstatik	
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	Pneus
Feldgröße	
Gesamtfläche	ca. 570 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hofüberdachung (verfahrbar), Freilichtbühne

**2003 – 06 Freizeitbad Sonneberg**

Standort	Sonneberg (D)
Fertigstellung	<b>2003</b>
Bauherr	Stadt Sonneberg (D)
Architekt	Glöckner Architekten, Nürnberg (D)
TWPL	Ingenieurbüro Schritteser, Nürnberg (D)
Membranstatik	Engineering + Design, Rosenheim (D)
Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig (o/m/u: 200/100/180 µm)
Feldgröße	16,0 x 2,90 m = ca. 46,4 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	ca. 1.460 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hallendach, Schwimmbad

**2003 – 07 Sahara Star Hotel Mumbai**

Standort	Mumbai, ehemals Bombay (Indien)
Fertigstellung	<b>2003</b>
Bauherr	Sahara Star Hotel (Indien)
Architekt	Upasnik (Indien)
TWPL	Arup; Ltd. London (GB)
Membranstatik	Engineering + Design, Rosenheim (D)
Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig (225/225/225 µm)
Feldgröße	10 Rauten, jeweils ca. 127 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	ca. 1.273 m <sup>2</sup>
Anwendung	Atriumdach, Hotel

**2003 – 08 Vordach Terminal 2 - Flughafen München MUC**

Standort	Flughafen München, Terminal 2 (D)
Fertigstellung	<b>2003</b>
Bauherr	Flughafen München GmbH (D)
Architekt	Koch + Partner, München (D)
TWPL	Seeberger Friedl und Partner, München (D)
Membranstatik	Ingenieurbüro Teschner, Föising (D)
Membranbau	Koch Membranen, Rimsting (D)
ETFE-Folie	Pneus (untere Lage ETFE 200 µm auf Seilnetz)
Feldgröße	9 x 18 m; 9,6 x 14,80 m; 9,6 x 12,8 m
Gesamtfläche	ca. 3.710 m <sup>2</sup>
Anwendung	Vordach Flughafen Terminal

**2003 – 09 Ganzjahresbad “Elypso“**

Standort	Deggendorf (D)
Fertigstellung	<b>2003</b>
Bauherr	Stadtwerke Deggendorf (D)
Architekt	PfG, Lechbruck(D), Gollwitzer, Deggendorf (D)
TWPL	Häussler Planung GmbH, Kempten (D)
Membranstatik	
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig
Feldgröße	Hallendurchmesser: ca. 55 m
Gesamtfläche	ca. 1.850 m <sup>2</sup> (Oberfläche)
Anwendung	Hallendach, Schwimmbad

**2003 – 10 Time Warner Building**

Standort	New York City (USA)
Fertigstellung	<b>2003</b>
Bauherr	
Architekt	Skidmore Owings Merrill, New York (USA)
TWPL	James Carpenter Design, New York (USA)
Membranstatik	
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	Pneus
Feldgröße	
Gesamtfläche	ca. 100 m <sup>2</sup>
Anwendung	Fassade, Bürogebäude

**2003 – 11 Geschäftshaus Rauch**

Standort	Hall in Tirol (A)
Fertigstellung	<b>2003</b>
Bauherr	Fa. Rauch, Hall (A)
Architekt	Atelier Villa Breitenegg, Hall in Tirol (A)
TWPL	Bernard und Partner, Hall in Tirol (A)
Membranstatik	Engineering + Design, Rosenheim (D)
Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig (o/m/u: 225/100/225 µm)
Feldgröße	Oberlichte: 4,90 m x 10,0 m = 49 m <sup>2</sup> Atrien: 5,40 m x 8,30 m = 44,8 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	Oberlichte: ca. 135 m <sup>2</sup> , Atrien: ca. 98 m <sup>2</sup>
Anwendung	Oberlichte, Büro- u. Geschäftsgebäude

**2003 – 12 Kingsdale School London**

Standort	London (GB)
Fertigstellung	<b>2003</b>
Bauherr	Departm. for Education and Skills DFES (GB)
Architekt	De Rijke Marsh Morgan, London (GB)
TWPL	
Membranstatik	
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig
Feldgröße	
Gesamtfläche	ca. 5.000 m <sup>2</sup>
Anwendung	Atriumdach, Bildungseinrichtung

**2003 – 13 GTZ Bad Tölz**

Standort	ehem. Flintkaserne Bad Tölz (D)
Fertigstellung	<b>2003</b>
Bauherr	Gerontologiezentrum (GTZ) Bad Tölz
Architekt	Architekturbüro D. J. Siegert, Bad Tölz (D)
TWPL	GU: Wörsching GmbH & Co. KG, Starnberg (D)
Membranstatik	Tensys Ltd. Bath (GB)
Membranbau	Hightex GmbH, Rimsting (D)
ETFE-Folie	einlagig, mech. vorgespannt
Feldgröße	Spannweite max. ca. 4 m
Gesamtfläche	ca. 1.550 m <sup>2</sup>
Anwendung	Fassade, Klinikgebäude

**2003 – 14 New Oxford Nuffield Hospital**

Standort	Oxford (GB)
Fertigstellung	<b>2003</b>
Bauherr	Nuffield Hospitals Oxford
Architekt	Kendall Kingscott Partnership, Bristol (GB)
TWPL	Buro Happold, Bath (GB)
Membranstatik	Engineering + Design, Rosenheim (D)
Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig
Feldgröße	max. 3,05 m x 20,00 m = ca. 61 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	ca. 635 m <sup>2</sup>
Anwendung	Atriumdach u. Fassade, Klinikgebäude

**2003 – 15 Waschanlage "Car Royal" Berlin**

Standort	Kappweg, Berlin (D)
Fertigstellung	<b>2003</b>
Bauherr	Car Royal, Berlin (D)
Architekt	Ges. f. Arch. u. Ing.-wesen mbH, Berlin (D)
TWPL	Ing. Stefan Schlechter, Albstadt (D)
Membranstatik	Engineering + Design, Rosenheim (D)
Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
ETFE-Folie	mech. vorgesp. Folie, einlagig (200 µm)
Feldgröße	max. 2,16 m x 20,83 m = ca. 45 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	ca. 310 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hofüberdachung, Waschanlage

**2003 – 16 Tanaka Business School London**

Standort	London (GB)
Fertigstellung	<b>2003</b>
Bauherr	Tanaka Business School, London (GB)
Architekt	Foster & Partners, London (GB)
Tragwerksplaner	Buro Happold, Bath (GB)
Membranstatik	
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig
Feldgröße	4,2 m x 20 m = ca. 84 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	
Anwendung	Atriumdach, Bildungseinrichtung

<b>2003 – 17</b>	<b>Schmetterlingshaus “Papiliorama“</b>	Standort	Kerzers / Chiètres, Kanton Freiburg (CH)
		Fertigstellung	<b>2003 (Sanierung des Originals von 1984)</b>
		Bauherr	Swiss Tropical Gardens (CH)
		Architekt	
		TWPL	
		Membranstatik	
		Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
		ETFE-Folie	Pneus
		Feldgröße	Kantenlänge Dreiecke max. ca. 3,5 m
		Gesamtfläche	ca. 2.400 m <sup>2</sup> (d = ca. 42 m, h = ca. 11 m)
		Anwendung	Hallendach, Botanischer Garten
<b>2003 – 18</b>	<b>“Pinas“ Den Helder</b>	Standort	Den Helder (NL)
		Fertigstellung	<b>2003</b>
		Bauherr	Ontwikkelings- en exploitatiemaatschappij Willemsoord, Den Helder (NL)
		Architekt	CePeZed, Delft (NL)
		TWPL	D3BN, Den Haag (NL), Tentech, Utrecht (NL)
		Membranstatik	Tentech, Utrecht (NL)
		Membranbau	PolyNed, Steenwijk (NL)
		ETFE-Folie	Pneus
		Feldgröße	ca. 13 m x 3 m = ca. 39 m <sup>2</sup>
		Gesamtfläche	ca. 234 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Hallendach, Ausstellung
<b>2003 – 19</b>	<b>Walkway BMW München</b>	Standort	BMW Werk 1.1, München (D)
		Fertigstellung	<b>2003</b>
		Bauherr	BMW, München (D)
		Architekt	Lenzer + Strutz, München (D)
		TWPL	Burggraf, Weichinger & P., München (D)
		Membranstatik	Engineering + Design, Rosenheim (D)
		Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
		ETFE-Folie	Pneus, dreilagig, 200/100/200 µm
		Feldgröße	ca. 48 m <sup>2</sup>
		Gesamtfläche	ca. 48 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Oberlicht, Betriebsgebäude (Verbindungsbau)
<b>2003 – 20</b>	<b>Pneumatic protection for a Monastery model</b>	Standort	Sant Cugat del Vallès, Barcelona (E)
		Fertigstellung	<b>2003</b>
		Bauherr	
		Architekt	Ramon Sastre, Barcelona (E)
		TWPL	T&P (E)
		Membranstatik	T&P (E)
		Membranbau	T&P (E)
		ETFE-Folie	ggf. ETFE-Folie, pneumatisch gestützt
		Feldgröße	Durchmesser ca. 2 m
		Gesamtfläche	ca. 10 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Oberlicht Kuppel



**2004 – 01    RTL II**

Standort	München (D)
Fertigstellung	<b>2004</b>
Bauherr	RTL II (D)
Architekt	Weinberger, Anderl, Seer, Schongau (D)
TWPL	
Membranstatik	Engineering + Design, Rosenheim (D)
Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
ETFE-Folie	Pneus
Feldgröße	
Gesamtfläche	ca. 480 m <sup>2</sup>
Anwendung	Atriumdach, Bürogebäude

**2004 – 02    Komodowaranhaus Zoo London**

Standort	London Zoo (GB)
Fertigstellung	<b>2004</b>
Bauherr	London Zoo (GB)
Architekt	Wharmby Kozdon Architects, London (GB)
TWPL	
Membranstatik	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	Pneus, zweilagig
Feldgröße	
Gesamtfläche	ca. 350 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hallendach, Tiergehege

**2004 – 03    Cosmos Saarbrücken**

Standort	Saarbrücken (D)
Fertigstellung	<b>2004</b>
Bauherr	Cosmos Versicherungs AG, Saarbrücken (D)
Architekt	Rudolf Blatt, Kaiserslautern (D)
TWPL	IBB, München u. Posselt Consult, Übersee (D)
Membranstatik	Engineering + Design, Rosenheim (D)
Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig (250/100/200 µm)
Feldgröße	ca. 3,3 x 36,6 m = ca. 120 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	4 Felder á 120 m <sup>2</sup> = ca. 480 m <sup>2</sup>
Anwendung	Atriumdach, Bürogebäude

**2004 – 04    Kristall Palm Beach (Umbau)**

Standort	Stein bei Nürnberg (D)
Fertigstellung	<b>2004 (Umbau/Sanierung)</b>
Bauherr	Stadt Nürnberg
Architekt	Udo Goetz, Nürnberg (D)
TWPL	Goetz + Neun, Nürnberg (D)
Membranstatik	Covertex GmbH, Obing (D)
Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig
Feldgröße	
Gesamtfläche	ca. 2.530 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hallendach, Schwimmbad

**2004 – 05 Orang-Utan-Haus Tierpark Hagenbeck**

Standort	Tierpark Hagenbeck, Hamburg (D)
Fertigstellung	<b>2004</b>
Bauherr	Tierpark Hagenbeck GmbH, Hamburg (D)
Architekt	PSP Architekten – Ingenieure, Hamburg (D)
TWPL	Wetzel & von Seht, Hamburg (D)
Membranstatik	Dr. Grotkop und Partner, Bremen (D)
Membranbau	Skyspan Europe GmbH, Rimsting (D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig
Feldgröße	ca. 45 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	ca. 35 Pneus x 45 m <sup>2</sup> = ca. 1.575 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hallendach (verfahrbar), Tiergehege

**2004 – 06 Shopping Mall Punta Langosta**

Standort	Cozumel (MEX)
Fertigstellung	<b>2004</b>
Bauherr	GICSA (MEX)
Architekt	Grupo arquitech (MEX)
TWPL	Raul Velez
Membranstatik	Fichtner + Köppl, Rosenheim (D)
Membranbau	Skyspan Europe GmbH, Rimsting (D)
ETFE-Folie	mech. vorgesp. Membran, einlagig
Feldgröße	elliptische Oberlichte, ca. 5 m x 2 m
Gesamtfläche	ca. 20 m <sup>2</sup> ETFE; ca. 1.400 m <sup>2</sup> PVC/PES
Anwendung	Oberlichte, Geschäftsgebäude (Shopping Mall)

**2004 – 07 Art Center College of Design Pasadena**

Standort	Pasadena, California (USA)
Fertigstellung	<b>2004</b>
Bauherr	
Architekt	Daly Genik Architects (USA)
TWPL	
Membranstatik	
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	Pneus
Feldgröße	
Gesamtfläche	ca. 1.000 m <sup>2</sup>
Anwendung	Fassade, Bildungseinrichtung

**2004 – 08 Tankstelle Germering**

Standort	Germering (D)
Fertigstellung	<b>2004</b>
Bauherr	Allguth GmbH, München (D)
Architekt	Architekten Haak & Höpfner, München (D)
Tragwerksplaner	Ingenieurbüro Brengelmann (D)
Membranstatik	Engineering + Design, Rosenheim (D)
Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
ETFE-Folie	Pneus, zwei- und dreilagig (o/m/u: 200/ (100) /200 µm) (WS = Waschstr., SB = Shopbereich)
Feldgröße	WS: 4,6 <sup>2</sup> m <sup>2</sup> = 21 m <sup>2</sup> ; SB: 7,5 m x 7,5 m = 57 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	WS: 105 m <sup>2</sup> ; SB: 57 m <sup>2</sup>
Anwendung	Oberlichte, Tankstelle

**2004 – 09 Tankstelle Georg-Brauchle-Ring**

Standort	Georg-Brauchle-Ring, München (D)
Fertigstellung	<b>2004</b>
Bauherr	Allguth GmbH, München (D)
Architekt	Architekten Haak & Höpfner, München (D)
Tragwerksplaner	Ingenieurbüro Brengelmann (D)
Membranstatik	Engineering + Design, Rosenheim (D)
Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig (o/m/u: 250/100/250 µm)
Feldgröße	ca. 4,3 m x 6,3 m = 27 m <sup>2</sup> + Halbrundfeld 16 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	ca. 6 x 27 m <sup>2</sup> + 1 x 16 m <sup>2</sup> = ca. 178 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hofüberdachung und Oberlichte, Tankstelle

**2004 – 10 Tankstelle Gilching**

Standort	Gilching (D)
Fertigstellung	<b>2004</b>
Bauherr	Allguth GmbH, München (D)
Architekt	Architekten Haak & Höpfner, München (D)
Tragwerksplaner	Ingenieurbüro Brengelmann (D)
Membranstatik	Engineering + Design, Rosenheim (D)
Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig (o/m/u: 225/100/225 µm)
Feldgröße	TB: 71 m <sup>2</sup> , WS: 20 m <sup>2</sup> , S: 35 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	TB: 284 m <sup>2</sup> ; WS: 80 m <sup>2</sup> ; SB: 70 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hofüberdachung u. Oberlichte, Tankstelle (TB = Tankbereich, WS = Waschstr., S = Shop)

**2004 – 11 Amsterdam Arena**

Standort	Amsterdam (NL)
Fertigstellung	<b>2004</b>
Bauherr	Amsterdam Arena, Amsterdam (NL)
Architekt	
Tragwerksplaner	
Membranstatik	Tentech, Utrecht (NL)
Membranbau	Buitink Technology, Duiven (NL)
ETFE-Folie	einlagig, mechanisch vorgespannt (200 µm)
Feldgröße	ca. 9 m x 4 m = ca.36 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	ca. 4 x 41 = ca. 164 m <sup>2</sup>
Anwendung	Tribünendach, Stadion

**2004 – 12 Schuifdak**

Standort	Niederlande
Fertigstellung	<b>2004</b>
Bauherr	
Architekt	
TWPL	
Membranstatik	
Membranbau	Buitink Technology (NL)
ETFE-Folie	einlagig (200 µm), mechanisch vorgespannt
Feldgröße	ca. 3 m x 5 m = ca. 15 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	2 Felder à ca. 15 m <sup>2</sup> = ca. 30 m <sup>2</sup>
Anwendung	Oberlichte (verfahrbar), Wohngebäude

**2004 – 13 Frankenalbtherme Bad Hersbruck**

Standort	Bad Hersbruck (D)
Fertigstellung	<b>2004</b>
Bauherr	
Architekt	
TWPL	
Membranstatik	Skyspan Europe GmbH, Rimsting (D)
Membranbau	Skyspan Europe GmbH, Rimsting (D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig
Feldgröße	
Gesamtfläche	
Anwendung	Hallendach, Schwimmbad

**2004 – 14 Trichterschirme IHK Würzburg**

Standort	Würzburg (D)
Fertigstellung	<b>2004</b>
Bauherr	IHK Würzburg-Schweinfurt
Architekt	Göger und Redelbach, Marktheidenfeld (D)
TWPL	SMP, Berlin (D)
Membranstatik	SMP, Berlin (D)
Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
ETFE-Folie	Mech. vorgesp. Folie, einlagig auf Seilnetz
Feldgrößen	ca. 14 x 14 m, 12,5 x 12,5 m; 11 x 11 m
Gesamtfläche	ca. 500 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hofüberdachung (Trichterschirme, Folie auf Seilnetz, Bürogebäude (IHK))

Bild/Quelle: Lutz Schöne [177]

**2004 – 15 Oval am Basler Platz**

Standort	Wilhelm-Leuschner-Str., Frankfurt/Main (D)
Fertigstellung	<b>2004</b>
Bauherr	BGA, Hamburg (D)
Architekt	Albert-Speer & Partner, Frankfurt/Main (D)
TWPL	Grotkopp und Partner, Bremen (D)
Membranstatik	Grotkopp und Partner, Bremen (D)
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	Pneus
Feldgröße	
Gesamtfläche	ca. 700 m <sup>2</sup>
Anwendung	Atriumdach, Bürogebäude

**2004 – 16 Dom Aquaree – Hotelatrium**

Standort	Karl-Liebknecht-Straße, Berlin (D)
Fertigstellung	<b>2004</b>
Bauherr	DIFA AG (D)
Architekt	NPS – Tchoban, Voss GbR, Berlin (D)
TWPL	Dr. Grotkop und Partner, Bremen (D)
Membranstatik	Dr. Grotkop und Partner, Bremen (D)
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	Pneus
Feldgröße	
Gesamtfläche	ca. 820 m <sup>2</sup>
Anwendung	Atriumdach, Hotel

**2004 – 17 Dom Aquaree – Atrium Bürogebäude**

Standort	Karl-Liebknecht-Straße, Berlin (D)
Fertigstellung	<b>2004</b>
Bauherr	DIFA AG (D)
Architekt	NPS – Tchoban, Voss GbR, Berlin (D)
TWPL	Dr. Grotkopp und Partner, Bremen (D)
Membranstatik	Dr. Grotkopp und Partner, Bremen (D)
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	Pneus
Feldgröße	
Gesamtfläche	ca. 1.600 m <sup>2</sup>
Anwendung	Atriumdach, Bürogebäude

**2004 – 18 Dom Aquaree – Shopping Mall**

Standort	Heiligegeistgasse, Berlin (D)
Fertigstellung	<b>2004</b>
Bauherr	DIFA AG (D)
Architekt	NPS – Tchoban, Voss GbR, Berlin (D)
TWPL	Dr. Grotkop und Partner, Bremen (D)
Membranstatik	Dr. Grotkop und Partner, Bremen (D)
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	Pneus
Feldgröße	
Gesamtfläche	ca. 1.550 m <sup>2</sup>
Anwendung	Überdachung Walkway, Geschäftsgebäude

**2004 – 19 Fussball Globus WM 2006™**

Standorte	12 Austragungsstätten der Fussball WM 2006 Berlin, München etc. (D)
Fertigstellung	<b>2004</b>
Bauherr	FIFA WM 2006™
Architekt	Art Event, Idee: André Heller, Wien (A)
TWPL	Mero GmbH & Co. KG (D)
Membranstatik	Covertex GmbH, Obing (D)
Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig (200 µm / PVC Typ I / 200 µm)
Feldgröße	Globus d = ca. 15 m
Gesamtfläche	ca. 736 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hallendach (Pavillon, ETFE-Folie außen und innen, Mittell.: PVC/PES-Gewebe), Ausstellung

**2004 – 20 Stratford & Ebbsfleet Stations London**

Standort	London (GB)
Fertigstellung	<b>2004</b>
Bauherr	
Architekt	Rail Link Engineering, London (GB)
TWPL	Arup, London (GB)
Membranstatik	Engineering + Design, Rosenheim (D)
Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig (o/m/u: 250/100/250 µm)
Feldgröße	ca. 3,63 m x 12,16 m = ca. 44,14 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	ca. 650 m <sup>2</sup> je Bahnhof
Anwendung	Atriumdach, Bahnhof (2 Bahnhöfe)

**2004 – 21 Festo Budapest**

Standort	Budapest (H)
Fertigstellung	<b>2004</b>
Bauherr	Festo (H)
Architekt	Architekturbüro Jaschek, Stuttgart (D)
TWPL	Dr. Grotkop und Partner, Bremen (D)
Membranstatik	Dr. Grotkop und Partner, Bremen (D)
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig
Feldgröße	ca. 75 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	
Anwendung	Oberlicht (Verschattung), Bürogebäude

**2004 – 22 IASON Graz**

Standort	Graz-Seiersberg (A)
Fertigstellung	<b>2004</b>
Bauherr	Atalante Forschungs- u. Beratungs GmbH
Architekt	Arch. Dipl.-Ing. Gerhard Kopeinig, Velden (A)
TWPL	
Membranstatik	Skyspan Europe GmbH, Rimsting (D)
Membranbau	Skyspan Europe GmbH, Rimsting (D)
ETFE-Folie	mech. vorgespannt, einlagig (250 µm)
Feldgröße	Spannweite ca. 2 m
Gesamtfläche	ca. 240 m <sup>2</sup>
Anwendung	Fassade, Bürogebäude

**2004 – 23 Fachbereich Biowissenschaften TUM**

Standort	Freising (D)
Fertigstellung	<b>2004</b>
Bauherr	Freistaat Bayern / Stadt Freising (D)
Architekt	Staatliches Hochbauamt Freising (D)
TWPL	
Membranstatik	
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	Pneus
Feldgröße	
Gesamtfläche	ca. 370 m <sup>2</sup>
Anwendung	Atriumdach, Bildungseinrichtung

**2004 – 24 Jean-Paul-Therme Bad Steben**

Standort	Bad Steben (D)
Fertigstellung	<b>2004</b>
Bauherr	Bayerisches Staatsbad Bad Steben GmbH (D)
Architekt	Lauer + Lebok Architekten, Lichtenfels (D)
TWPL	IPLAN GmbH, Kulmbach (D)
Membranstatik	Engineering + Design, Rosenheim (D)
Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig (200/100/100 µm)
Feldgröße	ca. 2,36 x 9,80 m = ca. 23 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	4 Felder á ca. 23 m <sup>2</sup> = ca. 92 m <sup>2</sup>
Anwendung	Oberlichte, Schwimmbad (Thermalbecken)

**2004 – 25 South East Essex College**

Standort	Southend on Sea, Essex (GB)
Fertigstellung	<b>2004</b>
Bauherr	
Architekt	KSS Sports Leisure Design, London (GB)
TWPL	
Membranstatik	
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	Pneus
Feldgröße	
Gesamtfläche	ca. 4.000 m <sup>2</sup>
Anwendung	Atriumdach und Fassade, Bildungseinrichtung

**2004 – 26 Messestand Schwing**

Standort	BAUMA 2004, Messegelände München (D)
Fertigstellung	<b>2004</b>
Bauherr	Schwing GmbH, Herne (D)
Architekt	Promotex GmbH, Münster (D)
TWPL	Merk Holzbau, Aichach (D)
Membranstatik	Skyspan Europe GmbH, Rimsting (D)
Membranbau	Skyspan Europe GmbH, Rimsting (D)
ETFE-Folie	einlagig, mechanisch vorgespannt, 200 µm
Feldgröße	ca. 1,2 m x 3,0 m = ca. 3,6 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	2 Giebelwände á ca. 191 m <sup>2</sup> = ca. 382 m <sup>2</sup>
Anwendung	Fassade, Ausstellung, temporär

**2004 – 27 Garden of Eden - Biome Link Canopy**

Standort	Garden of Eden, St. Austell, Cornwall (GB)
Fertigstellung	<b>2004</b>
Bauherr	McAlpine Joint Venture Eden Project, Hemel Hempstead (GB)
Architekt	Nicholas Grimshaw & Partners, London (GB)
TWPL	SKM Anthony Hunt, Cirenc., Cloucestersh. (GB)
Membranstatik	SMP, Berlin (D)
Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
ETFE-Folie	einlagig, mechanisch vorgespannt, 250 µm
Feldgröße	ca. 7 x 18 m = ca. 126 m <sup>2</sup> , Seilabstand 600 mm
Gesamtfläche	ca. 18 x 50 m = ca. 900 m <sup>2</sup>
Anwendung:	Vordach, Freibereich Botanischer Garten

**2004 – 28 Kristall Weserberglandtherme Bad Karlshafen**

Standort	Bad Karlshafen
Fertigstellung	<b>2003</b>
Bauherr	Stadt Bad Karlshafen
Architekt	Goetz + Neun, Nürnberg (D)
TWPL	Udo Goetz, Nürnberg (D)
Membranstatik	Engineering + Design, Rosenheim (D)
Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig
Feldgröße	max. 3,42 m x 17,44 m = ca. 60 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	ca. 1.830 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hallendach, Schwimmbad

**2005 – 01 Allianz Arena**

Standort	München Fröttmaning (D)
Fertigstellung	<b>2005</b>
Bauherr	München Stadion GmbH, München (D)
Architekt	Herzog & De Meuron, Basel (CH)
TWPL	Primärtragwerk Stahl: SSP, München (D) Sekundärtragwerk Stahl: IP, Radolfzell (D)
Membranstatik	Engineering + Design, Rosenheim (D)
Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
ETFE-Folie	Pneus, zweilagig (o: 200-250 / u: 180-250 µm)
Feldgröße	max. ca. 17,0 m x 5,0 m = ca. 85 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	2.760 ETFE-Folienpneus, ca. 74.000 m <sup>2</sup>
Anwendung	Tribünendach (Hülle), Stadion

**2005 – 02 AWD Arena**

Standort	Niedersachsenstadion Hannover (D)
Fertigstellung	<b>2005</b>
Bauherr	Landeshauptstadt Hannover (D)
Architekt	Schulitz & Partner, Braunschweig (D)
TWPL	RFR, Stuttgart u. Weyer, Dortmund (D)
Membranstatik	Engineering + Design, Rosenheim (D)
Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
ETFE-Folie	Mech. vorgesp. Folie, einlagig (250 µm)
Feldgröße	max. (18 m + 13 m)/2 x 23,4 m = ca. 362,7 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	ca. 10.000 m <sup>2</sup>
Anwendung	Tribünendach, Stadion

**2005 – 03 IABG Ottobrunn**

Standort	Ottobrunn bei München (D)
Fertigstellung	<b>2005</b>
Bauherr	Industrieanl. Betriebsges. mbH, Ottobrunn (D)
Architekt	WSSA GmbH, München (D)
TWPL	Stahltragwerk: Posselt Consult, Übersee /Chiemsee (D), Gebäude: BWP, München (D)
Membranstatik	Engineering + Design GbR, Rosenheim (D)
Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
ETFE-Folie	Pneu, dreilagig (o/m/u: 250/200/250 µm)
Feldgröße	Dach: max. ca. 5,4 m x 37,6 m = ca. 203 m <sup>2</sup> Fassade: ca. 3,8 m x 2,6 m = ca. 10 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	ca. 2.300 m <sup>2</sup> (Felder: Dach: 10, Fassade: 24)
Anwendung	Atriumdach, Bürogebäude

**2005 – 04 "Tropical Island"**

Standort	Brand, Brandenburg (D)
Fertigstellung	<b>2005</b>
Bauherr	Tropical Island Asset Management GmbH (D)
Architekt	CL MAP, München (D)
TWPL	Form TL, Radolfzell (D)
Membranstatik	Form TL, Radolfzell (D)
Membranbau	Cenotec, Greven (D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig, 200 / 100 /200 µm
Feldgröße	ca. 20,6 m x 15,8 m = ca. 325 m <sup>2</sup> (56 Pneus)
Gesamtfläche	4 Felder á ca. 5.000 m <sup>2</sup> = ca. 20.000 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hallendach, Schwimmbad (Freizeitpark)



<b>2005 – 05</b>	<b>Scene Fluglabor Holzkirchen- Pnehülle</b>	Standort	Valley, Holzkirchen, Bayern (D)
		Fertigstellung	<b>2005</b>
		Bauherr	Fraunhofer IBP, Holzkirchen (D)
		Architekt	Henn Architekten, München (D)
		TWPL	Wiehag, Altheim (A), SSP, München (D)
		Membranstatik	Engineering + Design GbR, Rosenheim (D)
		Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
		ETFE-Folie	Pneu, dreilagig (100 bis 250 µm)
		Feldgröße	max. ca. 3,65 m x 8,96 m = ca. 32 m <sup>2</sup>
		Gesamtfläche	ca. 525 m <sup>2</sup> (16 Felder + 6 RWA)
		Anwendung	Hallendach, Laborgebäude
<b>2005 – 06</b>	<b>Scene Fluglabor Holzkirchen- Vordach</b>	Standort	Valley, Holzkirchen, Bayern (D)
		Fertigstellung	<b>2005</b>
		Bauherr	Fraunhofer IBP, Holzkirchen (D)
		Architekt	Henn Architekten, München (D)
		TWPL	Wiehag, Altheim (A), SSP, München (D)
		Membranstatik	Engineering + Design GbR, Rosenheim (D)
		Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
		ETFE-Folie	mech. vorgesp., einlagige Folie (200 u. 250 µm)
		Feldgröße	ca. 0,70 m x 2,40 m = ca. 1,5 m <sup>2</sup>
		Gesamtfläche	2 Giebels. x 8 Felder x ca. 1,5 m <sup>2</sup> = ca. 24 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Vordach, Laborgebäude
<b>2005 – 07</b>	<b>Messturm Landshut</b>	Standort	Landshut (D)
		Fertigstellung	<b>2005</b>
		Bauherr	Vodafone D2 GmbH, Düsseldorf (D)
		Architekt	FSP GmbH, Köln (D)
		TWPL	Gebäudetechnik & Ingenieurbau (GTIB) GmbH
		Membranstatik	Bauer Membranbau, Freising (D)
		Membranbau	Bauer Membranbau, Freising (D)
		ETFE-Folie	mech. vorgespannt, einlagig, 250 µm
		Feldgröße	
		Gesamtfläche	ca. 120 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Vordach, Freibereich Betriebsgebäude
<b>2005 – 08</b>	<b>Føsilø Kopenhagen (Seed Silos)</b>	Standort	Kopenhagen (DK)
		Fertigstellung	<b>2005</b>
		Bauherr	
		Architekt	Jensen + Jørgensen + Wohlfeldt, Kopenhagen (DK), MVRDV, Rotterdam (NL)
		TWPL	Dr. Grotkop und Partner, Bremen (D)
		Membranstatik	Dr. Grotkop und Partner, Bremen (D)
		Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
		ETFE-Folie	Pneus, dreilagig
		Feldgröße	
		Gesamtfläche	ca. 1.000 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Atriumdach, Wohngebäude (Umbau von Silos)

<b>2005 – 09</b>	<b>Swinburne University Melbourne</b>	Standort	Melbourne (Australien)
		Fertigstellung	<b>2005</b>
		Bauherr	
		Architekt	Design Inc. (Australien)
		TWPL	
		Membranstatik	
		Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
		ETFE-Folie	Pneus
		Feldgröße	
		Gesamtfläche	ca. 1.200 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hofüberdachung, Bildungseinrichtung		
<b>2005 – 10</b>	<b>Jean Paul Gaultier Paris</b>	Standort	Rue St Martin, Paris (F)
		Fertigstellung	<b>2005</b>
		Bauherr	
		Architekt	Alain Moatti et Henri Riviere, Paris (F)
		TWPL	RFR, Paris (F)
		Membranstatik	
		Membranbau	Vector Foiltec Group, Paris (F)
		ETFE-Folie	Pneus
		Feldgröße	ca. 5 m x 5 m = ca. 25 m <sup>2</sup>
		Gesamtfläche	3 Oberlichte x ca. 25 m <sup>2</sup> = ca. 75 m <sup>2</sup>
Anwendung	Oberlichte, Geschäftsgebäude		
<b>2005 – 11</b>	<b>Shopping Mall Athen – “The Mall“</b>	Standort	Maroussi, Athen (GR)
		Fertigstellung	<b>2005</b>
		Bauherr	
		Architekt	Ergotex Ltd. (GR)
		TWPL	
		Membranstatik	
		Membranbau	Vector Foiltec, Paris (F)
		ETFE-Folie	Pneus
		Feldgröße	
		Gesamtfläche	ca. 9.700 m <sup>2</sup>
Anwendung	Atriumdach, Geschäftsgeb. (Shopping Mall)		
<b>2005 – 12</b>	<b>Schlumberger Research Centre</b>	Standort	Cambridge (GB)
		Fertigstellung	<b>2005</b>
		Bauherr	
		Architekt	Michael Hopkins & Partners, London (GB)
		TWPL	
		Membranstatik	
		Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
		ETFE-Folie	Pneus
		Feldgröße	
		Gesamtfläche	
Anwendung	Atriumdach, Bürogebäude		

**2005 – 13      Jugendherberge Kiel**

Standort                      Kiel (D)  
 Fertigstellung              **2005**  
 Bauherr                        DJH (D)  
 Architekt  
 TWPL                          Borowski + Partner, Eckernförde (D)  
 Membranstatik  
 Membranbau                Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)  
 ETFE-Folie                  Pneus  
 Feldgröße  
 Gesamtfläche                ca. 158 m<sup>2</sup>  
 Anwendung                 Atriumdach, Wohngebäude (Jugendherberge)

**2005 – 14      Johannisbad Freiberg**

Standort                      Freiberg (D)  
 Fertigstellung              **2005**  
 Bauherr  
 Architekt  
 TWPL  
 Membranstatik  
 Membranbau                Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)  
 ETFE-Folie                  Pneus, dreilagig  
 Feldgröße  
 Gesamtfläche  
 Anwendung                 Hallendach, Schwimmbad

**2005 – 15      Kindertagesstätte "Plappersnut"**

Standort                      Wismar (D)  
 Fertigstellung              **2005**  
 Bauherr  
 Architekt                      Institut für Gebäude + Energie + Licht Planung  
    (IGEL), Wismar (D)  
 TWPL  
 Membranstatik  
 Membranbau                Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)  
 ETFE-Folie                  Pneus  
 Feldgröße  
 Gesamtfläche                ca. 1.000 m<sup>2</sup>  
 Anwendung                 Atriumdach, Bildungseinrichtung

**2005 – 16      "Atlantis" Aquapark Ljubljana**

Standort                      Ljubljana (Slovenien)  
 Fertigstellung              **2005**  
 Bauherr  
 Architekt                      Rudolf Wienands, München (D); Biro 71,  
    Ljubljana (Slovenien)  
 TWPL  
 Membranstatik  
 Membranbau                Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)  
 ETFE-Folie                  Pneus, dreilagig  
 Feldgröße  
 Gesamtfläche                ca. 1.500 m<sup>2</sup>  
 Anwendung                 Hallendach, Schwimmbad

**2005 – 17      “Gerdauring 25“ Hamburg**

Standort                      Hamburg (D)  
 Fertigstellung            **2005**  
 Bauherr  
 Architekt                    Planerkollektiv Schües,Tietz, Trommer (D)  
 TWPL  
 Membranstatik  
 Membranbau                Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)  
 ETFE-Folie                  Pneus, dreilagig  
 Feldgröße  
 Gesamtfläche                ca. 390 m<sup>2</sup>  
 Anwendung                 Atriumdach, Wohngebäude

**2005 – 18      “HafenCity“ Am Sandtorkai Hamburg**

Standort                      Am Sandtorkai 56, Hamburg (D)  
 Fertigstellung            **2005**  
 Bauherr  
 Architekt                    APB Architekten BDA, Hamburg (D)  
 TWPL                         HTG GmbH, Gnadebusch  
 Membranstatik  
 Membranbau                Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)  
 ETFE-Folie                  Pneus  
 Feldgröße  
 Gesamtfläche                ca. 200 m<sup>2</sup>  
 Anwendung                 Atriumdach, Büro- und Wohngebäude

**2005 – 19      Kensington City Academy Liverpool**

Standort                      Liverpool  
 Fertigstellung            **2005**  
 Bauherr  
 Architekt                    Capita Percy Thomas Architects, Cardiff (GB)  
 TWPL  
 Membranstatik  
 Membranbau                Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)  
 ETFE-Folie                  Pneus  
 Feldgröße  
 Gesamtfläche                ca. 745 m<sup>2</sup>  
 Anwendung                 Fassade, Bildungseinrichtung

**2005 – 20      Festo ”Brennstoffzelle“**

Standort                      Rohrbach (D)  
 Fertigstellung            **2005**  
 Bauherr                        Festo KG, Esslingen (D)  
 Architekt                    Architekturbüro Jaschek, Stuttgart (D)  
 TWPL  
 Membranstatik  
 Membranbau                Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)  
 ETFE-Folie                  Pneus  
 Feldgröße  
 Gesamtfläche                ca. 255 m<sup>2</sup>  
 Anwendung                 Hallendach, Ausstellung

**2005 – 21      Hauptschule Xanten**

Standort	Xanten (D)
Fertigstellung	<b>2005</b>
Bauherr	Stadt Xanten (D)
Architekt	Stadt Xanten (D)
TWPL	
Membranstatik	
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig
Feldgröße	
Gesamtfläche	ca. 540 m <sup>2</sup>
Anwendung	Atriumdach, Bildungseinrichtung

**2005 – 22      Allwetterbad Lintorf**

Standort	Lintorf, Ratingen (D)
Fertigstellung	<b>2005</b>
Bauherr	Stadtwerke Ratingen (D)
Architekt	B+S Architekten, Hamburg (D)
TWPL	Töpfer und Richter, Kaltenkirchen (D)
Membranstatik	Covertex GmbH, Obing (D)
Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig (200/100/200 µm)
Feldgröße	3,38 m x 20 m = ca. 70 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	14 Felder á ca. 70 m <sup>2</sup> = ca. 980 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hallendach, Schwimmbad

**2005 – 23      Learning Centre Southampton**

Standort	Southampton (GB)
Fertigstellung	<b>2005</b>
Bauherr	University of Southampton (GB)
Architekt	
TWPL	
Membranstatik	Tentech, Utrecht (NL)
Membranbau	
ETFE-Folie	Pneus
Feldgröße	ca. 6,0 m x 4,0 m = ca. 24,0 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	ca. 96 m <sup>2</sup>
Anwendung	Atriumdach, Bildungseinrichtung

**2005 – 24      Duxford Airspace Museum**

Standort	Cambridge (GB)
Fertigstellung	<b>2005</b>
Bauherr	Duxford Airspace Museum, Cambridge (GB)
Architekt	HOK International, London (GB)
TWPL	
Membranstatik	Covertex GmbH, Obing (D)
Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig, 200/100/200 µm
Feldgröße	ca. 2,62m x 17,4 m = ca. 45 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	32 Felder á ca. 45,1 m <sup>2</sup> = ca. 1.440 m <sup>2</sup>
Anwendung	Atriumdach, Ausstellung

**2005 – 25 Straßenmeisterei Ansfelden**

Standort	Ansfelden (A)
Fertigstellung	<b>2005</b>
Bauherr	Straßenmeisterei Ansfelden
Architekt	Caramel Architektur, Wien (A)
TWPL	
Membranstatik	Covertex GmbH, Obing (D)
Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
ETFE-Folie	Pneus
Feldgröße	
Gesamtfläche	ca. 504 m <sup>2</sup>
Anwendung	Atriumdach, Bürogebäude

**2005 – 26 “Vitamar“ Kleinostheim**

Standort	Kleinostheim (D)
Fertigstellung	<b>2005</b> (Neubau)
Bauherr	
Architekt	PGH Planungsgruppe Hildesheim (D)
TWPL	
Membranstatik	Covertex GmbH, Obing (D)
Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
ETFE-Folie	
Feldgröße	
Gesamtfläche	ca. 240 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hallendach, Schwimmbad

**2005 – 27 Alnwick Garden - Pavilion and Visitor Centre**

Standort	Alnwick Garden (GB)
Fertigstellung	<b>2005</b>
Bauherr	The Alnwick Garden Thrust Ltd. (GB)
Architekt	Hopkins Architects, London (GB)
TWPL	Buro Happold, Bath (GB)
Membranstatik	Tensys Ltd., Bath (GB)
Membranbau	Hightex Ltd., Hampshire (GB)
ETFE-Folie	Pneus, mehrlagig
Feldgröße	Kantenlänge ca. 2,8 m x 2,8 m
Gesamtfläche	344 Felder, ca. 2.700 m <sup>2</sup>
Anwendung	Atriumdach, Ausstellung (Pavillon)

**2005 – 28 Regionalbad Rheinwelle Bingen**

Standort	Bingen (D)
Fertigstellung	<b>2005</b>
Bauherr	Zweckverb. Regionalbad Bingen-Ingelheim (D)
Architekt	Dr. Krieger Architekten + Ing., Velbert (D)
TWPL	Form TL, Radolfzell (D)
Membranstatik	Form TL, Radolfzell (D)
Membranbau	Cenotec GmbH, Greven (D)
ETFE-Folie	Pneus, mehrlagig
Feldgröße	5 Felder á ca. 356 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	überdachte Grundfläche ca. 1.728 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hallendach, Schwimmbad

<b>2005 – 29</b>	<b>Presse-Pavillon Berlin</b>	Standort	Berlin (D)
		Fertigstellung	<b>2005</b>
		Bauherr	
		Architekt	
		TWPL	
		Membranstatik	
		Membranbau	
		ETFE-Folie	Pneus u. einlag. Membran, mech. vorgespannt
		Feldgröße	
		Gesamtfläche	
		Anwendung	Atriumdach, Ausstellung (Pavillon)
<b>2005 – 30</b>	<b>Mauerseglerbauten</b>	Standort	Adliswil (CH)
		Fertigstellung	<b>2005</b>
		Bauherr	Mauersegler AG, Adliswil (CH)
		Architekt	Peter Thomann, Adliswil (CH)
		TWPL	Ing.-Büro Peter Osterwalder, Adliswil (CH)
		Membranstatik	Covertex GmbH, Obing (D)
		Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
		ETFE-Folie	Pneus, 3-lagig (o/m/u: 250/200/250 µm)
		Feldgröße	Achsabstände Primärtragw.: 3,0; 5,0 u. 7,14 m
		Gesamtfläche	ca. 430 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Atriumdach u. Fassade, Altenpflegeheim
<b>2005 – 31</b>	<b>Euroborg-Stadion Groningen</b>	Standort	Europark, Groningen (NL)
		Fertigstellung	<b>2005</b>
		Bauherr	Euroborg Stadion Groningen
		Architekt	Wiel Arets (NL)
		TWPL	
		Membranstatik	Tentech, Utrecht (NL)
		Membranbau	Tentech, Utrecht (NL)
		ETFE-Folie	ETFE-Folie, einlagig, mech. vorgespannt
		Feldgröße	
		Gesamtfläche	
		Anwendung	Vordach (Schutzdach), Stadion
<b>2005 – 32</b>	<b>Kristalltherme Ludwigsfelde</b>	Standort	Ludwigsfelde
		Fertigstellung	<b>2005</b>
		Bauherr	Stadt Ludwigsfelde
		Architekt	Goetz + Neun, Nürnberg (D)
		TWPL	Udo Goetz, Nürnberg (D), Wiehag, Altheim (A)
		Membranstatik	Covertex GmbH, Obing (D)
		Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
		ETFE-Folie	Pneus, dreilagig
		Feldgröße	max. 3,42 m x 17,44 m = ca. 60 m <sup>2</sup>
		Gesamtfläche	ca. 1.830 m <sup>2</sup>
		Anwendung	Hallendach, Schwimmbad

**2005 – 33     Dolphin Centre Romford**

Standort	Romford, Essex (GB)
Fertigstellung	<b>2005</b>
Bauherr	Mowlem (GB)
Architekt	Jasan, Coughlin, Walsh (GB)
TWPL	
Membranstatik	Covertex GmbH, Obing (D)
Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
ETFE-Folie	Pneus, dreilagig (o/m/u: 250/200/200 µm)
Feldgröße	ca. 3,10 m x 5,52 m = ca. 17,11 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	ca. 360 m <sup>2</sup>
Anwendung	Oberlichte Walkway, Tiergehege (Delphinar.)

**2006 – 01     Clarke Quay Canopies**

Standort	Clarke Quay (Singapore)
Fertigstellung	<b>2006</b>
Bauherr	Clarke Quay Pte. Ltd. (Singapore)
Architekt	Alsop Architects (GB)
TWPL	RSP Architects & Engineers PTE Ltd., Australia
Membranstatik	RSP Architects & Engineers PTE Ltd., Australia
Membranbau	Hightex GmbH, Rimsting (D)
ETFE-Folie	Pneus und ETFE-Folien einlagig
Feldgröße	13 Pneus und 12 einlagige Folien pro Schirm
Gesamtfläche	18 Schirme mit gesamt ca. 9.600 m <sup>2</sup>
Anwendung	Dach und Vordach, Pavillon, Shopping Mall

**2006 – 02     Southern Cross Station Melbourne**

Standort	Melbourne (AUS)
Fertigstellung	<b>2006</b>
Bauherr	Leighton Contractors Pty., Melbourne (AUS)
Architekt	Grimshaw Jackson, Melbourne (AUS)
TWPL	
Membranstatik	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	Pneus, zweilagig
Feldgröße	ETFE-Lichtbänder
Gesamtfläche	ca. 6.500 m <sup>2</sup>
Anwendung	Dach, Bahnhof

**2006 – 03     Olympia-Schwimmstadion München**

Standort	Olympiapark München (D)
Fertigstellung	<b>2006</b>
Bauherr	Olympiapark GmbH, München (D)
Architekt	Auer + Weber + Architekten, München (D)
TWPL	Schlaich, Bergermann u. Partner, Stuttgart (D)
Membranstatik	Tensys Ltd., Bath (GB)
Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
ETFE-Folie	ETFE (Oberlage, schlaff), PVC/PES (Unterlage)
Feldgröße	ca. 50 m x 2,3 m = ca. 115 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	ca. 8.000 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hallendach (Innenmembran), Schwimmbad



**2006 – 04 Bundestagsarena**

Standort	Berlin (D)
Fertigstellung	<b>2006</b>
Bauherr	Deutscher Bundestag, Berlin (D)
Architekt	Nüssli GmbH (GU) (D)
TWPL	Stahlbau: Form TL, Radolfzell (D)
Membranstatik	Form TL, Radolfzell (D)
Membranbau	Cenotec GmbH, Greven (D)
ETFE-Folie	200 µm, einlagig, mech. vorgespannt
Feldgröße	21 Felder á ca. 69 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	ca. 1.500 m <sup>2</sup> (Kuppel: d = 30 m, h = 22 m)
Anwendung	Kuppeldach, Pavillon (temporär)

**2006 – 05 Membrankissenversuchsstand IBP**

Standort	Valey bei Holzkirchen, Bayern (D)
Fertigstellung	<b>2006</b>
Bauherr	Fraunhofer IBP, Holzkirchen (D)
Architekt	
TWPL	Pneu: Covertex GmbH, Obing (D)
Membranstatik	Covertex GmbH, Obing (D)
Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
ETFE-Folie	ETFE-Pneu
Feldgröße	Pentagon, Kantenlänge ca. 3 m
Gesamtfläche	ca. 15 m <sup>2</sup>
Anwendung	bauphysikal. Membrankissenversuchsstand

**2006 – 06 Gasstation Linde AG**

Standort	Höllriegelskreuth (D)
Fertigstellung	<b>2006</b>
Bauherr	Linde AG, Höllriegelskreuth (D)
Architekt	Frank & Probst Architekten (FPA), München (D)
TWPL	Mayer-Vorfelder & Dinkelacker, Sindelfingen(D)
Membranstatik	Tritthardt Ingenieure, Radolfzell (D)
Membranbau	Hightex GmbH, Rimsting (D)
ETFE-Folie	zweilagige Pneus, seilnetzgestützt
Feldgröße	3 Felder je durchschnittlich ca. 200 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	ca. 600 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hofüberdachung Tankstelle

**2006 – 07 Meilenwerk Düsseldorf**

Standort	Düsseldorf (D)
Fertigstellung	<b>2006</b>
Bauherr	Insignium gebaute Marken GmbH, Berlin (D)
Architekt	Rhode Kellermann Wawrowsky, Düsseldorf (D)
TWPL	Dachtragwerk: Form TL, Radolfzell (D)
Membranstatik	Form TL, Radolfzell (D)
Membranbau	Cenotec GmbH, Greven (D)
ETFE-Folie	4-lagige Pneus
Feldgröße	Spannweite ca. 4 m
Gesamtfläche	ca. 2.500 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hallendach, Ausstellung

**2006 - 08 Islazul Centro Commercial**

Standort	Carabanchel, Madrid (E)
Fertigstellung	<b>2006</b>
Bauherr	Ivanhoe Cambridge (CAN), Lar Grosvenor (E)
Architekt	BDP und L35
TWPL	
Membranstatik	Tentech, Delft (NL)
Membranbau	Tentech, Delft (NL)
ETFE-Folie	Pneus
Feldgröße	
Gesamtfläche	
Anwendung	Atriumdach, Geschäftsgebäude (Shop. Mall)

**2006 - 09 National Olympic Stadium "Birdnest" Beijing**

Standort	Beijing (China)
Fertigstellung	<b>2006 im Bau (geplante Fertigstellung 2008)</b>
Bauherr	Beijing State-Owned Assets Man. Co. (CN)
Architekt	Herzog & De Meuron, Basel (CH)
TWPL	Arup (GB) u.a.
Membranstatik	Covertex GmbH, Obing (D)
Membranbau	Covertex GmbH, Obing (D)
ETFE-Folie	einlagig, mech. vorgespannt, 180 - 250 µm
Feldgröße	unterschiedlich, max. ca. 300 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	ca. 46.000 m <sup>2</sup>
Anwendung	Tribünendach (Hülle), Stadion

**2006 - 10 National Olympic Swimming Centre Beijing**

Standort	Beijing (China)
Fertigstellung	<b>2006 im Bau (geplante Fertigstellung 2008)</b>
Bauherr	Beijing State-Owned Assets Management (CN)
Architekt	Peddle, Thorpe & Walker (PTW) (AUS), CSCEC + Design (CN)
TWPL	Arup (GB), CSCEC + Design, (CN)
Membranstatik	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
Membranbau	Vector Foiltec Group, London / Bremen (GB/D)
ETFE-Folie	2 Ebenen mit zweilagigen Pneus
Feldgröße	unterschiedlich
Gesamtfläche	ca. 100.000 m <sup>2</sup>
Anwendung	Hallendach u. Fassade, Schwimmstadion

Tab. A 3 Projektdokumentation von ETFE-Folienkonstruktionen 1980 bis 2006 (chronologisch, nach Jahrgängen geordnet) mit Angaben (soweit bekannt) bzgl. Standort, Jahr der Fertigstellung, Bauherr, Architekt, TWPL (Tragwerksplaner Primärtragwerk), Membranstatik (Tragwerksplaner Membran), Membranbau (ausführendes Unternehmen), ETFE-Folie (Anzahl der Lagen, Foliendicken etc.), max. Feldgröße, Gesamtfläche (i.d.R. Projektion auf die Grundfläche), Anwendung (Bauteilanzwendung und Nutzung);

Anm.: Die Tabellen in Anhang A erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit oder auf korrekte Wiedergabe sämtlicher aufgeführter Daten. Zahlenangaben basieren z.T. auf abgeschätzten Näherungswerten. Die Tabellen dienen der Abschätzung des Standes der Entwicklung vom Beginn der Bauweisen mit ETFE-Folien bis zum Jahr 2006 (s. Kap. 1).

## Anhang B – Diagramme

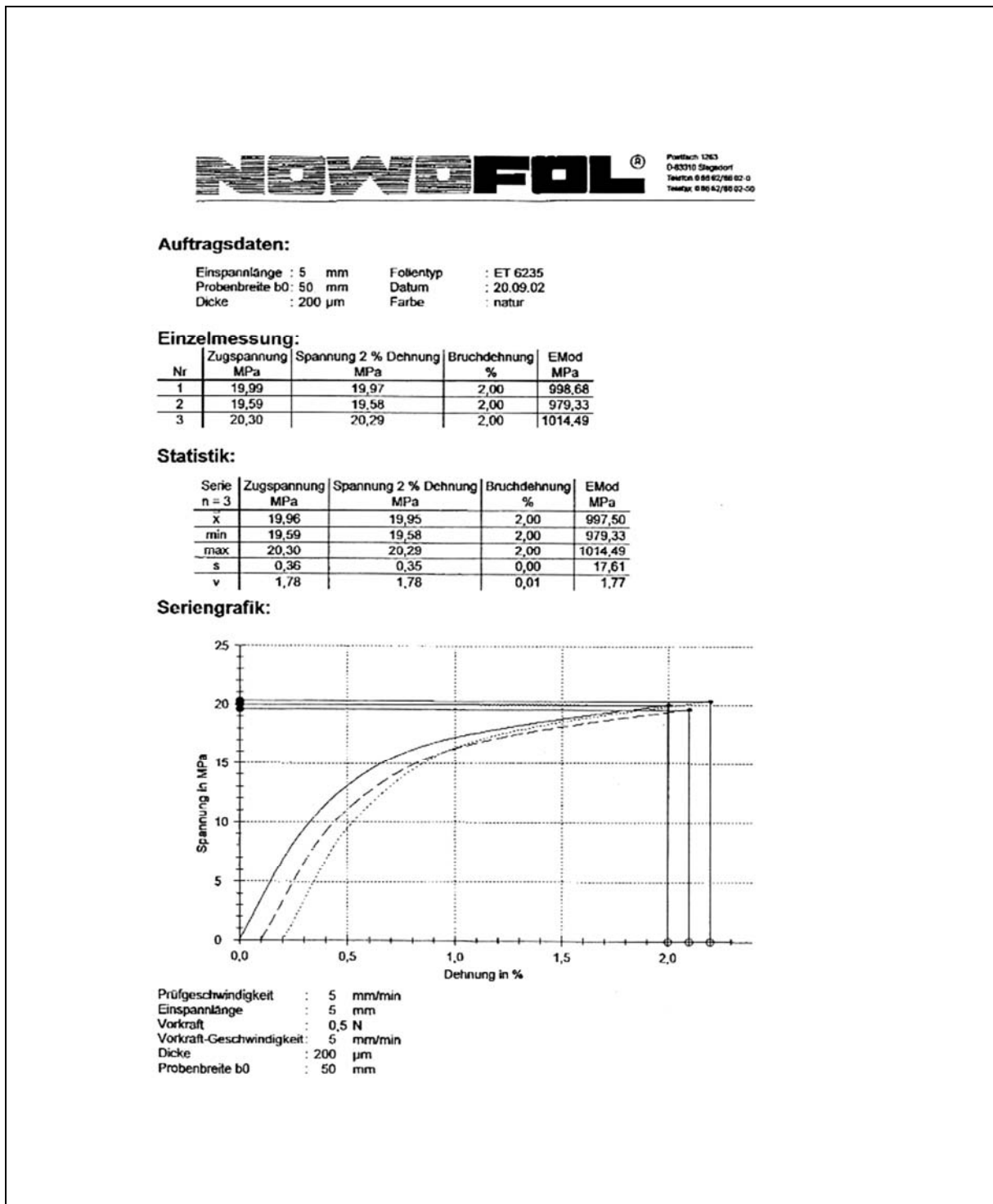


Abb. B 1 Monoaxialversuch NOWOFOL<sup>®</sup> ET 6235 –transparent (natur), Prüfparameter:  $b_0 / l_0 = 10$ ,  $\dot{\epsilon} = 100 \% / \text{min}$ , NOWOFOL<sup>®</sup>, 2002

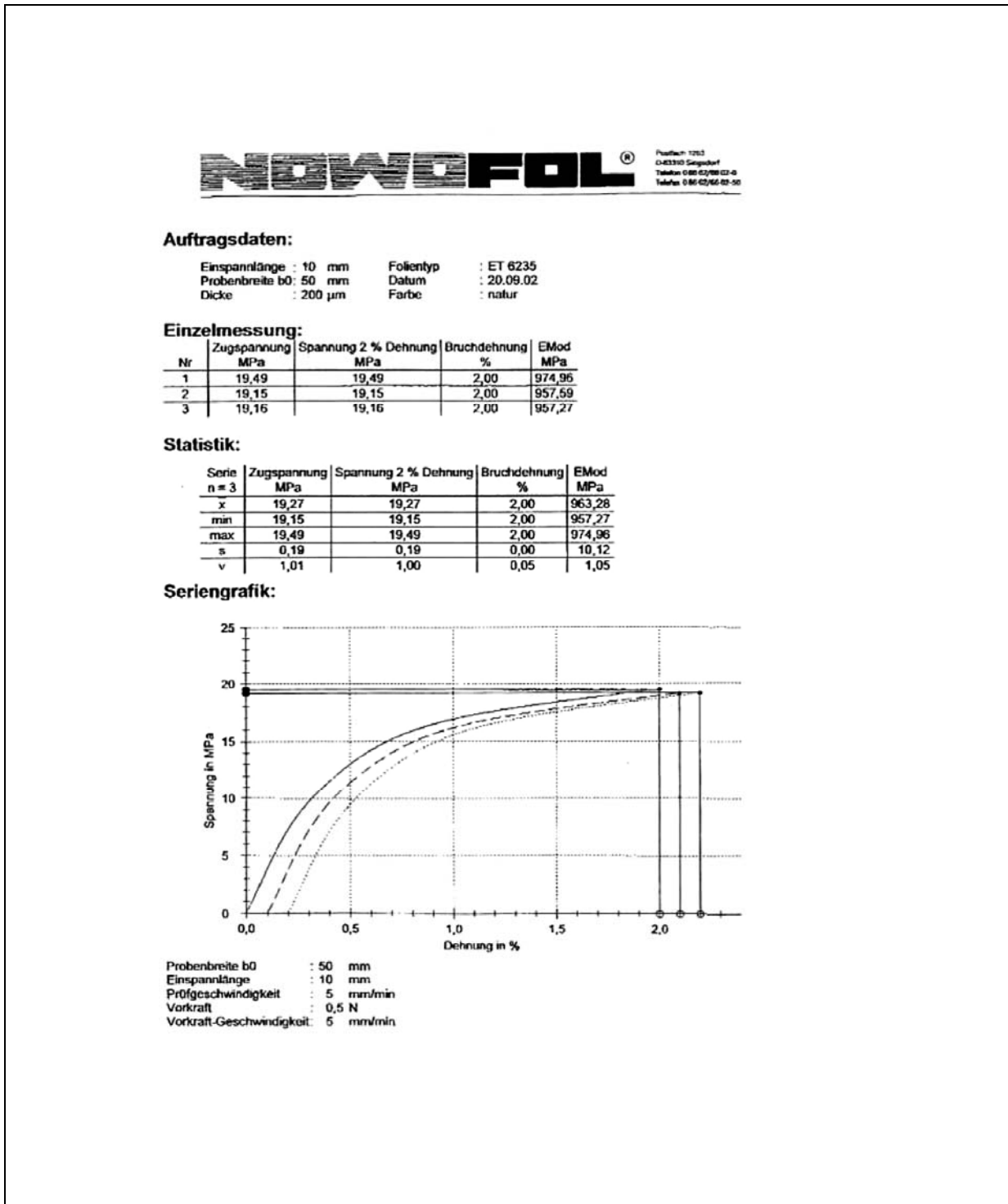


Abb. B 2 Monoaxialversuch NOWOFOL<sup>®</sup> ET 6235 –transparent (natur), Prüfparameter:  $b_0 / l_0 = 5$ ,  $\dot{\epsilon} = 50 \text{ \% / min}$ , NOWOFOL<sup>®</sup>, 2002

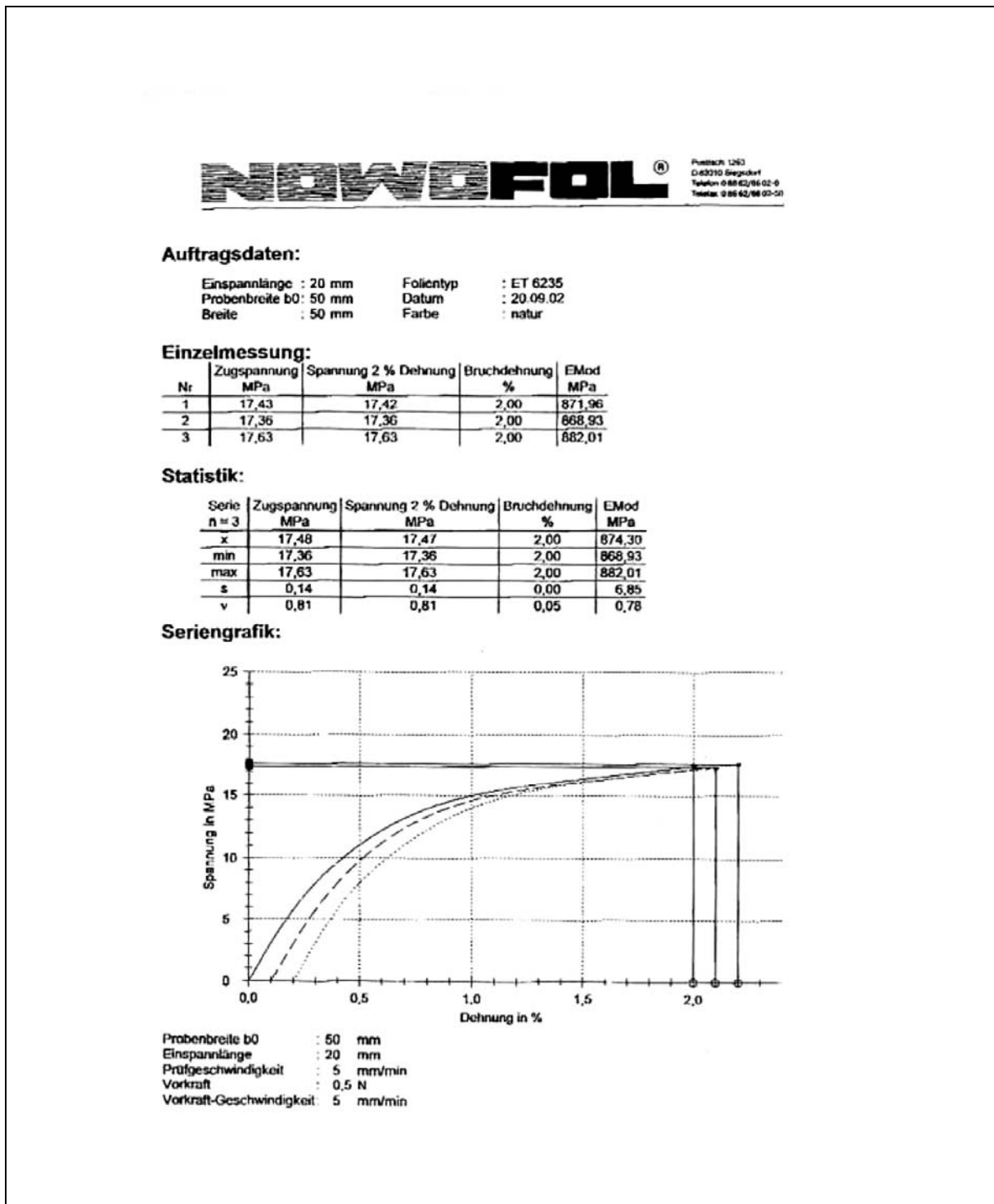


Abb. B 3 Monoaxialversuch NOWOFLO<sup>®</sup> ET 6235 –transparent (natur), Prüfparameter:  $b_0 / l_0 = 2,5$ ,  $\dot{\epsilon} = 25 \text{ \% / min}$ , NOWOFOL<sup>®</sup>, 2002

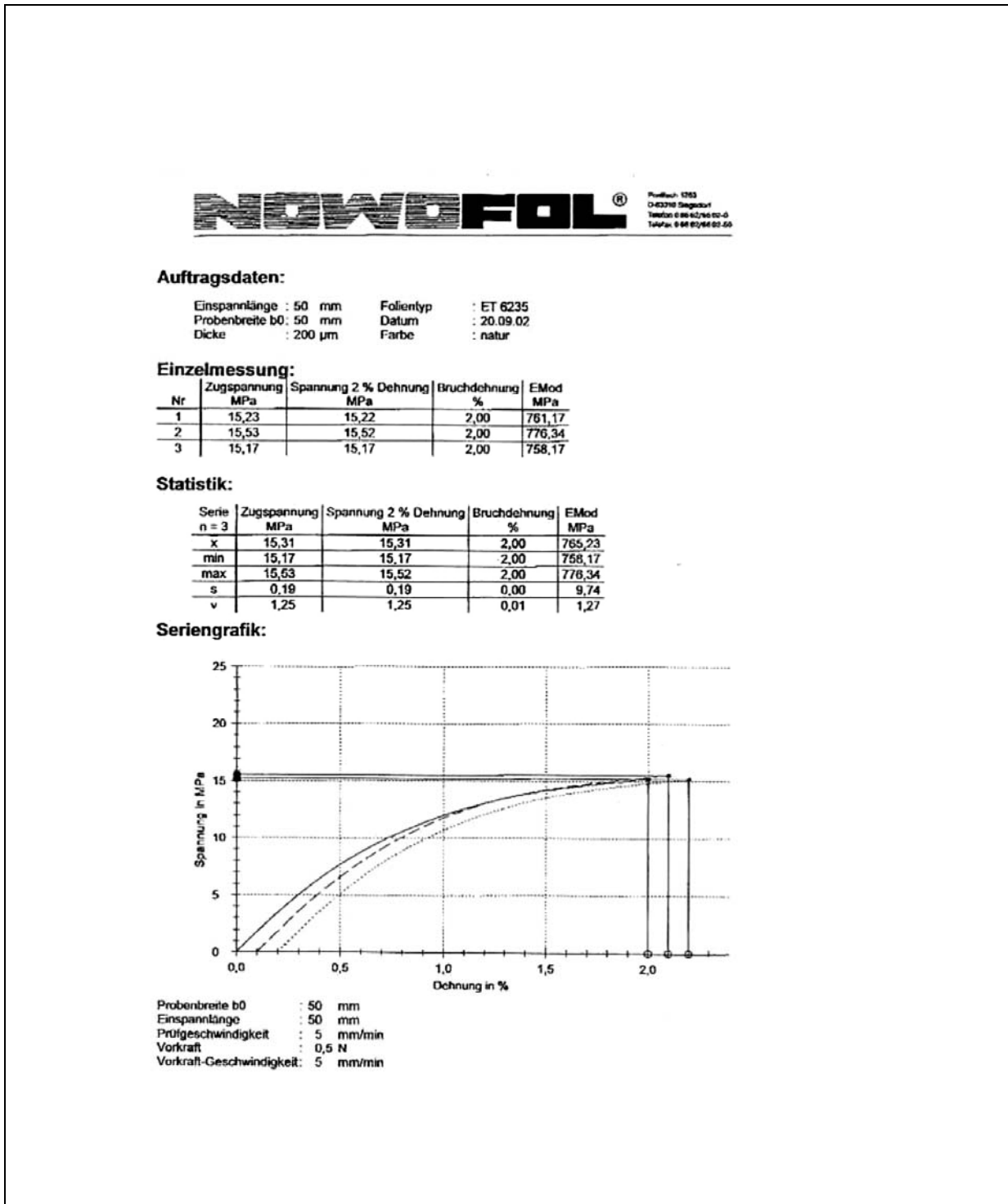


Abb. B 4 Monoaxialversuch NOWOFOL<sup>®</sup> ET 6235 –transparent (natur), Prüfparameter:  $b_0 / l_0 = 1$ ,  $\dot{\epsilon} = 10 \text{ \% / min}$ , NOWOFOL<sup>®</sup>, 2002

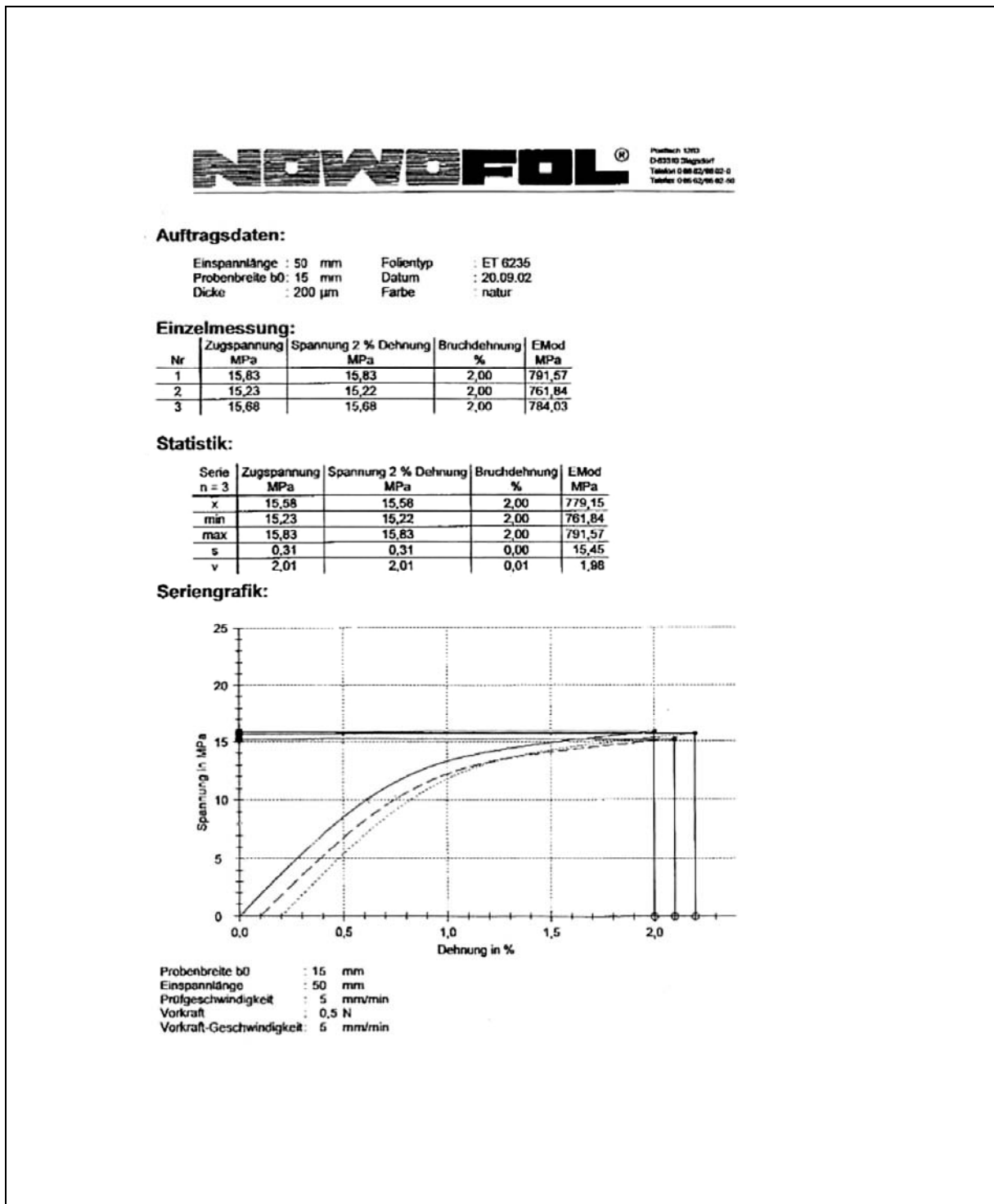


Abb. B 5 Monoaxialversuch NOWOFLO<sup>®</sup> ET 6235 –transparent (natur), Prüfparameter:  $b_0 / l_0 = 0,3$ ,  $\dot{\epsilon} = 10 \text{ \%} / \text{min}$ , NOWOFLO<sup>®</sup>, 2002





<b>C</b>	<b>Grundlagen der Statistik und Wahrscheinlichkeitstheorie</b>	
<b>C 1</b>	<b>Zufallsvariablen, Verteilung, Grundgesamtheit, Stichprobe und Aussagewahrscheinlichkeit.....</b>	<b>2</b>
<b>C 2</b>	<b>Wahrscheinlichkeitstheorie .....</b>	<b>3</b>
<b>C 3</b>	<b>Histogramm und Häufigkeitsverteilung der Stichprobe .....</b>	<b>3</b>
<b>C 4</b>	<b>Theoretisches Modell der Wahrscheinlichkeitsverteilung und der Summenverteilung .....</b>	<b>3</b>
<b>C 5</b>	<b>Diskrete Verteilungen .....</b>	<b>3</b>
<b>C 6</b>	<b>Stetige Verteilungen .....</b>	<b>4</b>
<b>C 7</b>	<b>Normalverteilung .....</b>	<b>6</b>
<b>C 8</b>	<b>Mittelwert, Median, Erwartungswert, Durchschnittswert, Schiefe, Standardabweichung, Varianz und Variationskoeffizient .....</b>	<b>7</b>
<b>C 9</b>	<b>Lognormalverteilung .....</b>	<b>8</b>
<b>C 10</b>	<b>5%-Fraktile.....</b>	<b>10</b>
<b>C 11</b>	<b>Bestimmung von Eigenschaften für den Brauchbarkeitsnachweis.....</b>	<b>12</b>

**C 1 Zufallsvariablen, Verteilung, Grundgesamtheit, Stichprobe und Aussagewahrscheinlichkeit**

Merkmale von Einwirkungen und Widerständen stellen statistisch verteilte Zufallsvariablen dar. Sie sind nicht zufällig im Sinne von beliebig, sondern im Sinne von systematisch verteilt, sie unterliegen damit einer bestimmten Verteilung. Die Gesamtheit der Werte, die sich ergeben können, nennt man Grundgesamtheit.

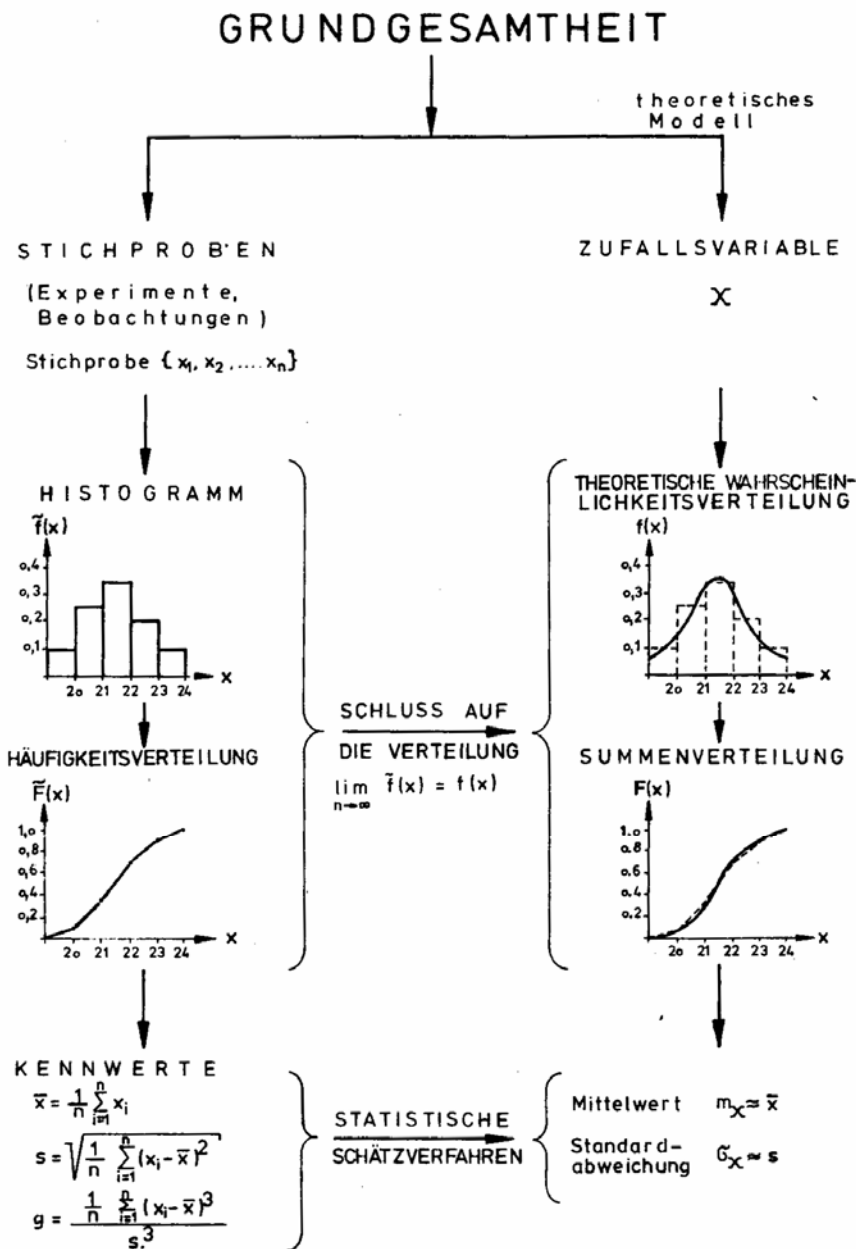


Abb. C 1 Stichprobenwerte aus Beobachtungen oder Experimenten als Teilmenge der Grundgesamtheit (links) und theoretisches Modell einer Verteilung zur Abschätzung der Parameter der Grundgesamtheit, FISCHER 2001 [55]

Man wird weder für einen bestimmten Bauteilwiderstand noch für eine Einwirkung jemals die Grundgesamtheit vollständig erfassen können, da diese aus unendlich vielen Werten besteht. Daher versucht man, von einer Stichprobe – beispielsweise einer Reihe von Messwerten der Materialfestigkeit – (als Teilmenge der Grundgesamtheit) auf die Verteilung der Grundgesamtheit zu schließen. Die Stichprobe weist hierbei aber auch eine Verteilung auf, die von der Verteilung der Grundgesamtheit abweichen kann. Es bedarf daher eines wahrscheinlichkeitstheoretischen Modells und der Anwendung von Werkzeugen der Statistik, um von der Stichprobe auf die benötigten Parameter (Mittelwert, Standardabweichung, 5%-Fraktilwert etc.) der Grundgesamtheit mit einer bestimmten Aussagewahrscheinlichkeit schließen zu können (s. Abb. C 1).

## **C 2      Wahrscheinlichkeitstheorie**

Die Wahrscheinlichkeitstheorie befasst sich mit der Tatsache, dass man für jedes Experiment nicht nur ein Ergebnis erhalten kann, und dass jedes Ergebnis eine bestimmte Auftretenswahrscheinlichkeit hat. Gemeinsam mit der mathematischen Statistik bildet sie das Feld der Stochastik, das von der Beschreibung zufälliger Ereignisse und ihrer Modellierung handelt.

## **C 3      Histogramm und Häufigkeitsverteilung der Stichprobe**

Das Histogramm  $\tilde{f}(x)$  gibt die Häufigkeit des Merkmals  $x$  aus der Stichprobe an. Bei kleinen Stichproben ist die Form des Histogramms stark abhängig von der gewählten Intervallgröße auf der Merkmalsachse ( $x$ ). Die Häufigkeitsverteilung  $\tilde{F}(x)$  ergibt sich aus der Summe der einzelnen Häufigkeiten. Die Häufigkeitsverteilung beginnt bei 0 und erreicht ihr Maximum bei 1, wenn alle Elemente der Stichprobe aufsummiert sind. Die Häufigkeitsverteilung der Stichprobe weist verschiedene, sie beschreibende Kennwerte auf (s. Abb. C3.1: Mittelwert  $\bar{x}$ , Standardabweichung  $s$  und Schiefe  $g$ )

## **C 4      Theoretisches Modell der Wahrscheinlichkeitsverteilung und der Summenverteilung**

Aus dem Ergebnis der Stichprobe lässt sich im Fall einer diskreten Verteilung auf eine Wahrscheinlichkeitsverteilung  $f(X)$  (als Maß für die Wahrscheinlichkeit, dass  $x$  eintritt) und im Fall einer stetigen Verteilung auf die Wahrscheinlichkeitsdichte  $f(X)$  (als Maß für die Wahrscheinlichkeit, dass  $X$  in das Intervall  $x + dx$  fällt), auf eine Summenverteilung (Verteilungsfunktion)  $F(X)$  und auf die Kennwerte der Zufallsvariable  $X$  in der Grundgesamtheit (s. Abb. C3.1: Mittelwert  $m_X$  und Standardabweichung  $\sigma_X$ ) schließen. Die Wahrscheinlichkeitsdichte  $f(x)$  ist definiert als Ableitung der Verteilungsfunktion  $F(x)$ .

## **C 5      Diskrete Verteilungen**

Bei diskreten Verteilungen gibt es genau unterscheidbare und zählbare Ergebnisse (mit endlich oder unendlich vielen Ereignissen), z.B. Würfelspiel. Eine diskrete Häufigkeitsverteilung lässt sich gut als Säulendiagramm darstellen. Im folgenden sind bekannte diskrete Verteilungen aufgeführt:

- Hypergeometrische Verteilung: statistische Qualitätskontrolle - Stichprobenpläne
- Binomialverteilung: Zweipunktverteilung (Bernoulli-Schema) und statistische Qualitätskontrolle
- Poissonverteilung: entspricht einer Verteilung der "seltenen Ereignisse" - Anwendung in der Zuverlässigkeitstheorie, der Bedienungstheorie und in der Elementarteilchentheorie
- Negative Binomialverteilung: im Bernoulli-Schema Verteilung der Anzahl der Misserfolge vor dem k-ten Erfolg

## C 6 Stetige Verteilungen

Bei einer stetigen Verteilung liegen die Werte einer Zufallsvariablen zwischen  $-\infty$  und  $+\infty$ . Jedes Elementarereignis (bzw. der ihm zugeordnete Wert  $x$  seiner Zufallsvariablen  $X$ ) ist möglich, aber die Wahrscheinlichkeit des einzelnen Ereignisses ist Null. Danach ergibt es keinen Sinn von einer stetigen Wahrscheinlichkeitsfunktion  $f(x)$  zu sprechen. Statt dessen macht es bei einer stetigen Zufallsvariablen nur Sinn, von einer Wahrscheinlichkeit zu sprechen, mit der bei einem Elementarereignis der Wert  $x$  der Zufallsvariablen  $X$  in ein Intervall der Größe  $\Delta x$  fällt. Deshalb spricht man bei stetigen Verteilungen nicht von einer Wahrscheinlichkeitsfunktion, sondern von der Wahrscheinlichkeitsdichte  $f(x)$ .

- Normalverteilung: wichtigste Verteilung, Anwendung in fast allen Bereichen
- Logarithmische Normalverteilung: Verteilungen für Festigkeitseigenschaften und deren Lebensdauer in der Zuverlässigkeitstheorie
- Reduzierte oder standardisierte Beta-Verteilung: Verteilung von Ranggrößen, Anwendung in Korrelationsanalysen
- F-Verteilung: Testtheorie - Vergleich von Streuungen, Anwendung in Varianz- und Kovarianzanalysen
- t-Verteilung: Testtheorie - Prüfen von Erwartungswerten, Anwendung in Regressions- und Korrelationsanalysen
- $\chi^2$ -Verteilung: Testtheorie - Prüfen von Streuungen, Anwendung bei Anpassungstests, Homogenisierungstests und Unabhängigkeitstests, Anwendung bei Punktschätzungen
- Gamma-Verteilung: Lebensdauerverteilung in der Zuverlässigkeitstheorie
- Erlang-Verteilung: Bedienungstheorie – als Verteilung der zufälligen Pausenlänge zwischen dem Eintreffen zweier Kunden
- Exponentialverteilung: Lebensdauerverteilung in der Zuverlässigkeitstheorie (konstante Ausfallrate), Bedienungstheorie
- Rayleigh-Verteilung: Lebensdauerverteilung in der Zuverlässigkeitstheorie (monoton steigende Ausfallrate)
- Weibull-Verteilung: entspricht Extremwertverteilung vom Typ III – Kleinstwerte
- Gumbel-Verteilung: entspricht Extremwertverteilung vom Typ I, auch als doppelte Exponentialverteilung bezeichnet

Auch bei der Aufstellung des theoretischen Modells der Zufallsgröße stellt sich die Frage nach der Art ihrer Verteilung. Abb. C 2 enthält eine Übersicht der wichtigsten diskreten und stetigen Verteilungen, die den Zusammenhang der Verteilungen untereinander veranschaulicht, ausgehend von der Normalverteilung. Die Verteilungen enthalten jeweils die Verteilungsdichte  $g = g(x)$  und ihre Parameter  $a, b, \dots$ .

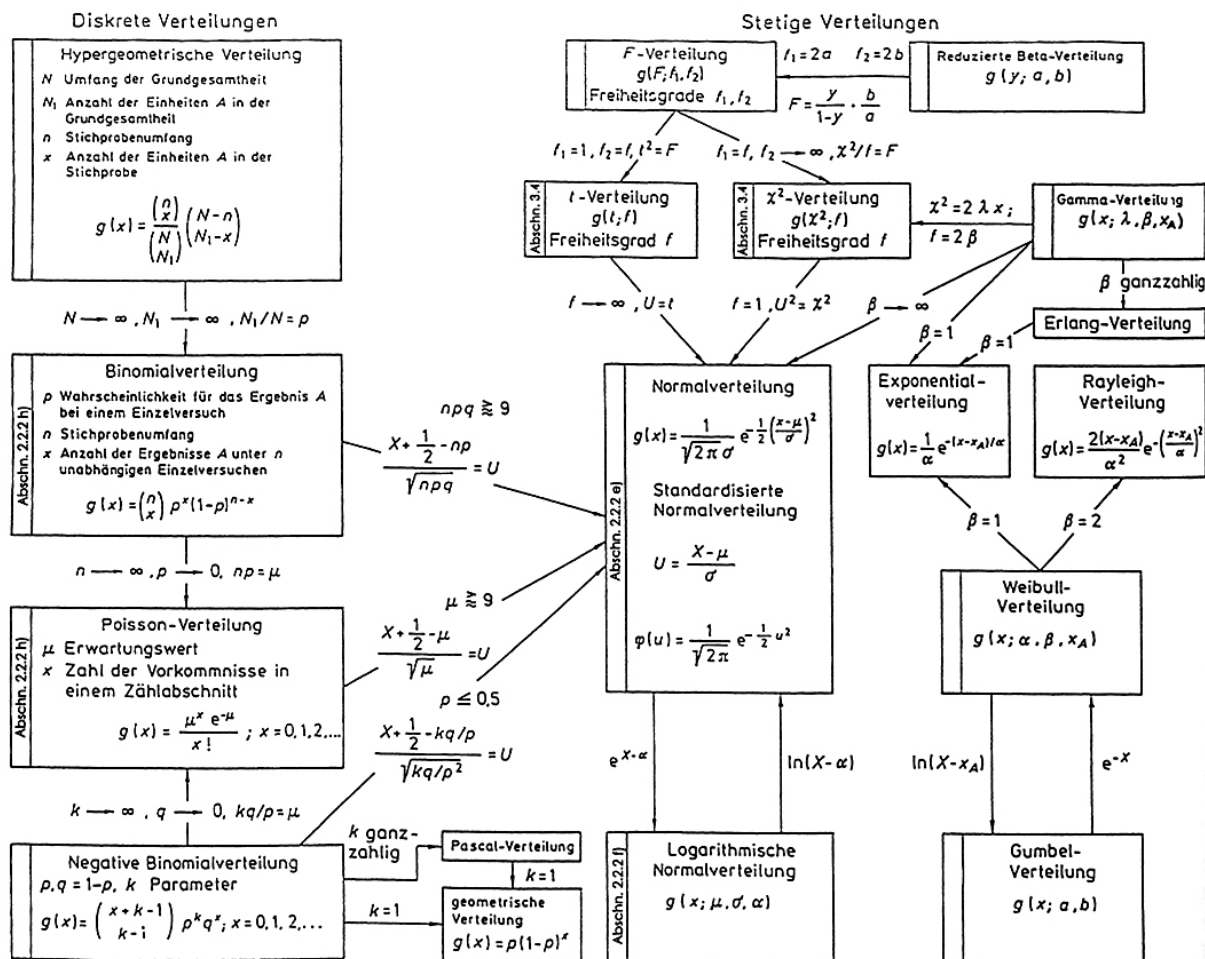


Abb. C 2 Übersicht der wichtigsten eindimensionalen Verteilungen; FISCHER 2001 [55]

Nach DIN EN 1990: 2002-10 [N26] (EUROCODE 0) ist für die Auswertung von Versuchen zur Materialfestigkeit die logarithmische Normalverteilung der Zufallsgröße anzunehmen. Die Normalverteilung und die Lognormalverteilung sowie ihre wichtigsten Merkmale (Verteilungsfunktion, Wahrscheinlichkeitsdichte, Mittelwert, Median, Standardabweichung, Varianz, Variationskoeffizient, 5%-Fraktilwert) werden im Folgenden kurz vorgestellt.

## C 7 Normalverteilung

Die Normalverteilung, auch Gauß-Verteilung (nach Carl Friedrich Gauß) genannt, ist der am häufigsten angewendete Typ kontinuierlicher Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Viele natur-, wirtschafts- und ingenieurwissenschaftliche Vorgänge lassen sich durch die Normalverteilung in guter Näherung - in manchen Fällen auch exakt - beschreiben.

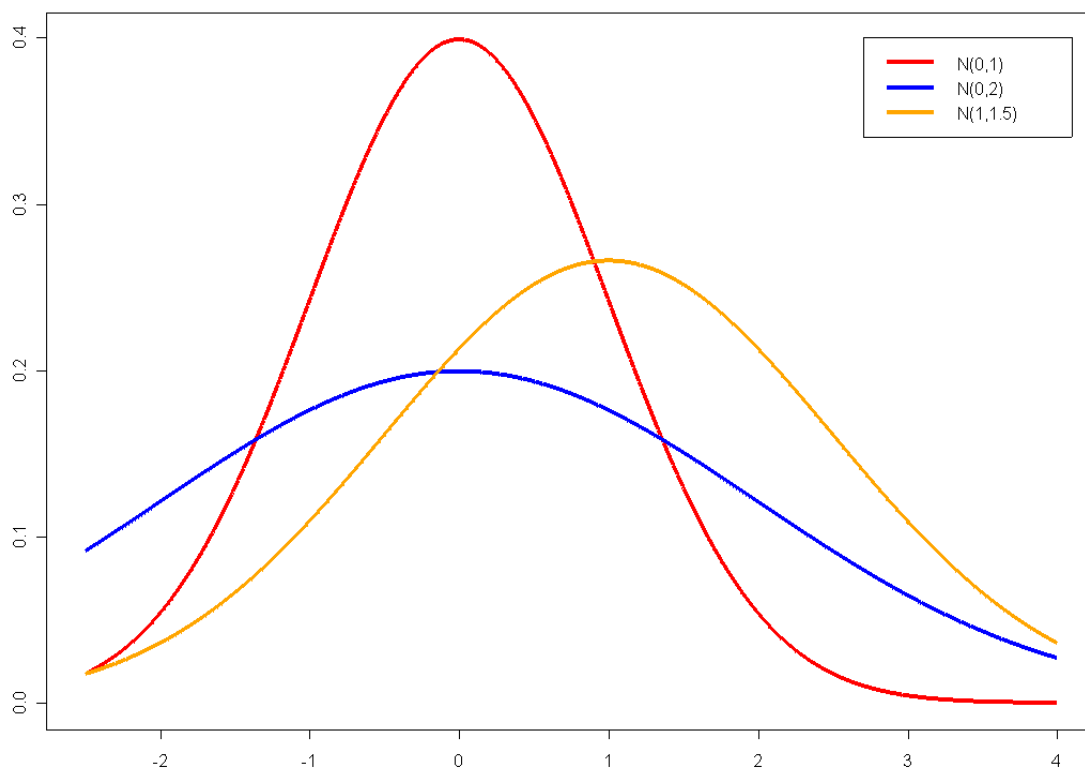


Abb. C 3 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen  $f(x)$  der Normalverteilung mit verschiedenen Parametern (Mittelwert, Standardabweichung)

Die besondere Bedeutung der Normalverteilung beruht unter anderem auf dem zentralen Grenzwertsatz, der besagt, dass eine Summe von  $n$  unabhängigen, identisch verteilten Zufallsvariablen in den Grenzen  $n \rightarrow -\infty / +\infty$  normalverteilt ist. Aus einer normalverteilten Stichprobe ergeben sich folgende Funktionen:

Wahrscheinlichkeitsdichte der Normalverteilung:

$$f(x) = \frac{1}{s_x \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x - m_x}{s_x} \right)^2} \quad (\text{C } 1)$$

Verteilungsfunktion  $F(x)$  der Normalverteilung:

$$F(x) = \frac{1}{s_x \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x - m_x}{s_x} \right)^2} dt \quad (\text{C } 2)$$

Mit den beiden aus der Stichprobe geschätzten Parametern Mittelwert und Standardabweichung:

Mittelwert (erstes Moment der Verteilung)  $m_x = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i$  (C 3)

Standardabweichung  $s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2}$  (C 4)

Die Anzahl der Werte  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  der Stichprobe ist n. (C 5)

Varianz(zweites Moment der Verteilung)  $Var_x = s_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2}{n-1}$  (C 6)

und der Variationskoeffizient  $v_x = \frac{s_x}{m_x}$  (C 7)

Die Wahrscheinlichkeitsdichte der Normalverteilung wird auch Gauß-Funktion, Gauß-Kurve, Gauß-Glocke oder Glockenkurve genannt (s. Abb. C 3).

**C 8 Mittelwert, Median, Erwartungswert, Durchschnittswert, Schiefe, Standardabweichung, Varianz und Variationskoeffizient**

Es gibt zwei Bedeutungen des Wortes "Mittelwert", den des Erwartungswertes und den des Durchschnittswertes (auch Zentralwert oder Median genannt). Die Anwendung ist in der Literatur nicht immer eindeutig, deswegen hier eine kurze Erläuterung:

Der Erwartungswert  $E(X)$  ist eine Größe der Wahrscheinlichkeitstheorie. Er beschreibt jenen Wert, der sich bei Wiederholung des zugrunde liegenden Experiments als "Mittelwert" der tatsächlichen Ergebnisse ergibt. Er errechnet sich im diskreten Fall als die Summe der Wahrscheinlichkeiten jedes möglichen Ergebnisses des Experiments multipliziert mit dem "Wert" dieses Ergebnisses. Erwartungswerte müssen weder endlich noch mögliche Ergebnisse des Zufallsexperiments sein.

Der Durchschnittswert  $\bar{X}$  ist u.a. eine Größe der Statistik. Hier gibt er die "Mitte" (arithmetisches Mittel) von verschiedenen Zahlenwerten einer Stichprobe an (z.B. Messwerte oder Beobachtungswerte).

Im Fall der Gaußverteilung sind Erwartungswert  $E(X)$  und Durchschnittswert  $\bar{X}$  identisch. Im Fall der (asymmetrischen) Lognormalverteilung jedoch nicht. Um Missverständnisse zu vermeiden, werden hier die häufig verwendeten Begriffe Mittelwert  $\mu_x$  für den Erwartungswert und Median  $\tilde{\mu}_x$  für den Zentralwert der Grundgesamtheit, und  $m_x$  für den Erwartungswert und Median  $\tilde{m}_x$  für den Zentralwert der Stichprobe benutzt.

Je größer die Differenz zwischen dem Mittelwert und dem Median, desto ausgeprägter ist die Schiefe  $V$  der Verteilung (engl.: Skew, bzw. Skewness). Ist die Schiefe  $V > 0$ , so ist die Verteilung rechtsschief ( $m_x < \tilde{m}_x$ ). Ist  $V < 0$ , ist die Verteilung linksschief ( $m_x > \tilde{m}_x$ ). Die

Schiefe ist somit ein Maß für die Symmetrie der Wahrscheinlichkeitsverteilung zum Mittelwert. Da die Gaußsche Normalverteilung die Schiefe Null hat (sie ist immer symmetrisch zum Mittelwert), ist die Schiefe ein geeignetes Maß, um eine beliebige Verteilung mit der Normalverteilung zu vergleichen.

Die Standardabweichung  $\sigma_x$  ist ein Maß für die Streuung der Werte der Zufallsgröße um den Mittelwert in der Grundgesamtheit und  $s_x$  in der Stichprobe. Die Standardabweichung heißt auch mittlerer Fehler (m. F.) oder r. m. s. error (root mean square error).

Das Quadrat der Standardabweichung  $\sigma_x^2$  bzw.  $s_x^2$  ergibt die Varianz  $Var_x$ . Sie ist ebenfalls ein Streuungsmaß, d.h. ein Maß für die Abweichung einer Zufallsvariablen X von ihrem Erwartungswert E(X). Ihr Nachteil ist, dass sie eine andere Einheit als die Zufallsgröße besitzt, weshalb üblicherweise auf die Standardabweichung als Streuungsmaß zurückgegriffen wird.

Um ein Maß für die Streuung einer Zufallsvariablen in Relation zum Mittelwert zu erhalten, benutzt man den Variationskoeffizienten  $v_x$ , der aus dem Quotienten der Standardabweichung und dem Mittelwert gebildet wird. Er wird häufig als prozentualer Wert angegeben.

Der Mittelwert wird auch als das erste zentrale Moment, die Varianz als das zweite zentrale Moment und die Schiefe als das dritte zentrale Moment einer Verteilung bezeichnet.

## C 9 Lognormalverteilung

Die (eindimensionale) logarithmische Normalverteilung (kurz Lognormalverteilung) beschreibt eine Verteilung, bei der nicht die Zufallsgröße X selbst, sondern ihr natürlicher Logarithmus  $\ln(X)$  normalverteilt ist. Dies ist bei vielen physikalischen Vorgängen der Fall. Nach [152] und [68] ist die Log-Normalverteilung beispielsweise für die statistische Beschreibung der Bruchspannung von Kunststoffen zugrunde zu legen. Die Lognormalverteilung ist eine kontinuierliche Wahrscheinlichkeitsverteilung über der Menge der positiven reellen Zahlen (s. Abb. C 4).

Wahrscheinlichkeitsdichte der Log-Normalverteilung:

$$f(x) = \frac{1}{s_{\ln x} \cdot x \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln x - m_{\ln x}}{s_{\ln x}} \right)^2} \quad \text{für } x > 0 \text{ und } f(x) = 0 \text{ für } x \leq 0 \quad (\text{C } 8)$$

Verteilungsfunktion der Log-Normalverteilung:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{s_{\ln x} \cdot x \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln x - m_{\ln x}}{s_{\ln x}} \right)^2} dt \quad (\text{C } 9)$$

Mit den beiden, aus der Stichprobe geschätzten Parametern:

Mittelwert:

$$m_{\ln x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \ln x_i \quad (\text{C } 10)$$



Standardabweichung

$$s_{\ln x} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\ln x_i - m_{\ln x})^2} \quad (\text{C } 11)$$

Die Anzahl der Werte  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  der Stichprobe ist n.

Es ergeben sich daraus die Varianz

$$\text{var}_{\ln x} = s_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\ln x_i - m_{\ln x})^2}{n-1} \quad (\text{C } 12)$$

und der Variationskoeffizient

$$v_{\ln x} = \frac{s_{\ln x}}{m_{\ln x}} \quad (\text{C } 13)$$

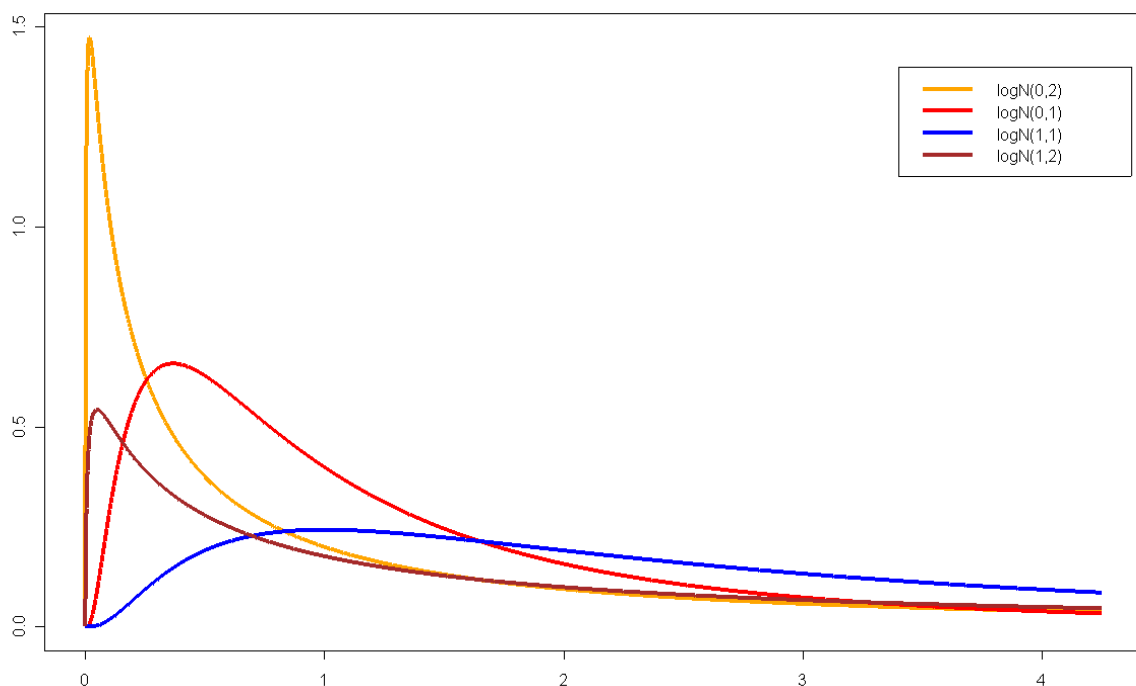


Abb. C 4 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen  $f(x)$  der Lognormalverteilung mit verschiedenen Parametern (Mittelwert, Standardabweichung)

Da weniger die Kennwerte der logarithmierten Verteilung der Zufallsvariablen  $\ln(X)$ , sondern die Kennwerte der Zufallsvariablen  $X$  selbst für deren Beschreibung erforderlich sind, müssen die o.g. Kennwerte transformiert werden. Die Transformation ergibt folgende Beziehungen:

Mittelwert (Erwartungswert)

$$m_x = e^{(m_{\ln x} + \frac{1}{2} \cdot s_{\ln x}^2)} \quad (\text{C } 14)$$

Durch die Asymmetrie der lognormalverteilten Zufallsvariable  $X$  ergibt sich eine Differenz zwischen Mittelwert (s.o.) und Median der Zufallsvariablen  $X$ .

Standardabweichung

$$s_x = \sqrt{e^{(2 \cdot m_{\ln x} + s_{\ln x}^2)} \cdot (e^{s_{\ln x}^2} - 1)} \quad (\text{C } 15)$$

---


$$\text{Varianz} \quad \text{var}_x = s_x^2 \quad (\text{C } 16)$$

$$\text{Variationskoeffizient} \quad v_x = \frac{s_x}{m_x} \quad (\text{C } 17)$$

$$\text{Median (50 \% -Fraktile } P_{0,5}) \quad p_{0,5} = e^{m_{\ln x}} \quad (\text{C } 18)$$

### C 10 5%-Fraktile

Der 5%-Fraktilewert  $P_{0,05}$  einer Zufallsvariablen (auch 5%-Fraktile; 5 %-Quantilwert oder 5%-Quantile genannt) ist ein Schätzwert dafür, dass lediglich 5 % aller Messungen, also aller möglichen Werte, den geschätzten Wert unterschreiten. Die 5%-Fraktile kann also über dem kleinsten gemessenen Wert einer Stichprobe liegen. Sie basiert auf der Normalverteilung und wird mit folgender Gleichung berechnet, wenn der Variationskoeffizient  $v$  bekannt ist:

$$\text{5\%-Fraktile:} \quad P_{0,05} = m_x - k_n \cdot s_x \quad (\text{C } 19)$$

Hierin sind  $m_x$  der Mittelwert und  $s_x$  die Standardabweichung der Stichprobe. Drei Faktoren haben einen Einfluss auf den Fraktilefaktor  $k_n$  (früher  $k_S$ -Faktor):

1. Die gewünschte Aussagewahrscheinlichkeit  $W$  (Konfidenzniveau), also das Maß für die Zuverlässigkeit der Aussage, dass der geschätzte 5%-Fraktilewert nicht kleiner ist, als der 5%-Fraktilewert der Grundgesamtheit der möglichen Messwerte. Entsprechend EN 1990 soll das Konfidenzniveau bei der Ableitung des 5%-Fraktilewertes für Bemessungsgrößen aus statistisch ausgewerteten Materialprüfungen etwa 75 % betragen (s. hierzu Anlage D.7.1 zu DIN EN 1990 [N26])
2. Mit steigender Anzahl der Werte  $n$  einer Stichprobe sinkt der  $k_n$ -Faktor, d.h. die 5 % Fraktile nähert sich dem Mittelwert.
3. Der  $k_n$ -Wert hängt maßgeblich davon ab, ob die Streuung der Zufallsvariablen (Variationskoeffizient  $v_x$  der Grundgesamtheit) bekannt ist oder nicht. Der in DIN EN 1990 angegebene Fraktilefaktor  $k_n$  beruht bei bekanntem Variationskoeffizienten (der Grundgesamtheit) auf der Normalverteilung. Bei Ansatz der Lognormalverteilung der Zufallsvariablen sind entsprechende Korrekturterme angegeben. Bei unbekanntem Variationskoeffizienten beruht der Fraktilefaktor auf der nicht zentralen t-Verteilung, auch student'sche Verteilung genannt (nach dem Pseudonym „Student“ des englischen Statistikers Gosset (1876-1937)). In [153] sind entsprechende Tabellen für den früher verwendeten  $k$  bzw.  $k_S$ -Faktor in Bezug auf die Anzahl der Freiheitsgrade der t-Verteilung  $v = n - 1$  angegeben.

Tab. C 1 und Abb. C 5 bzw. C 6 zeigen die Werte der Tabelle D.1 aus DIN EN 1990 und die hieraus abgeleiteten Diagramme der 5%-Fraktilefaktoren  $k_n$  für die beiden Fälle  $v_x$  bekannt und  $v_x$  unbekannt. Die Diagramme verdeutlichen, dass sich der  $k_n$ -Wert mit einer Vergrößerung des Stichprobenumfangs in beiden Fällen dem Endwert  $k_{0,05} = 1,645$  (für  $n \rightarrow \infty$ ) nähert. Ab einem Stichprobenumfang  $n = 30$  ist die Form der t-Verteilung näherungsweise gleich der Normalverteilung (Schüeller 1981 [178]).

n	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	$\infty$
Variationskoeffizient $\nu =$ bekannt	2,31	2,01	1,89	1,83	1,80	1,77	1,74	1,72	1,68	1,67	1,645
Variationskoeffizient $\nu =$ unbekannt	-	-	3,37	2,63	2,33	2,18	2,00	1,92	1,76	1,73	1,645

Tab. C 1 Tabelle der 5%-Fraktalfaktoren  $k_n$  für  $\nu =$  bekannt / unbekannt [N26]

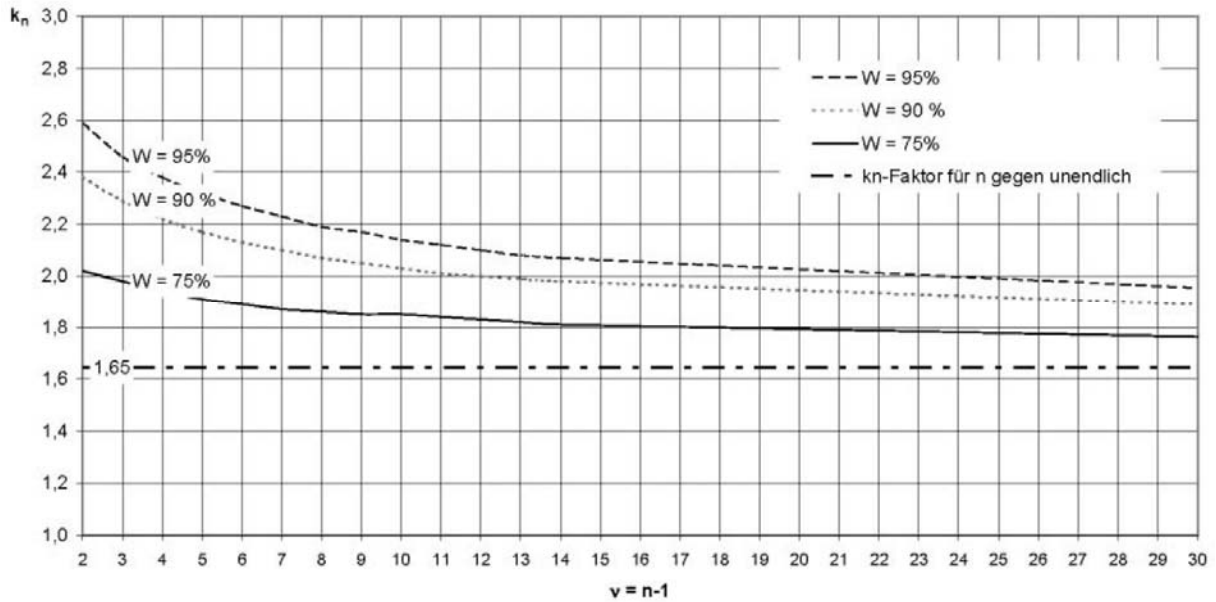


Abb. C 5 Diagramm der 5%-Fraktalfaktoren  $k_n$  für  $\nu =$  bekannt (nach Tab. C 1)

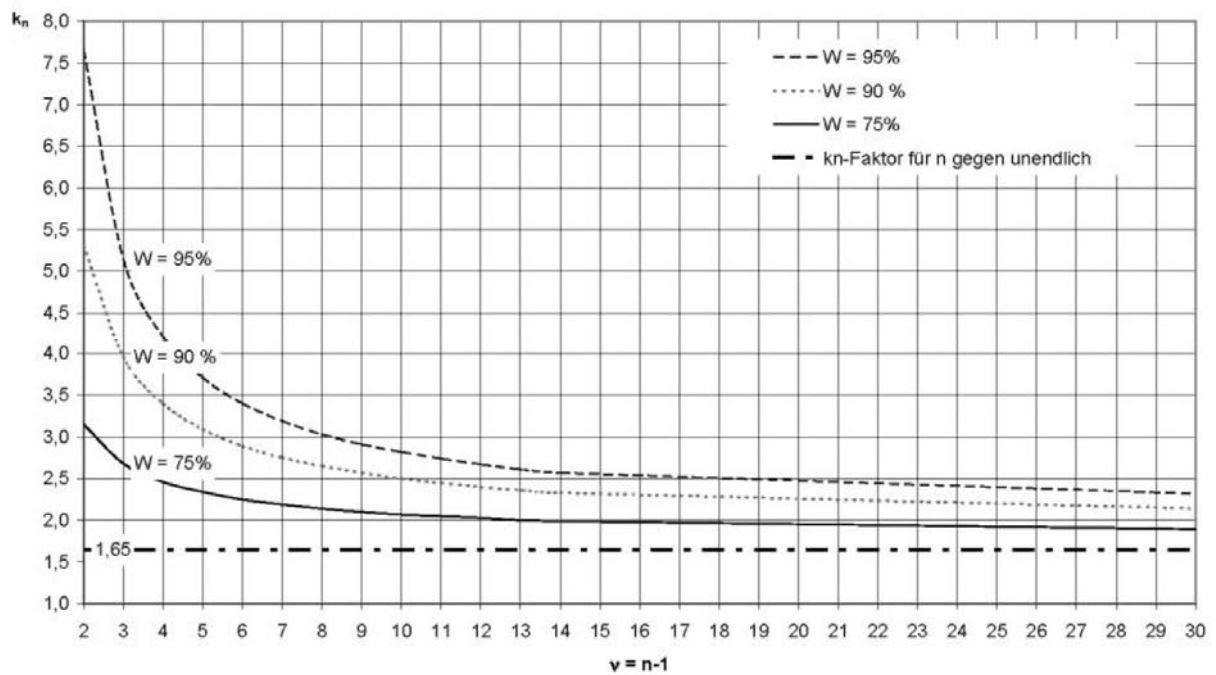


Abb. C 6 Diagramm der 5%-Fraktalfaktoren  $k_n$  für  $\nu =$  unbekannt (nach Tab. C 1)

## **C 11 Bestimmung von Eigenschaften für den Brauchbarkeitsnachweis**

Sollen die Materialprüfungen für einen Brauchbarkeitsnachweis oder für ein allgemeines Bemessungskonzept herangezogen werden, so erfolgt dies nach der Leitlinie des IfBt (heute: DIBt): "Grundlagen zur Beurteilung von Baustoffen, Bauteilen und Bauarten im Prüfzeichen- und Zulassungsverfahren", Fassung: Mai 1986 [68].

Nach Anhang A3 dieser Leitlinie sind Ergebnisse von Materialprüfungen dahingehend zu hinterfragen, welche Produkte mit einem Brauchbarkeitsnachweis eingeschlossen werden sollen. Dementsprechend sind folgende Aufgaben zu unterscheiden:

- a) Schätzung von Parametern eines Loses
- b) Schätzung von Parametern im Produktionsangebot eines Herstellers
- c) Schätzung von Parametern im Produktionsangebot aller Hersteller

Der in o.g. Leitlinie [68] verwendete Begriff "Los" kann hier mit der so genannten "Foliencharge" gleichgesetzt werden. Diese bedeutet die kontinuierliche Herstellung in einem Produktionsgang (an einem Tag, an einer Maschine, mit gleichen Produktionsparametern). Es ist nicht ungewöhnlich, dass mehrere Chargen (und auch Foliendicken), in einem "Baulos" eingebaut werden, weshalb der Begriff des Loses missverständlich sein kann.

In Bezug auf die Untersuchung von Parametern der Teilflächen- oder Randverbindungen kann nur die Produktion eines Details und an einer Foliencharge mit jeweils konstanten Produktionsparametern (Maschine, Druck, Temperatur, Vorschub, Schweißnahtgeometrie etc.) als Los bezeichnet werden.

Das Produktionsangebot eines Folienherstellers würde beispielsweise die verschiedenen Foliendicken des Materials NOWOFLON® ET 6235 des Herstellers NOWOFLON® umfassen, unabhängig davon, wann und auf welcher Maschine und an welchem Ort die einzelnen Chargen hergestellt wurden.

Das Produktionsangebot aller Hersteller würde alle auf dem Markt erhältlichen ETFE-Folien-Fabrikate umfassen.

---

<b>D</b>	<b>Grundlagen der Werkstoffmechanik</b>	
<b>D 1</b>	<b>Einführung</b> .....	<b>3</b>
<b>D 2</b>	<b>Spannungen und Deformationen</b> .....	<b>3</b>
D 2.1	Spannungen .....	3
D 2.1.1	Spannungsvektor und Spannungstensor.....	3
D 2.1.2	Ebener Spannungszustand .....	4
D 2.1.3	Einachsiger Spannungszustand .....	5
D 2.1.4	Hauptspannungen .....	5
D 2.1.5	Hauptschubspannungen.....	6
D 2.1.6	MOHR'scher Spannungskreis .....	6
D 2.1.7	Oktaederspannungen (mittlere Normalspannung).....	7
D 2.1.8	Hydrostatischer und deviatorischer Anteil des Spannungstensors.....	7
D 2.2	Deformationen .....	8
D 2.2.1	Verschiebungen und Verzerrungen .....	8
D 2.2.2	Ebener Verzerrungszustand .....	9
D 2.2.3	Einachsiger Verzerrungszustand .....	10
D 2.2.4	Hauptdehnungen .....	10
D 2.2.5	Hydrostatischer und deviatorischer Anteil des Dehnungstensors .....	10
D 2.2.6	Verzerrungsgeschwindigkeitstensor .....	10
<b>D 3</b>	<b>Klassifizierung des Werkstoffverhaltens</b> .....	<b>11</b>
D 3.1	Homogenität und Isotropie.....	11
D 3.2	Elastisches, plastisches, viskoelastisches und viskoses Verhalten.....	11
D 3.3	Zeitunabhängiges Verhalten (Elastizität, Plastizität).....	12
D 3.3.1	Linear-elastisches Verhalten - HOOKE'sches Gesetz.....	12
D 3.3.2	Nichtlinear-elastisches Verhalten .....	16
D 3.3.3	Plastisches Verhalten .....	16
D 3.3.4	Elastisch-plastisches Verhalten .....	17
D 3.4	Zeitabhängiges Verhalten (Viskoelastizität und Viskosität) .....	17
D 3.4.1	Viskoelastisches Verhalten.....	17
D 3.4.2	Viskoses Verhalten .....	17
D 3.4.3	Viskoelastische Werkstoffe.....	18
D 3.4.4	Retardation (Dehnungsrelaxation oder Kriechen) .....	19
D 3.4.5	Relaxation (Spannungsrelaxation oder Entspannung) .....	20
D 3.4.6	Rheologische Modelle .....	21

---

<b>D 4</b>	<b>Abgrenzung der Verhaltensbereiche .....</b>	<b>27</b>
D 4.1	Definition der Kriechgrenze .....	27
D 4.2	Definition der Fließgrenze.....	29
D 4.3	Definition der Bruchgrenze .....	30
<b>D 5</b>	<b>Wahre Dehnung, techn. Dehnung, konstante Dehngeschwindigkeit .....</b>	<b>31</b>
<b>D 6</b>	<b>Festigkeitshypothesen für Fließ- und Bruchbedingungen .....</b>	<b>32</b>
D 6.1	Allgemeines .....	32
D 6.2	Fließbedingungen (Fließhypothesen) .....	32
D 6.2.1	Fließbedingung nach VON MISES (Gestaltänderungsenergiehypothese nach HUBER, MISES und HENCKY) .....	34
D 6.2.2	Fließbedingung nach TRESKA (Schubspannungshypothese) .....	35
D 6.3	Bruchbedingungen (Bruchhypothesen .....	36
D 6.3.1	Allgemeines .....	36
D 6.3.2	Normalspannungshypothese .....	37
D 6.4	Überblick der bekannten Festigkeitshypothesen .....	37
<b>D 7</b>	<b>Zeit-Temperatur-Verschiebungsprinzip.....</b>	<b>39</b>
<b>D 8</b>	<b>BOLTZMANN'sches Superpositionsprinzip .....</b>	<b>42</b>

## D 1 Einführung

Die Werkstoffmechanik befasst sich mit der Beschreibung des mechanischen Verhaltens von Werkstoffen. Sie hat zwei wesentliche Inhalte:

- Die Stoffgesetze, die einen Zusammenhang zwischen den Deformationen und den Spannungen herstellen
- Die Festigkeitshypothesen, die Kriterien zur Abgrenzung verschiedener Verhaltensbereiche liefern, u.a. der Fließgrenze und der Bruchgrenze

Die Grundlage der Werkstoffmechanik ist das Experiment (die Prüfung, der Versuch), in dem die verschiedenen Verhaltensweisen und Eigenschaften eines Werkstoffes mit geeigneten Methoden beobachtet werden. Das Verhalten hängt vom Werkstoff selbst und von der Beanspruchungsart und der Beanspruchungshöhe ab.

Da das mechanische Verhalten der Werkstoffe sehr vielfältig sein kann, bedient man sich Klassifizierungen und Idealisierungen. Bekannte Klassifizierungen sind beispielsweise das elastische und das plastische Verhalten. Derartige Klassifizierungen ermöglichen die Idealisierung von Werkstoffeigenschaften durch anschauliche Werkstoffmodelle.

Geeignete Werkstoffmodelle ermöglichen die Übereinstimmung der im Labor an einem Probekörper gemachten Beobachtungen, das Verhalten eines Bauteils in situ und die z.B. mit FE-Methoden berechneten Spannungen und Deformationen.

## D 2 Spannungen und Deformationen

### D 2.1 Spannungen

#### D 2.1.1 Spannungsvektor und Spannungstensor

Äußere Belastungen auf einen Körper bewirken in ihm innere Spannungen. Ihre Veranschaulichung erfolgt durch den Schnitt durch diesen Körper. Die beiden so entstandenen Teilkörper weisen gleich große aber entgegengesetzt gerichtete Flächenlasten auf. Ist  $\Delta F$  die Kraft auf ein Flächenelement  $\Delta A$  der Schnittfläche, dann beschreibt der Quotient  $\Delta F / \Delta A$  die mittlere Flächenbelastung für dieses Element. Der Grenzwert  $t$  bildet den Spannungsvektor in einem Punkt der Schnittfläche (s. Abb. D 1 a).

$$t = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} = \frac{dF}{dA} \quad (\text{D 1})$$

Seine senkrecht zum Flächenelement  $\Delta A$  stehende Komponente  $\sigma$  bildet die Normalspannung, die tangentielle Komponente  $\tau$  bildet die Schubspannung (s. Abb. D 1 b).

Der Spannungszustand in einem Punkt ist durch die Spannungsvektoren in drei senkrecht aufeinander stehenden Schnitten definiert (s. Abb. D 1 c). Die Spannungskomponenten im kartesischen Koordinatensystem  $x_1, x_2, x_3$  werden mit  $\sigma_{ij}$  bezeichnet. Die Indizes i und j können die Zahlen 1 bis 3 annehmen. Der Index i kennzeichnet die Orientierung des Schnittes, der Index j die Richtung der Komponente.

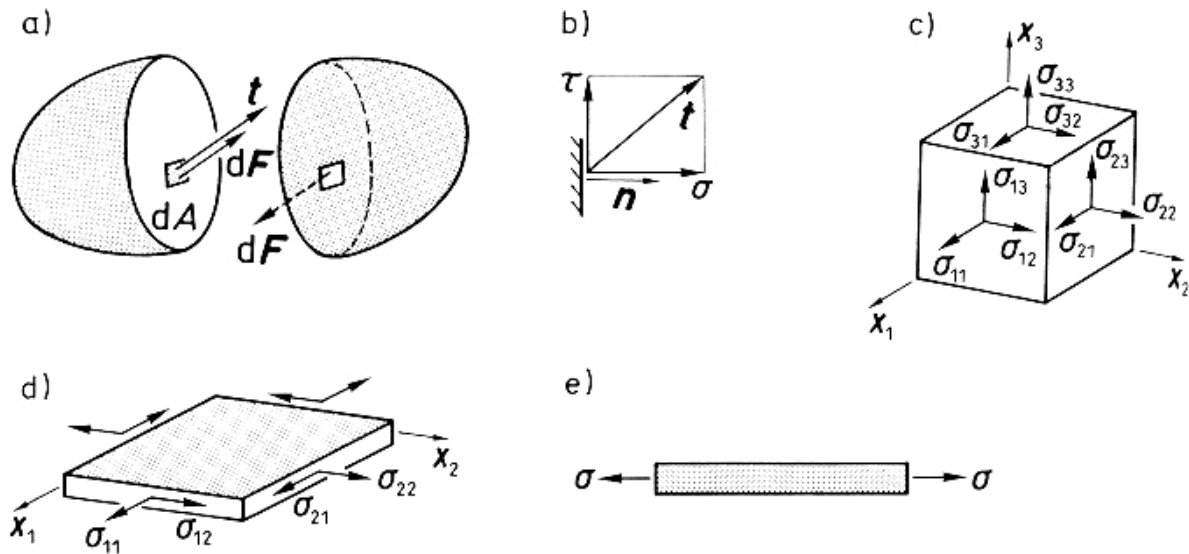


Abb. D 1 a) Spannungsvektor, b) Normal- und Schubspannungskomponente, c) CAUCHY'scher Spannungstensor, d) ebener Spannungszustand, e) einachsiger Spannungszustand GROSS und MEHLHORN 1996 [67]

Die Normalspannungen sind  $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$ , die Schubspannungen  $\sigma_{12}, \sigma_{13}$  usw.. Mit Bezug auf die kartesischen Koordinaten  $x, y, z$  können beide Spannungskomponenten alternativ angegeben werden zu:  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  bzw.  $\tau_{xy}, \tau_{yz}$  etc. Die neun Größen  $\sigma_{ij}$  bilden den CAUCHY'schen Spannungstensor, der sich in Matrixschreibweise wie folgt darstellen lässt:

$$(\sigma_{ij}) = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix} \quad (D 2)$$

Der Spannungstensor ist symmetrisch ( $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ ), d.h. die Schubspannungen in aufeinander senkrecht stehenden Schnitten sind gleich groß, z.B.  $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ .

### D 2.1.2 Ebener Spannungszustand

Vorgespannte Membranen sind flächige Bauteile ( $z \ll x, y$ ), bei denen die Spannungen in lokaler  $z$ -Richtung zu Null angenommen werden. Dieser Zustand wird als ebener Spannungszustand (ESZ) bezeichnet (s. Abb. D 1 d). Der Spannungstensor lässt sich in diesem Fall wie folgt darstellen ( $\sigma_{12} = \sigma_{21}$  bzw.  $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ ):

$$(\sigma_{ij}) = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{yx} & \sigma_y \end{pmatrix} \quad (D 3)$$



### D 2.1.3 Einachsiger Spannungszustand

Beim Sonderfall des einachsigen Zuges (Druckes) in x-Richtung entfallen alle Spannungskomponenten bis auf die Normalspannung  $\sigma_x$  bzw.  $\sigma_{11}$  (s. Abb. D 1 e). Der Spannungstensor ergibt sich zu:

$$(\sigma_{ij}) = \sigma_{11} = \sigma_x \quad (\text{D 4})$$

### D 2.1.4 Hauptspannungen

Der Spannungstensor kann für beliebige Schnitte angegeben werden, so auch für das so genannte Hauptachsensystem, bei dem in Schnitten senkrecht zu den Hauptachsen die Schubspannungskomponenten Null werden und somit nur Normalspannungen auftreten.

Der Hauptspannungstensor kann mit der EINSTEIN'schen Summationsvereinbarung (Erläuterung s. z.B. GROSS und MEHLHORN 1996 [67]), angegeben werden zu:

$$(\sigma_{ij}) = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix} \quad (\text{D 5})$$

Die drei Hauptspannungen  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  errechnen sich aus der kubischen Gleichung:

$$\sigma^3 - J_1\sigma^2 - J_2\sigma - J_3 = 0 \quad (\text{D 6})$$

Hierin werden  $J_1, J_2, J_3$  die Invarianten des Spannungstensors genannt. Sie sind unabhängig vom Koordinatensystem (invariant). Sie werden wie folgt berechnet:

$$J_1 = \sigma_{ii} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad (\text{D 7 a})$$

$$J_2 = (\sigma_{ij}\sigma_{ij} - \sigma_{ii}\sigma_{jj})/2 = \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1 = \sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x - (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \quad (\text{D 7 b})$$

$$J_3 = \det(\sigma_{ij}) = \sigma_1\sigma_2\sigma_3 = \begin{vmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{vmatrix} = \sigma_x\sigma_y\sigma_z + 2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{zx} - (\sigma_x\tau_{yz}^2 + \sigma_y\tau_{zx}^2 + \sigma_z\tau_{xy}^2) \quad (\text{D 7 c})$$

### D 2.1.5 Hauptschubspannungen

In Schnitten, deren Normale senkrecht auf einer der Hauptachsen steht, und die mit den beiden anderen Hauptachsen einen Winkel von  $45^\circ$  einschließt, werden die Schubspannungen maximal. Man bezeichnet sie als Hauptschubspannungen  $\tau_1, \tau_2, \tau_3$ .

$$\tau_1 = \pm \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \quad (\text{D 8 a})$$

$$\tau_2 = \pm \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2} \quad (\text{D 8 b})$$

$$\tau_3 = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \quad (\text{D 8 c})$$

Die Normalspannungen sind für die Schnitte, bei denen die Hauptschubspannungen auftreten, nicht null.

### D 2.1.6 MOHR'scher Spannungskreis

Der MOHR'sche Spannungskreis veranschaulicht den jeweiligen Spannungszustand für beliebige Schnitte in Form eines  $\sigma$ - $\tau$ -Diagramms (s. Abb. D 2). Die räumlichen Spannungen  $\sigma$  und  $\tau$  können darin nur im Gebiet des großen Kreises liegen.

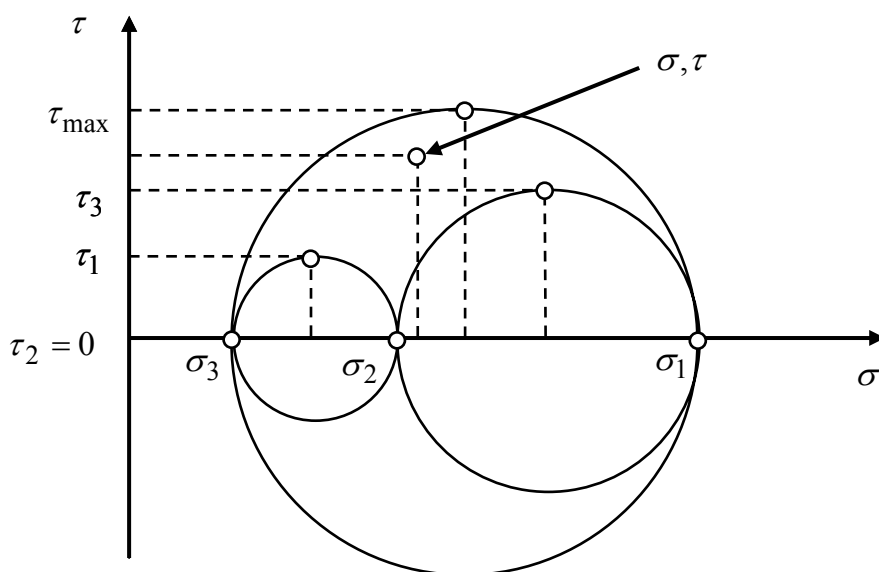


Abb. D 2 MOHR'scher Spannungskreis für den allgemeinen räumlichen Spannungszustand mit den drei Hauptspannungen  $\sigma_1; \sigma_2$  und  $\sigma_3$  (def.:  $\sigma_{\max} = \sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ) sowie den zugeordneten Schubspannungen  $\tau_1, \tau_2$  und  $\tau_3$  (siehe z.B. GROSS und MEHLHORN 1996 [67])

Er vereinfacht sich für den ebenen Spannungszustand, wie in Abb. D 3 dargestellt.

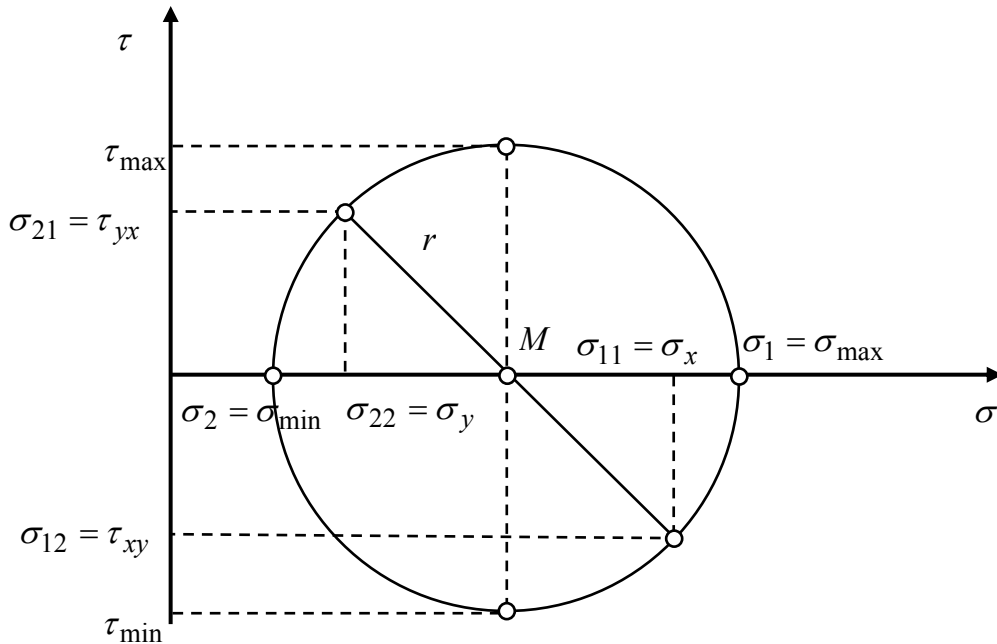


Abb. D 3 MOHR'scher Spannungskreis für den ebenen Spannungszustand mit den Normalspannungen  $\sigma_{11} = \sigma_x$  und  $\sigma_{22} = \sigma_y$ , den Schubspannungen  $\sigma_{12} = \tau_{xy}$  und  $\sigma_{21} = \tau_{yx}$ , den Hauptspannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  ( $\sigma_1 > \sigma_2$ ) sowie den Hauptschubspannungen  $\tau_{\max} = |\tau_{\min}|$

### D 2.1.7 Oktaederspannungen (mittlere Normalspannung)

In Schnitten, deren Normale mit den drei Hauptachsen gleiche Winkel einschließt, ergeben sich die so genannten Oktaederspannungen  $\sigma_{Oct}, \tau_{Oct}$ . Man bezeichnet  $\sigma_{Oct}$  auch als mittlere Normalspannung  $\sigma_m$ :

$$\sigma_{Oct} = \sigma_m = \frac{\sigma_{ii}}{3} = \frac{\sigma_{kk}}{3} = \frac{J_1}{3} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (D 9)$$

$$\tau_{Oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (D 10)$$

### D 2.1.8 Hydrostatischer und deviatorischer Anteil des Spannungstensors

Mit Hilfe der mittleren Normalspannung  $\sigma_m$  lässt sich der Spannungstensor in einen deviatorischen Anteil  $\sigma'_{ij}$  und einen hydrostatischen Anteil  $\frac{\sigma_{kk}}{3} \delta_{ij} = \sigma_m \delta_{ij}$  zerlegen. Darin ist  $\delta_{ij}$  das so genannte Kronecker –Symbol, mit  $\delta_{ij} = 1$  für  $i = j$  und  $\delta_{ij} = 0$  für  $i \neq j$ .

$$(\sigma_{ij}) = \sigma_m \delta_{ij} + \sigma'_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_m & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_m & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_m \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sigma_{11} - \sigma_m & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} - \sigma_m & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} - \sigma_m \end{pmatrix} \quad (D 11)$$

Der hydrostatische Anteil  $\sigma_m \delta_{ij}$  bildet den Spannungszustand in einer ruhenden Flüssigkeit mit allseitig gleichen Spannungen ab (s. Abb. D 4).

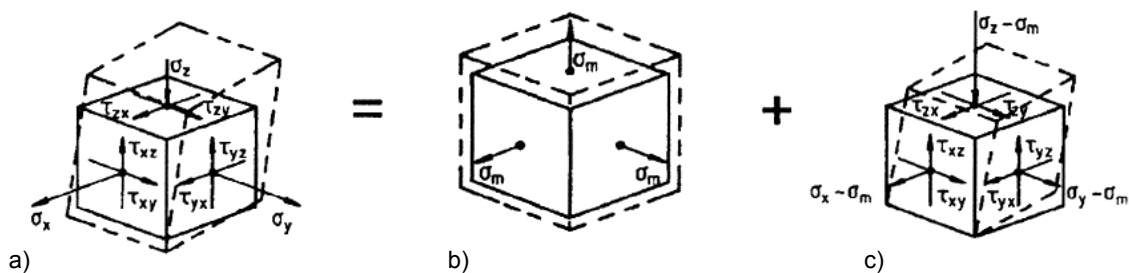


Abb. D 4 Zerlegung des Spannungstensors (a) in den hydrostatischen Anteil (b) und den deviatorischen Anteil (c); in kartesischen Koordinaten; ISSLER, RUOSS und HÄFELE 1995 [88]

Die Invarianten des hydrostatischen Anteils lassen sich wie folgt darstellen:

$$J_1^0 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad (D 12 a)$$

$$J_2^0 = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)^2 \quad (D 12 b)$$

$$J_3^0 = \frac{1}{27}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^3 = \frac{1}{27}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)^3 \quad (D 12 c)$$

Die Abweichungen vom hydrostatischen Spannungszustand können über die Invarianten des Deviators beschrieben werden:

$$J_1' = 0 \quad (D 13 a)$$

$$J_2' = \frac{1}{2} \sigma_{ij}' \sigma_{ij}' = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] = \frac{1}{6} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] - [\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2] = \frac{3}{2} \tau_{Oct}^2 \quad (D 13 b)$$

$$J_3' = \frac{1}{3} \sigma_{ij}' \sigma_{jk}' \sigma_{ki}' = \sigma_1' \sigma_2' \sigma_3' = \sigma_x' \sigma_y' \sigma_z' + 2\tau_{xy}' \tau_{yz}' \tau_{zx}' - (\sigma_x' \tau_{yz}'^2 + \sigma_y' \tau_{zx}'^2 + \sigma_z' \tau_{xy}'^2) \quad (D 13 c)$$

## D 2.2 Deformationen

### D 2.2.1 Verschiebungen und Verzerrungen

Die Deformationen können mit Hilfe eines Verschiebungsvektors in Kombination mit einem Verzerrungstensor beschrieben werden. Für die Verschiebung zweier Punkte P und Q mit den Koordinaten  $x_i$  bzw.  $x_i + dx_i$  nach P' und Q' mit den Koordinaten  $\xi_i$  bzw.  $\xi_i + d\xi_i$  lautet der Verschiebungstensor:

$$u_i = \xi_i - x_i \quad (D 14)$$

Besteht eine umkehrbar eindeutige Zuordnung zwischen deformiertem und undeformiertem Zustand, dann gilt:

$$u_i = u_i(x_1, x_2, x_3) = \xi_i = \xi_i(x_1, x_2, x_3) \quad (D 15)$$

Wenn der Abstand der beiden undeformierten Punkte P und Q den Abstand  $dS$  hat und der Abstand der deformierten Punkte den Abstand  $ds$ , dann läßt sich das Verzerrungsmass über einen Vergleich der Abstandsquadrate beider Längen definieren:

$$dS^2 = dx_k dx_k = dx_i dx_i \delta_{ij} \quad (D 16)$$

$$ds^2 = d\xi_k d\xi_k = d\xi_{k,i} d\xi_{k,j} \delta x_j \quad (D 17)$$

$$ds^2 - dS^2 = 2E_{ij} dx_i dx_j \quad (D 18)$$

Wobei  $E_{ij}$  den GREEN'schen Verzerrungstensor bildet:

$$E_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i} + u_{k,i} u_{k,j}) \quad (D 19)$$

Als Kurzschreibweise für die Ableitung wurde dabei die Symbolik  $u_{i,j} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$  verwendet.

Für hinreichend kleine Verschiebungsgradienten erhält man den infinitesimalen Verzerrungstensor  $\varepsilon_{ij}$ . Er kann für den räumlichen Deformationszustand in Matrizenschreibweise angegeben werden zu:

$$(\varepsilon_{ij}) = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & \frac{1}{2} \gamma_{xy} & \frac{1}{2} \gamma_{xz} \\ \frac{1}{2} \gamma_{yx} & \varepsilon_y & \frac{1}{2} \gamma_{yz} \\ \frac{1}{2} \gamma_{zx} & \frac{1}{2} \gamma_{zy} & \varepsilon_z \end{pmatrix} \quad (D 20)$$

Seine Komponenten lassen sich geometrisch deuten. Die Komponenten  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  können als bezogene Längenänderungen (Dehnungen) dargestellt werden, die Komponenten  $\frac{\gamma_{xy}}{2}, \frac{\gamma_{xz}}{2}, \frac{\gamma_{yz}}{2}$  etc. als Gleitungen (Winkeländerungen). Ebenso, wie der Spannungstensor ist der Verzerrungstensor symmetrisch, d.h.  $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji}$ , d.h. die Gleitungen in aufeinander senkrecht stehenden Schnitten sind gleich groß (z.B.  $\gamma_{xy} = \gamma_{yx}$ ).

### D 2.2.2 Ebener Verzerrungszustand

Sind die Verzerrungen in einer Richtung (z.B. in lokaler z-Richtung) Null, erhält man den Sonderfall des ebenen Verzerrungszustandes (EVZ). Der Verzerrungstensor läßt sich in diesem Fall wie folgt darstellen:

$$(\varepsilon_{ij}) = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & \frac{1}{2} \gamma_{xy} \\ \frac{1}{2} \gamma_{yx} & \varepsilon_y \end{pmatrix} \quad (D 21)$$

### D 2.2.3 Einachsiger Verzerrungszustand

Beim Sonderfall des einachsigen Zuges (Druckes) in x-Richtung entfallen alle Verzerrungskomponenten bis auf die Dehnung  $\varepsilon_x$ . Der Verzerrungstensor ergibt sich zu:

$$(\varepsilon_{ij}) = \varepsilon_{11} = \varepsilon_x \quad (\text{D 22})$$

### D 2.2.4 Hauptdehnungen

Analog zum Spannungstensor existiert ein Hauptachsensystem, bei dem in Schnitten senkrecht zu den Hauptachsen die Gleitungen Null werden und somit nur Dehnungen auftreten. Der Hauptdehnungstensor kann mit Hilfe der EINSTEIN'schen Summationsvereinbarung angegeben werden zu:

$$(\varepsilon_{ij}) = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{pmatrix} \quad (\text{D 23})$$

Die drei Hauptdehnungen  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  errechnen sich analog zu den Hauptspannungen. Auch für die Hauptdehnungen gibt es drei Invarianten  $(I_1, I_2, I_3)$ , die unabhängig vom Koordinatensystem sind. Die erste Invariante liefert die Volumendehnung:

$$I_1 = \varepsilon_{kk} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad (\text{D 24})$$

### D 2.2.5 Hydrostatischer und deviatorischer Anteil des Dehnungstensors

Analog zum Spannungstensor lässt sich der Dehnungstensor in einen hydrostatischen und einen deviatorischen Anteil zerlegen. Der hydrostatische Anteil beschreibt die Volumenänderung, der deviatorische Anteil die Gestaltänderung (bei gleich bleibendem Volumen):

$$(\varepsilon_{ij}) = \frac{\varepsilon_{kk}}{3} \delta_{ij} + \varepsilon'_{ij} \quad (\text{D 25})$$

### D 2.2.6 Verzerrungsgeschwindigkeitstensor

Bei zeitlicher Abhängigkeit der Verzerrungen genügt der Verzerrungstensor unter Umständen nicht, die Deformationen des Körpers hinreichend genau zu beschreiben. Dann ist es sinnvoll, den Verzerrungsgeschwindigkeitstensor zu verwenden. Diesbezüglich wird auf die weiterführende Literatur verwiesen, z.B. [67], [88].

### D 3 Klassifizierung des Werkstoffverhaltens

#### D 3.1 Homogenität und Isotropie

Sind die mechanischen Eigenschaften eines Körpers aus makroskopischer Sicht in allen Punkten gleich, so spricht man von einem homogenen Werkstoff. Sind sie lokal veränderlich, spricht man von einem inhomogenen Werkstoff.

Sind die mechanischen Eigenschaften unabhängig von der Richtung, nennt man den Werkstoff isotrop, andernfalls anisotrop. Kennzeichnen den Werkstoff zwei bzw. drei orthogonale Richtungen, in denen er das gleiche aber ein von den anderen Richtungen differentes mechanische Verhalten aufweist, so spricht man von einem orthotropen Werkstoff. Dies ist bei einigen Geweben der Fall.

#### D 3.2 Elastisches, plastisches, viskoelastisches und viskoses Verhalten

Der Zusammenhang zwischen Spannungen und Dehnungen wird durch das Stoffgesetz (Werkstoffgesetz, Materialgesetz) beschrieben. Hierbei unterscheidet man einige idealtypische Verhaltensweisen (s. Abb. D 5).

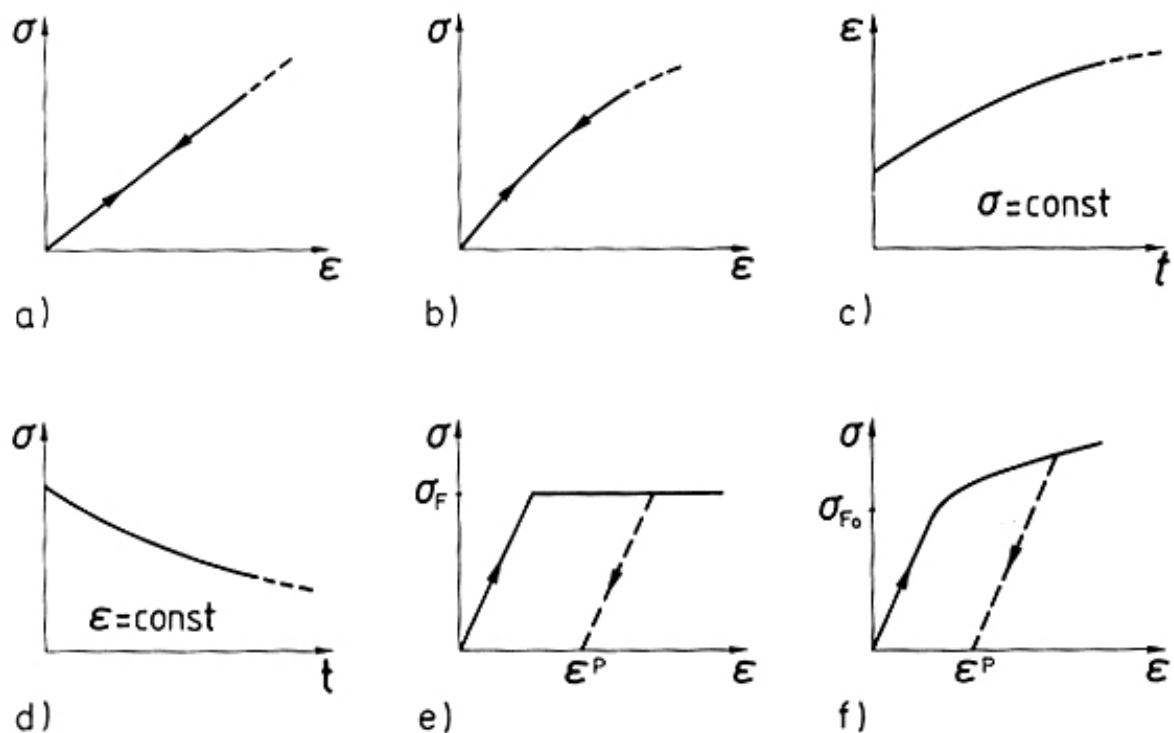


Abb. D 5 Typische Arten des Werkstoffverhaltens: a) linear elastisch, b) nichtlinear elastisch, c) viskoelastisch (Retardation), d) viskoelastisch (Relaxation), e) ideal elastisch-plastisch, f) elastisch-plastisch mit Verfestigungsbereich; GROSS und MEHLHORN 1996 [67]

### D 3.3 Zeitunabhängiges Verhalten (Elastizität, Plastizität)

#### D 3.3.1 Linear-elastisches Verhalten - HOOKE'sches Gesetz

Einen Werkstoff, bei dem ein umkehrbarer und eindeutiger Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung existiert, nennt man elastisch. Bei linearer Elastizität ist dieser Zusammenhang linear (s. Abb. D 5 a), beim nichtlinearer Elastizität nichtlinear (s. Abb. D 5 b).

Das verallgemeinerte HOOKE'sche Gesetz beschreibt eine eindeutige und lineare Beziehung zwischen den Spannungen  $\sigma$  und den Dehnungen  $\varepsilon$ . Es ist damit das klassische Gesetz für linear-elastisches Werkstoffverhalten. Seine Anwendung ist auf kleine Verschiebungen und Verzerrungen nahe der Referenzkonfiguration beschränkt.

Für den einachsigen Spannungszustand ist es allgemein bekannt:

$$\text{Zugbeanspruchung} \quad \sigma = E \cdot \varepsilon \quad (\text{D 26})$$

$$\text{Scherbeanspruchung} \quad \tau = G \cdot \gamma \quad (\text{D 27})$$

Im allgemeinen Fall eines räumlichen Spannungs- bzw. Verzerrungszustandes lautet es:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (\text{D 28})$$

Darin ist  $C_{ijkl}$  der Elastizitätstensor. Die Matrix kann im anisotropen Fall durch 36 Elastizitätskonstanten  $E_{ij}$  angegeben werden, von denen bei Symmetrie 21 unabhängige Konstanten übrig bleiben. In Vektorschreibweise lautet das HOOKE'sche Gesetz im allgemeinen Fall:

$$(\sigma_{ij}) = \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{11} & E_{12} & E_{13} & E_{14} & E_{15} & E_{16} \\ E_{21} & E_{22} & E_{23} & E_{24} & E_{25} & E_{26} \\ E_{31} & E_{32} & E_{33} & E_{34} & E_{35} & E_{36} \\ E_{41} & E_{42} & E_{43} & E_{44} & E_{45} & E_{46} \\ E_{51} & E_{52} & E_{53} & E_{54} & E_{55} & E_{56} \\ E_{61} & E_{62} & E_{63} & E_{64} & E_{65} & E_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{31} \\ 2\varepsilon_{12} \end{pmatrix} \quad (\text{D 29})$$

Ist der Werkstoff isotrop, können die Komponenten des Elastizitätstensors durch die beiden unabhängigen LAMÉ'schen Konstanten  $\lambda$  und  $\mu$  festgelegt werden. Das HOOKE'sche Gesetz lautet dann:

$$\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2 \mu \varepsilon_{ij} \quad (\text{D 30})$$



Für die Spannungskomponenten ergeben sich die folgenden 6 Gleichungen:

$$\sigma_x = \lambda (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) + 2 \mu \varepsilon_x \quad (\text{D 31 a})$$

$$\sigma_y = \lambda (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) + 2 \mu \varepsilon_y \quad (\text{D 31 b})$$

$$\sigma_z = \lambda (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) + 2 \mu \varepsilon_z \quad (\text{D 31 c})$$

$$\tau_{xy} = \mu \gamma_{xy} \quad (\text{D 31 d})$$

$$\tau_{yz} = \mu \gamma_{yz} \quad (\text{D 31 e})$$

$$\tau_{zx} = \mu \gamma_{zx} \quad (\text{D 31 f})$$

Die LAMÉ'schen Konstanten  $\lambda$  und  $\mu$  haben eine Beziehung zu den im Bauwesen gebräuchlichen Werkstoffparametern  $E$  (Elastizitätsmodul),  $G$  (Schubmodul),  $K$  (Kompressionsmodul),  $\nu$  (Querkontraktionszahl) und  $m = \frac{1}{\nu}$  (Poissonzahl):

$$\lambda = \frac{E \nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} = \frac{2\nu G}{1-2\nu} \quad (\text{D 32})$$

$$\mu = G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (\text{D 33})$$

$$E = \frac{\mu(2\mu+3\lambda)}{\lambda+\mu} \quad (\text{D 34})$$

$$K = \lambda + \frac{2}{3}\mu = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (\text{D 35})$$

$$\nu = \frac{\lambda}{2(\lambda+\mu)} \quad (\text{D 36})$$

Nach DASSOW 1995 [39] bedeutet eine Querkontraktionszahl  $\nu = 0,33$  rein elastisches Werkstoffverhalten. Für  $\lambda \rightarrow \infty$  ergibt sich der Wert  $\nu = 0,5$ . Er bedeutet eine Volumenkonstanz bei der Deformation.

Löst man das HOOKE'sche Gesetz nach den Verzerrungen auf, ergeben sich die folgenden 6 Komponenten:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_z)) \quad (\text{D 37 a})$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} (\sigma_y - \nu (\sigma_z + \sigma_x)) \quad (\text{D 37 b})$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} (\sigma_z - \nu (\sigma_x + \sigma_y)) \quad (\text{D 37 c})$$

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{G} \tau_{xy} \quad (\text{D 37 d})$$

$$\gamma_{yz} = \frac{1}{G} \tau_{yz} \quad (\text{D 37 e})$$

$$\gamma_{zx} = \frac{1}{G} \tau_{zx} \quad (\text{D 37 f})$$

HOOKE'sches Gesetz für den ebenen Spannungszustand eines isotropen, elastischen und homogenen Werkstoffs

Für den Sonderfall des ebenen Spannungszustandes werden alle Spannungen in der dritten lokalen Koordinatenrichtung (z-Richtung) Null ( $\tau_{xz} = \sigma_{zx} = \sigma_{yz} = \sigma_{zy} = \sigma_z = 0$ ). Auch die entsprechenden Komponenten des Verzerrungstensors sind Null, wenn sich keine Gleitungen (Winkeländerungen) in dieser Richtung einstellen. Aufgrund der Symmetrie des Verzerrungstensors gilt damit:  $\gamma_{xz} = \gamma_{zx} = \gamma_{yz} = \gamma_{zy} = 0$ . Die Dehnungskomponente  $\varepsilon_z \neq 0$  beschreibt die Dickenänderung des Materials. Sie ist keine unabhängige Komponente, sondern ergibt sich über die Zusammenhänge der Werkstoffparameter. Hiermit lässt sich das HOOKE'sche Gesetz unter Verwendung karthesischer Koordinaten und der Werkstoffparameter E und  $\nu$  reduzieren auf:

$$(\sigma_{ij}) = \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{pmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ 2\gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad (\text{D 38})$$

Die 3 Gleichungen für die Einzelkomponenten der Spannungen ergeben sich daraus zu:

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_x + \nu \varepsilon_y) \quad (\text{D 39 a})$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_y + \nu \varepsilon_x) \quad (\text{D 39 b})$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = G \gamma_{xy} = G \gamma_{yx} \quad (\text{D 39 c})$$

Die 4 Gleichungen für die Einzelkomponenten der Verzerrungen ergeben sich daraus zu:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu \sigma_y) \quad (\text{D 40 a})$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu \sigma_x) \quad (\text{D 40 b})$$

$$\varepsilon_z = \frac{-\nu}{E}(\sigma_x + \sigma_y) = -\frac{\nu}{1-\nu}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) \quad (\text{D 40 c})$$

$$\gamma_{xy} = \gamma_{yx} = \frac{\tau_{xy}}{G} \quad (\text{D 40 c})$$

Beim ebenen Spannungszustand besteht also eine Abhängigkeit der Dehnungen  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  untereinander. Die Volumenänderung  $\Delta V$  des Körpers ergibt sich ebenfalls mit den Werkstoffparametern  $E$  und  $\nu$  sowie in Abhängigkeit von  $\sigma_x$  zu:

$$\Delta V = \frac{V - V_0}{V_0} = \left[ \left(1 + \frac{\sigma_x}{E}\right) \left(1 - \frac{\nu \sigma_x}{E}\right) \left(1 - \frac{\nu \sigma_x}{E}\right) - 1 \right] \quad (\text{D 41})$$

Für die beiden Hauptachsen lassen sich folgende Beziehungen aufstellen ( $\tau_{xy} = \tau_{yx} = 0$ ,  $\gamma_{xy} = \gamma_{yx} = 0$ ):

Hauptspannung 1  $\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_1 + \nu \varepsilon_2)$  (D 42)

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} \left( \sigma_x + \sigma_y + \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \right)$$

Hauptspannung 2  $\sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_2 + \nu \varepsilon_1) = \frac{1}{2} \left( \sigma_x + \sigma_y - \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \right)$  (D 43)

Querkontraktion  $\nu = \frac{(\varepsilon_1 / \sigma_1) - (\varepsilon_2 / \sigma_2)}{(\varepsilon_1 / \sigma_2) - (\varepsilon_2 / \sigma_1)}$  (D 44)

Elastizitätsmodul  $E = \frac{1-\nu^2}{\varepsilon_1 + \nu \varepsilon_2} \cdot \sigma_1 = \frac{1-\nu^2}{\varepsilon_2 + \nu \varepsilon_1} \cdot \sigma_2$  (D 45)

Die maximale Schubspannung ergibt sich zu:

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \quad (\text{D 46})$$

### D 3.3.2 Nichtlinear-elastisches Verhalten

Modelle, die nichtlinear-elastische Verhaltensweisen beschreiben, sind beispielsweise die Werkstoffgesetze nach OGDEN, NEO-HOOKE und MOONEY-RIVLIN. Da das Spannungs-Dehnungsverhalten der auf Zug beanspruchten ETFE-Folie für kleine Verschiebungen mit dem linear elastischen Gesetz nach HOOKE bis zur Fließgrenze hinreichend genau abgebildet werden kann, wird bezüglich der nichtlinear-elastischen Modelle auf die Literatur, z.B. [67] und [88] verwiesen.

### D 3.3.3 Plastisches Verhalten

Das plastische Verhalten ist von der Spannungs-Dehnungsgeschichte abhängig, jedoch unabhängig von der Zeit. Der plastische Bereich bzw. die Verfestigung endet entweder im Bruch oder in Form einer Entlastung vor dem Bruch. Eine derartige Entlastung aus dem plastischen Bereich verläuft nahezu rein elastisch mit den Rückdehnungen  $\varepsilon_{el}$ . Die bei vollständiger Entlastung verbleibenden Dehnungen heißen plastische Dehnungen  $\varepsilon_{pl}$ . Eine erneute Belastung (Zweitbelastung) folgt zunächst der elastischen Geraden der Erstbelastung. Fließen setzt erst wieder bei einer Spannung ein, die i. A. mindestens so groß ist, wie die Fließspannung bei der Erstbelastung. Sind die Fließpunkte bei der Erst- und Zweitbelastung gleich groß, handelt es sich um einen ideal plastischen Werkstoff, ist sie bei der Zweitbelastung höher, hat eine Verfestigung stattgefunden (vgl. Abb. D 5 (e) und (f)). Plastisches Fließen verläuft zumeist ohne Volumenänderung. Man nennt dieses Verhalten plastische Inkompressibilität. Zur Beschreibung des elastisch-plastischen Verhaltens bedient man sich rheologischer Modelle mit Feder- und COULOMB'schen Reibungselementen, die in Serie (Reihe) oder parallel geschaltet werden. Das Federelement symbolisiert hierbei das elastische, das Reibungselement das plastische Verhalten (s. Abb. D 6).

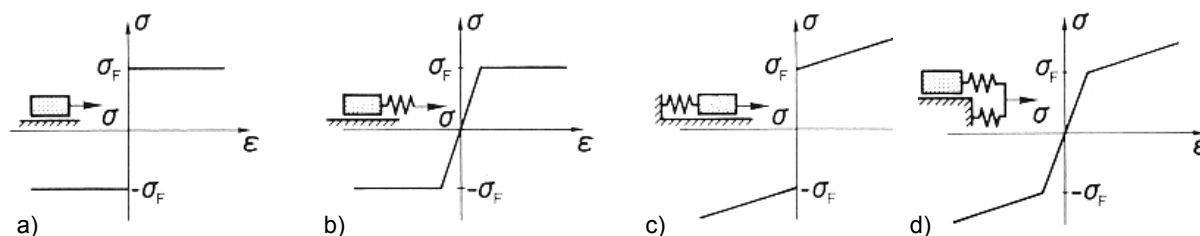


Abb. D 6 Modelle mit Feder- und COULOMB'schen Reibungselementen zur Beschreibung verschiedener plastischer Verhaltensweisen: a) starr (ideal) plastisch, b) ideal elastisch-plastisch, c) starr plastisch mit Verfestigung, d) elastisch-plastisch mit Verfestigung; GROSS und MEHLHORN 1996 [67]

Das folgende Werkstoffgesetz wird oft als Näherungslösung für das elastisch-plastische Verhalten mit Verfestigungsbereich (s. Abb. D 6 d) für einachsige Beanspruchungen herangezogen. Mit der Fließgrenze ( $\sigma_F, \varepsilon_F$ ) und der Einführung des Verfestigungsmoduls  $E_{pl}$  führt es im Fließbereich zu folgender Gleichung:

$$\sigma = \left(1 - \frac{E_{pl}}{E}\right) \sigma_F + E_{pl} \varepsilon \quad (D 47)$$

Alternativ findet häufig auch ein Potenzgesetz Anwendung, das für den Grenzfall  $N = 0$  das starr (ideal) plastische Werkstoffverhalten nach Abb. D 6 a. charakterisiert:

$$\sigma = \sigma_F \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_F} \right)^N \quad (\text{D 48})$$

### D 3.3.4 Elastisch-plastisches Verhalten

Ein rein plastisches Werkstoffverhalten ohne anfänglichen elastischen Bereich bezeichnet man als ideal plastisch oder starr plastisch. Ist das Verhalten bis zur Fließgrenze zeitunabhängig und elastisch, wird oberhalb dieser Grenze jedoch plastisch, spricht man von einem elastisch-plastischen Verhalten. Im plastischen Bereich nehmen die Dehnungen unabhängig von der Zeit zu und es bleibt nach der Entlastung eine plastische Verformung zurück. Muss die Spannung oberhalb der Fließgrenze trotz zunehmender Dehnung nicht erhöht werden, spricht man von einem ideal elastisch-plastischen Verhalten (s. Abb. D 5 e), nimmt sie hingegen zu, spricht man von einer Verstreckung oder einem Verfestigungsbereich (s. Abb. D 5 f).

### D 3.4 Zeitabhängiges Verhalten (Viskoelastizität und Viskosität)

#### D 3.4.1 Viskoelastisches Verhalten

Ein vollständig reversibles, aber von der Spannungs-Dehnungsgeschichte (Belastungs- und Deformationsgeschichte) und der Zeit abhängiges, elastisches Verhalten nennt man viskoelastisch. Abb. D 5 (c) zeigt ein solches Verhalten im Retardationsversuch (Kriechversuch), bei dem die Spannung konstant gehalten wird, und die Dehnung über die Zeit zunimmt. Abb. D 5 (d) zeigt ein viskoelastisches Verhalten im Relaxationsversuch, bei dem die Dehnung konstant gehalten wird, und die Spannung über die Zeit abnimmt.

Man unterscheidet zwischen linear und nichtlinear viskoelastischem Verhalten. Die Linearität ist dann gegeben, wenn die Retardations- bzw. Relaxationsfunktion zwar von der Zeit und der Temperatur, nicht aber von der Höhe der Beanspruchung abhängt. Nach GRELLMANN 2005 [66] ist sie bei festen Polymeren für Dehnungen von maximal 1 % gegeben. Bei Polymerschmelzen kann sie bis zu 100 % Dehnung erreichen.

#### D 3.4.2 Viskoses Verhalten

Treten zeitabhängige, irreversible Dehnungen auf, so bezeichnet man das Verhalten als viskos, zuweilen auch als viskoplastisch. Ein derartiges Verhalten ist unter Berücksichtigung der Vorgeschichte eindeutig, aber nicht umkehrbar, d.h. es ist nicht möglich, von einem Zustand auf seine Belastungsgeschichte zu schließen.

Bei einem linearen Zusammenhang zwischen Spannung und Deformationsgeschwindigkeit spricht man von einer ideal viskosen Flüssigkeit mit NEWTON'schem Werkstoffverhalten, das durch den Werkstoffkennwert der Viskosität  $\eta$  bestimmt wird.

Im Fall einer Dehnbeanspruchung (Dehnströmung) gilt:

$$\sigma = \eta^T \frac{d\varepsilon}{dt} = \eta^T \dot{\varepsilon} \quad (\text{D 49})$$

Im Fall einer einfachen Scherbeanspruchung (Scherströmung) gilt:

$$\tau = \eta \frac{d\gamma}{dt} = \eta \dot{\gamma} \quad (\text{D 50})$$

In den Gleichungen bedeutet  $\eta^T$  die Dehnviskosität (TROUTON'sche Viskosität) und  $\eta$  die Scherviskosität. Bei kleinen Schergeschwindigkeiten ist  $\frac{\eta^T}{\eta} = 3$  (TROUTON'sches Verhältnis). Bei größeren Schergeschwindigkeiten findet häufig eine Schererweichung statt, die als Strukturviskosität bezeichnet wird. Das Gegenteil wird als Scherverfestigung (Dilatanz) bezeichnet. Mit Abweichung vom NEWTON'schen Verhalten wird die Viskosität zu einer nichtlinearen Funktion der Deformationsgeschwindigkeit.

### D 3.4.3 Viskoelastische Werkstoffe

Einen Werkstoff, der sowohl zeitunabhängige elastische, als auch zeitabhängige viskoelastische und viskose Verhaltensweisen zeigt, nennt man einen viskoelastischen Werkstoff \*. Bei teilkristallinen Thermoplasten, und dazu gehört ETFE, sind auch die irreversiblen Deformationen zeitabhängig. Daher differenziert beispielsweise DASSOW 1995 [39] für diese Werkstoffgruppe die folgenden Dehnungsanteile:

- eine von der Zeit unabhängige, vollständig reversible (elastische) Deformation  $\varepsilon_{el}$
- eine von der Zeit abhängige, vollständig reversible (relaxierende) Deformation  $\varepsilon_{v,el}$
- eine von der Zeit abhängige, irreversible (plastische) Deformation  $\varepsilon_v$  (ggf. auch  $\varepsilon_{v,pl}$  oder  $\varepsilon_{pl}$ )

MICHAELI und GLISSMANN [209] präsentierten 2001 eine geschlossene Lösung in Form einer Gleichung (Gl. D 79), die eine gute Beschreibung viskoelastischen Werkstoffverhaltens für einige Polymere (PC, PVC, PET, PE, PMMA) erlaubt:

$$\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, \vartheta) = E_0(\dot{\varepsilon}, \vartheta) \cdot \frac{1}{w(\dot{\varepsilon}, \vartheta)} \left[ 1 - e^{-w(\dot{\varepsilon}, \vartheta) \varepsilon} \right] \cdot e^{h(\dot{\varepsilon}, \vartheta) \varepsilon^2} \quad (\text{D 51})$$

Die Gleichung basiert auf der Modifikation einer von DUFFO 1995 vorgestellten Gleichung (s. Verweis in [209]) und macht sowohl den elastischen, viskoelastischen und viskosen Dehnungsanteil, gemessen in Kurzzeitzugversuchen beschreibbar. Sie basiert auf der Messung wahrer Spannungen und Dehnungen (s. Kap. D 5).

Die drei Parameter  $E_0$ ,  $w$  und  $h$  sind keine Konstanten, sondern von der Temperatur  $\vartheta$  und der Dehngeschwindigkeit  $\dot{\varepsilon}$  abhängige Funktionen, die als Anfangs-E-Modul ( $E_0$ ) als viskoelastischer Koeffizient ( $w$ ) und als Verstreckungskoeffizient ( $h$ ) bezeichnet werden.

---

\* Es ist diesbezüglich zwischen viskoelastischem Verhalten im Sinne viskoelastischer Dehnungen und viskoelastischem Verhalten im Sinne eines viskoelastischen Werkstoffes zu unterscheiden, da letzteres auch viskose, also irreversible Dehnungsanteile beinhaltet.

Die drei Dehnungsanteile treten nicht nacheinander auf - sie überlagern sich. Dies bedeutet, dass sich bei einem viskoelastischen Werkstoff die im Kurzzeitzugversuch ermittelte Gesamtdehnung grundsätzlich aus den drei Dehnungsanteilen zusammensetzt (Lediglich zu Beginn treten ausschließlich zeitunabhängige elastische Dehnungen auf.)

Eine Spannung unterhalb der im Kurzzeitzugversuch gemessenen Fließspannung kann bei einem Langzeitversuch zu irreversiblen Dehnungen führen, da auch die Fließgrenze zeitabhängig ist, d.h. von der Dehngeschwindigkeit abhängt.

Das zeitabhängige Verhalten der Viskoelastizität zeigt sich deutlicher in Langzeittests, speziell in Zeitstandsversuchen. Hier werden die beiden Verhaltensweisen der Retardation und der Relaxation unterschieden.

#### D 3.4.4 Retardation (Dehnungsrelaxation oder Kriechen)

Unter Retardation versteht man die zeitliche Änderung der Dehnung  $\varepsilon(t)$  bei festgehaltener Spannung  $\sigma_0$ . Sie kann durch eine Kriechfunktion (Retardationsfunktion) für die Fälle der einachsigen Dehnung und der Scherung der Form

$$\text{Dehnung} \quad D(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0} \quad (\text{D 52 a})$$

$$\text{Scherung} \quad J(t) = \frac{\gamma(t)}{\tau_0} \quad (\text{D 52 b})$$

aus Kriechversuchen gewonnen werden. Man bezeichnet die Kriechfunktion im Fall der Dehnung auch als Dehnnachgiebigkeit  $D(t)$ , bei Scherung als Schernachgiebigkeit  $J(t)$ . Der beim Aufbringen der Belastung zum Zeitpunkt  $t = 0$ , oder durch eine plötzliche Belastungsänderung hervorgerufene Sprung, wird als Anfangsnachgiebigkeit bzw. als instantane oder momentane Nachgiebigkeit, im Fall der Dehnung als  $D_0$ , bezeichnet (s. Abb. D 7 a). Verläuft die über die Zeit aufgetragene Kriechfunktion bei konstanter Spannung  $\sigma_0$  gegen einen Grenzwert, spricht man von einem viskoelastischen Festkörper (s. Abb. D 7 Verlauf 1). Der Grenzwert wird im Fall der Dehnung als Gleichgewichts-Dehnnachgiebigkeit  $D_\infty$  bezeichnet. Ist die Kriechfunktion monoton steigend, spricht man von einer viskoelastischen (NEWTON'schen) Flüssigkeit (s. Abb. D 7 Verlauf 2).

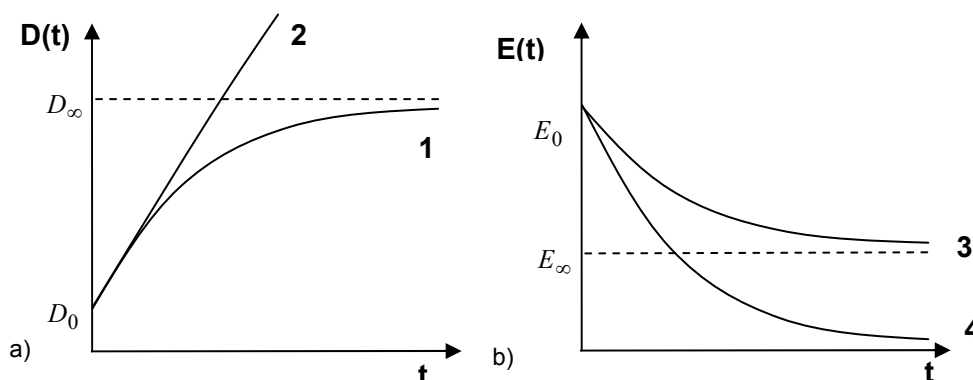


Abb. D 7 a) Retardationsfunktionen  $D(t)$ : Verlauf 1 (viskoelastischer Festkörper), Verlauf 2 (viskoelastische Flüssigkeit); Anfangs-Nachgiebigkeit  $D_0$ , Gleichgewichtsnachgiebigkeit  $D_\infty$ ; b) Relaxationsfunktionen  $E(t)$ : Verlauf 3 (viskoelastischer Festkörper) und Verlauf 4

### D 3.4.5 Relaxation (Spannungsrelaxation oder Entspannung)

Unter Spannungsrelaxation, im folgenden nur Relaxation genannt, versteht man die zeitliche Änderung der Spannung  $\sigma(t)$  bei festgehaltener Dehnung  $\varepsilon_0$ .

Sie kann für den Fall der Dehnung durch eine Relaxationsfunktion  $E(t)$  der Form

$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} \quad (\text{D 53})$$

aus Relaxationsversuchen gewonnen werden. Der beim Einspannen der Probe zum Zeitpunkt  $t = 0$  (oder durch eine plötzliche Dehnungsänderung) hervorgerufene Sprung wird als instantane oder momentane Elastizität  $E_0$  bezeichnet (s. Abb. D 7 b). Handelt es sich um einen viskoelastischen Festkörper, verläuft die über die Zeit aufgetragene Relaxationsfunktion gegen einen Grenzwert, der so genannten Gleichgewichts-Elastizität  $E_\infty$  (s. Abb. D 7 Verlauf 3). Geht sie gegen Null, handelt es sich - analog zur Retardation - um eine viskoelastische (NEWTON'sche) Flüssigkeit (s. Abb. D 7 Verlauf 4).

Mit Hilfe der o.g. Funktionen lässt sich das allgemeine Stoffgesetz der linearen Viskoelastizität angeben. Eine zum Zeitpunkt  $t = 0$  angelegte Spannung  $\sigma_0$  führt zum Dehnungsverlauf  $\varepsilon(t) = D(t)\sigma_0$ , eine aufgebrachte Dehnung  $\varepsilon_0$  zum Spannungsverlauf  $\sigma(t) = E(t)\varepsilon_0$ . Entsprechend folgen mit dem BOLTZMANN'schen Superpositionsprinzip für ein Spannungs- bzw. Dehnungsinkrement, das zum Zeitpunkt  $s$  aufgebracht wird, die Integrale:

$$\text{Retardation} \quad \varepsilon(t) = \int_{-\infty}^t D(t-s) \frac{d\sigma}{ds} ds \quad (\text{D 54})$$

$$\text{Relaxation} \quad \sigma(t) = \int_{-\infty}^t E(t-s) \frac{d\varepsilon}{ds} ds \quad (\text{D 55})$$

Die untere Grenze der Integrale ( $-\infty$ ) soll verdeutlichen, dass die Spannungs- bzw. Dehnungsgeschichte einen Einfluss auf das jeweilige Ergebnis hat.

Für den einachsigen Spannungszustand besteht zwischen Retardation (Kriechen) und Relaxation der folgende Zusammenhang

$$\frac{d}{dt} \int_0^t D(t-s) E(s) ds = 1 \quad (\text{D 56})$$

Die Relaxationsfunktion  $E(t)$  bildet also den reziproken Wert der Retardationsfunktion  $D(t)$ . In vielen Fällen können Retardation und Relaxation in Form von Potenzfunktionen approximiert werden:

$$\text{Retardation} \quad D(t) \approx \frac{1}{E(t)} \left[ 1 + \left( \frac{t}{\tau} \right)^\alpha \right] \quad (\text{D 57})$$



$$\text{Relaxation} \quad E(t) = \frac{1}{D(t)} \approx \frac{E}{1 + \left(\frac{t}{\tau}\right)^\alpha} \quad (\text{D } 58)$$

Der so genannte Kriechexponent  $\alpha < 1$  nimmt hierin häufig Werte kleiner 0,3 an. Sind zudem beide Funktionen im betrachteten Intervall nur gering veränderlich, können sie in Form einer so genannten elastischen Näherung durch folgende Gleichungen ausgedrückt werden [67]:

$$\text{Retardation:} \quad \varepsilon(t) \approx D(t)\sigma(t) \quad (\text{D } 59)$$

$$\text{Relaxation:} \quad \sigma(t) \approx E(t)\varepsilon(t) \quad (\text{D } 60)$$

Linear-viskoelastisches Verhalten liegt vor, wenn  $D(t)$  und  $E(t)$  nur Funktionen von Zeit und Temperatur sind, und nicht von der Spannungshöhe (bei der Retardation) bzw. Dehnungshöhe (bei der Relaxation) abhängen, also hierüber aufgetragen, linear sind. Die Linearität lässt sich z.B. anhand der aus Kriechversuchen gewonnenen Isochronen (Spannungs-Dehnungsdiagramm mit Kennlinien für  $t = \dots 10^0, 10^1, \dots, 10^5 \text{ h}$ ) überprüfen. Lineare Isochronen bedeuten eine von der Belastung unabhängige Kriechfunktion. Nach GROSS und MEHLHORN 1996 [67] ist das viskoelastische Verhalten für viele Werkstoffe nur im Bereich kleiner Dehnungen ( $\varepsilon < 0,5 \text{ bis } 1,0\%$ ) linear.

Aus dem Retardationsversuch kann auch der Kriechmodul  $E_C$  gewonnen werden. Er ist der Kehrwert der Dehnnachgiebigkeit  $D(t)$ . Bei reziprokem Zusammenhang zwischen Retardation- und Relaxation entspricht er auch der Relaxationsfunktion  $E(t)$ :

$$E_C(t) = \frac{1}{D(t)} = E(t) \quad (\text{D } 61)$$

Mit der Einführung europäischer Normen mit englischen Bezeichnungen wird die Nachgiebigkeit  $D(t)$  heute mit  $C(t)$  (engl.: compliance) bezeichnet.

### D 3.4.6 Rheologische Modelle

Zur Beschreibung des mechanischen Verhaltens von Polymeren bedient man sich so genannter rheologischer Modelle. Anhand dieser Modelle lassen sich Differentialgleichungen erstellen, mit denen das Verformungsverhalten mathematisch beschrieben werden kann.

Die Modelle basieren auf der Vorstellung, dass jeder viskoelastische Werkstoff aus festen und flüssigen Phasen besteht, und sein Verhalten durch die Parallel- bzw. Reihenschaltung mehrerer elastischer und viskoser Modellelemente beschrieben werden kann.

Das Verhalten eines ideal linear elastischen Festkörpers wird dabei durch ein HOOKE'sches Federelement, das Verhalten einer ideal viskosen Flüssigkeit durch einen NEWTON'schen Dämpfer modelliert.

Im folgenden werden die rheologischen Modelle, sowie die entsprechenden Spannungs-Zeit bzw. Dehnungs-Zeit-Diagramme, im Retardations- und Relaxationsversuch vorgestellt. Der hierin dargestellte Parameter  $t_0$  ist der Zeitpunkt der vollständigen Last- bzw. Dehnungsaufbringung.

### HOOKE'sche Feder

Die Feder gehorcht dem HOOKE'schen Gesetz (s. Abb. D 8). Die Spannung ist proportional zur Dehnung aber unabhängig von der Dehngeschwindigkeit. Die zugeführte Energie kann vollständig zurück gewonnen werden.

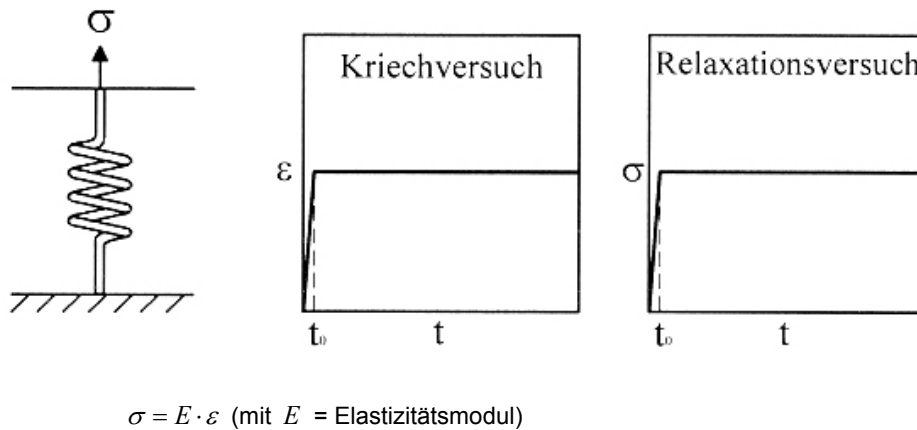


Abb. D 8 HOOKE'sche Feder (ideal elastischer Festkörper), HYING 2003 [84]

### NEWTON'scher Dämpfer

Der Dämpfer gehorcht dem NEWTON'schen Gesetz (s. Abb. D 9). Spannung bzw. Dehnung sind abhängig von der Dehngeschwindigkeit. Die zugeführte Energie wird vollständig dissipiert.

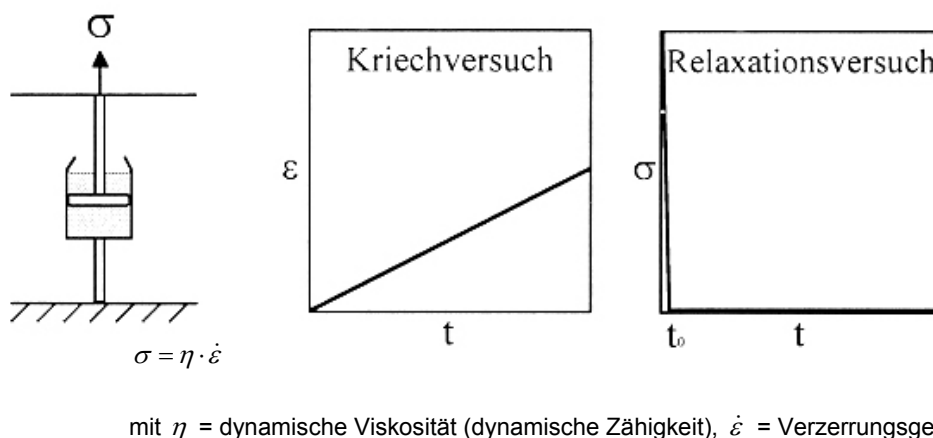


Abb. D 9 NEWTON'scher Dämpfer (ideal viskose Flüssigkeit), HYING 2003 [84]

### MAXWELL-Element

Schaltet man eine Feder und einen Dämpfer in Serie (Reihenschaltung), erhält man das MAXWELL-Element (s. Abb. D 10), auch MAXWELL-Körper genannt, der sowohl die Kriechfunktion für unbeschränktes Kriechen einer viskoelastischen Flüssigkeit (Funktion B in Abb. D 7 a) als auch den Vorgang der Relaxation (s. Abb. D 7 b) mit der Spannung  $\sigma_{(t=\infty)} = 0$  beschreibt. Mit der Gesamtdehnung  $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$  und der Spannung in Feder und Dämpfer  $\sigma = \sigma_1 = \sigma_2$  lautet die Zustandsgleichung des MAXWELL-Elementes (Index m):

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E_m} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta_m} \quad (D 61)$$

Mit  $\ln \sigma(t) = \ln \sigma_0 - \frac{t}{\tau}$  (D 62)

ergibt sich als werkstoffabhängige Zeitkonstante die so genannte Relaxationszeit  $\tau$  zu

$$\tau = \frac{\eta_m}{E_m} \quad (D 63)$$

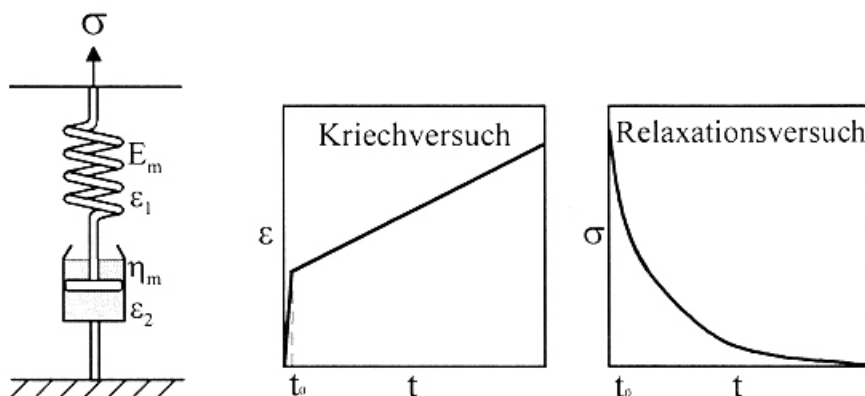


Abb. D 10 MAXWELL-Element, HYING 2003 [84]

Für den Fall konstanter Spannung  $\sigma_0$  ergibt sich die folgende Retardationsfunktion:

Retardation:  $E_m \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\sigma}{dt} + \frac{1}{\tau} \sigma$  bzw.  $E_m \dot{\varepsilon} = \dot{\sigma} + \frac{1}{\tau} \sigma$  (D 64)

Die Dehnung  $\varepsilon(t)$  und die Dehnnachgiebigkeit  $D(t)$  ergeben sich darin in Abhängigkeit der Relaxationszeit  $\tau$  als Funktionen, die den Vorgang des rein viskosen Kriechens (NEWTON) mit der Anfangs-Dehnnachgiebigkeit  $D_0 = \frac{1}{E_m}$  beschreiben.

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \frac{\sigma(t)}{\eta_m} \quad (D 65)$$

$$D(t) = D_0 + \frac{t}{\eta_m} \quad (D 66)$$

Für den Fall konstanter Dehnung  $\varepsilon_0$  ergibt sich die Relaxationsfunktion:

Relaxation: 
$$\frac{d\sigma}{\sigma} = -\frac{E_m}{\eta_m} dt \quad (D 67)$$

Die Spannung  $\sigma(t)$  und der Relaxationsmodul  $E(t)$  ergeben sich darin in Abhängigkeit von der Relaxationszeit  $\tau$  als mit der Zeit exponentiell auf Null abfallende Funktionen:

$$\sigma(t) = \sigma_0 e^{-t/\tau} \quad (D 68)$$

$$E(t) = E_0 e^{-t/\tau} \quad (D 69)$$

### VOIGT-KELVIN-Element

Schaltet man ein Feder- und ein Dämpferelement parallel, erhält man das VOIGT-KELVIN-Element, auch VOIGT-KELVIN-Körper genannt, (s. Abb. D 11), das die Kriechfunktion gegen die Gleichgewichtsnachgiebigkeit  $D_\infty$  beschreibt (s. Abb. D 7, Verlauf 1).

Die Relaxation ist mit ihm nicht darstellbar (sie reduziert sich zum HOOKE'schen Gesetz). Mit der Gesamtdehnung  $\varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_2$ , den Spannungsanteilen  $\sigma_1$  (Feder) und  $\sigma_2$  (Dämpfer) sowie den Moduln  $E_v$  (Feder) und  $\eta_v$  (Dämpfer) lautet die Zustandsgleichung des VOIGT-KELVIN-Elementes (Index v):

$$\sigma = E_v \varepsilon + \eta_v \frac{d\varepsilon}{dt} = E_v \varepsilon + \eta_v \dot{\varepsilon} \quad (D 70)$$

Mit der Gleichgewichts-Dehnnachgiebigkeit  $D_\infty = \frac{1}{E_v}$  und der Retardationszeit  $\tau = \frac{\eta_v}{E_v}$  ergibt sich die Kriechfunktion zu:

$$D(t) = D_\infty (1 - e^{-t/\tau}) \quad (D 71)$$

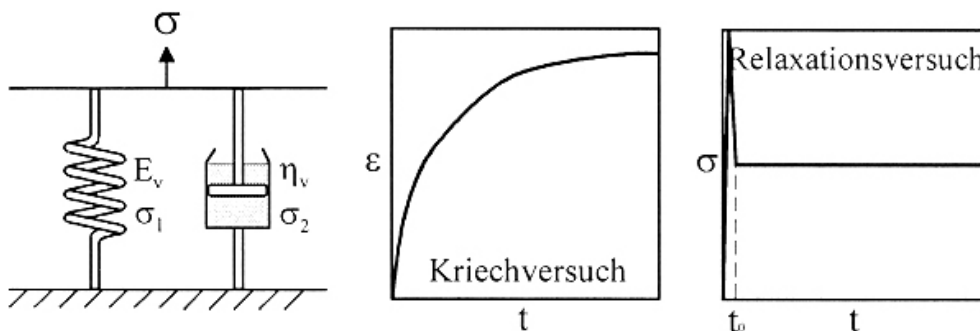


Abb. D 11 VOIGT-KELVIN-Element (viskoelastischer Festkörper), HYING 2003 [84]

**BURGER-Element (4-Parameter-Modell)**

Das VOIGT-KELVIN-Element kann die Retardation und das MAXWELL-Element die Relaxation wiedergeben. Keines der beiden Elemente kann aber sowohl die eine, als auch die andere Verhaltensweise beschreiben. Das 4-Parameter-Modell, das so genannte BURGER-Element (auch BURGERS-Modell, oder -Körper), basiert auf zwei Federn und zwei Dämpfern, die als Serienschaltung eines MAXWELL- und eines VOIGT-KELVIN-Elementes angeordnet werden. Es ist ein Modell, das alle drei Anteile der (zeitunabhängigen) elastischen, der viskoelastischen und der viskosen Dehnung von Polymerwerkstoffen im Kriech- und im Relaxationsversuch beschreiben kann (vgl. Abb. D 7). In dem in Abb. D 12 dargestellten Kriechversuch beobachtet man zunächst eine zeitunabhängige elastische Dehnung (a) gefolgt von einer zeitabhängigen Kriechdehnung (b), die schließlich in den Bereich der viskosen Fließdehnung (c) übergeht. Zum Zeitpunkt  $t = t_a$  wird die Belastung entfernt. Die nun einsetzende Rückverformung beginnt mit einer elastischen Rückdehnung (a'), die in eine viskoelastische Rückdehnung (Bereich b') übergeht. Es verbleibt eine irreversible (plastische) Dehnung (c'). Durch Kombination der Zustandsgleichungen für das MAXWELL- und das VOIGT-KELVIN-Element erhält man die Zustandsgleichung für das BURGER-Element, eine Differentialgleichung zweiter Ordnung. Diese liefert für die Dehnungen im Kriechversuch (Retardation) und im anschließenden Bereich der Kriecherholung (Rückverformung) folgende Gleichungen (MAXWELL-Element: Index m; VOIGT-KELVIN-Element: Index v):

Retardation: 
$$\epsilon = \frac{\sigma}{E_m} + \frac{\sigma}{\eta_m} t + \frac{\sigma}{E_v} (1 - e^{t/\tau}) \tag{D 72}$$

Relaxation: 
$$\epsilon = \frac{\sigma}{\eta_m} t + \frac{\sigma}{E_v} (1 - e^{t/\tau}) \cdot (1 - e^{-(t-t_a)/\tau}) \tag{D 73}$$

Es gelten die folgenden Gleichungen:

$$\epsilon_{ges} = a + b + c = a' + b' + c' = \epsilon_{el} + \epsilon_{v,el} + \epsilon_{v,pl} \tag{D 74}$$

$$\epsilon_{el} = \frac{\sigma}{E_m} \tag{D 75}$$

$$\epsilon_{v,el} = \frac{\sigma}{E_v} (1 - e^{-(t/\tau)}) \tag{D 76}$$

$$\epsilon_{v,pl} = \frac{\sigma}{\eta_m} t \tag{D 77}$$

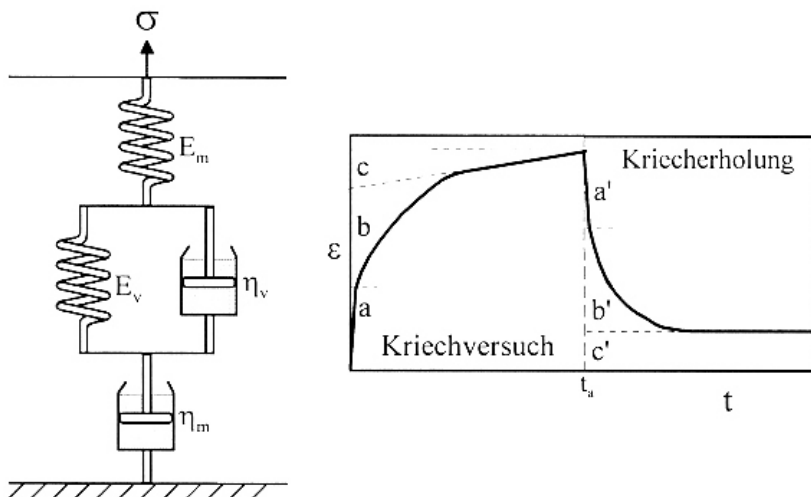


Abb. D 12  
BURGER-Element (4-Parameter-Modell):  
Bereiche a und a': elastisches Verhalten,  
Bereiche b und b': viskoelastisches Verhalten,  
Bereiche c und c': viskoses Verhalten,  
HYING 2003 [84]

### Generalisierte Modelle (Deformationsmodelle)

Das BURGER-Element liefert ein einfaches Modell, welches das Verhalten viskoelastischer Werkstoffe prinzipiell beschreibbar macht. Für die genaue Approximation eines realen Werkstoffes ist es nicht immer genau genug. Daher werden heute eine große Anzahl von MAXWELL- oder VOIGT-KELVIN-Elementen mit abgestuften Moduln parallel oder in Reihe geschaltet. Sie werden unter der Bezeichnung "Deformationsmodelle", "verallgemeinerte Modelle" oder "generalisierte Modelle" zusammengefasst (LEWEN 1991 [108]). Abb. D 13 zeigt die Prinzipien eines generalisierten MAXWELL-Modells (a) und eines generalisierten VOIGT-KELVIN-Modells (b).

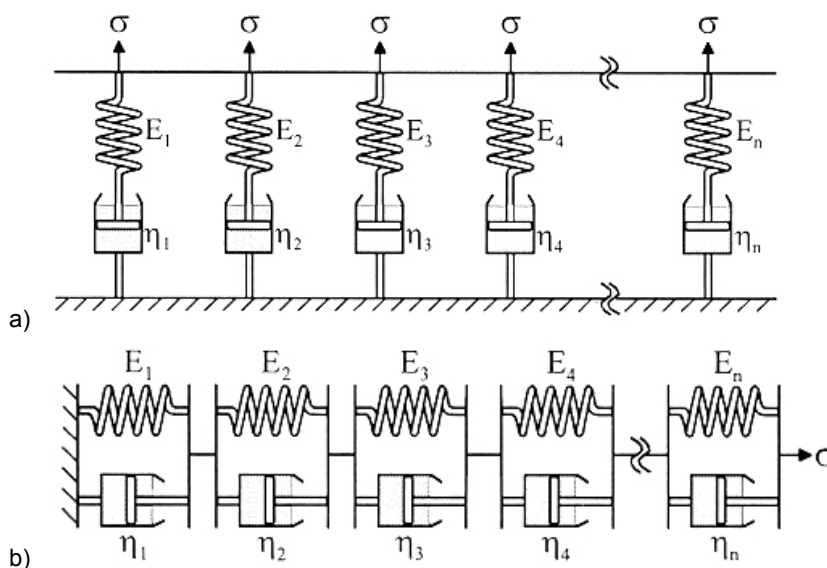


Abb. D 13 Prinzipien von verallgemeinerten Modellen (Deformationsmodellen): a) generalisiertes MAXWELL-Modell, b) generalisiertes VOIGT-KELVIN-Modell, HYING 2003 [84]

Nach Herleitung durch HYING 2003 [84] ergeben sich für die beiden generalisierten Modelle die folgenden Funktionen für Retardation und Relaxation bei Verwendung einer logarithmischen Zeitachse:

Relaxationsfunktion für das generalisierte MAXWELL-Modell:

$$E(t) = E_{\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} H(\tau) e^{-t/\tau} d \ln \tau \quad (D 78)$$

Retardationsfunktion für das generalisierte VOIGT-KELVIN-Modell:

$$D(t) = D_0 \int_{-\infty}^{+\infty} L(\tau) e^{-t/\tau} d \ln \tau + \frac{t}{\eta_0} \quad (D 79)$$

Hierin bedeuten: das Retardationszeitspektrum  $L(\tau) = \tau D(\tau)$  und das Relaxationszeitspektrum  $H(\tau) = \tau E(\tau)$ .

## Weitere Modelle

Amorphe Polymere mit thermorheologisch einfachem Verhalten lassen sich nach HYING 2003 [84] durch generalisierte Modelle gut approximieren, während teilkristalline Polymere ein komplizierteres Verhalten haben, was auch bislang weniger gut verstanden wird. Mit Verweis auf WORTMANN et. al. (1996 und 1999) und auf ARAKI (1965) können, HYING zufolge, thermorheologisch komplexe Polymere mit dem so genannten Zweikomponentenmodell (engl.: **Two Component-Model** oder **TC-Model**) beschrieben werden. Nach diesem Ansatz setzt sich der Relaxationsmodul  $E(t)$  aus einer zeitunabhängigen Gleichgewichtselastizität  $E_\infty$  und einer zeitabhängigen viskoelastischen Komponente zusammen. Des weiteren finden verschiedene Methoden und mathematische Funktionen bei der Beschreibung der Relaxationsfunktion Anwendung, z.B. das **Two-Process-Model** oder **TP-Model**, die **Summenfunktion der logarithmischen Normalverteilung (SLNV)** oder auch die **KOHLRAUSCH-WILLIAMS-WATTS-Funktion (KWW)**, eine empirisch gefundene, gestreckte Exponentialfunktion.

### D 4 Abgrenzung der Verhaltensbereiche

#### D 4.1 Definition der Kriechgrenze

Im folgenden wird ein Weg zur näherungsweise Ermittlung der Grenze, ab welcher die elastischen Dehnungen zeitabhängig sind, aufgezeigt. Das Verfahren definiert den Punkt der im Zugversuch ermittelten Spannungs-Dehnungsbeziehung, ab welchem die Dehnungen nicht mehr von der Zeit unabhängig sind. Dieser Grenzwert wird auch als Kriechgrenze bezeichnet. Abb. D 14 (a) zeigt die graphische Ermittlung (Näherungslösung) der Kriechgrenze für teilkristalline Thermoplaste im Spannungs-Dehnungsdiagramm. Abb. D 14 (b) zeigt das Querkontraktionszahl- Dehnungsdiagramm. Beide Diagramme basieren auf der wahren Längsdehnung  $\varepsilon_1$ .

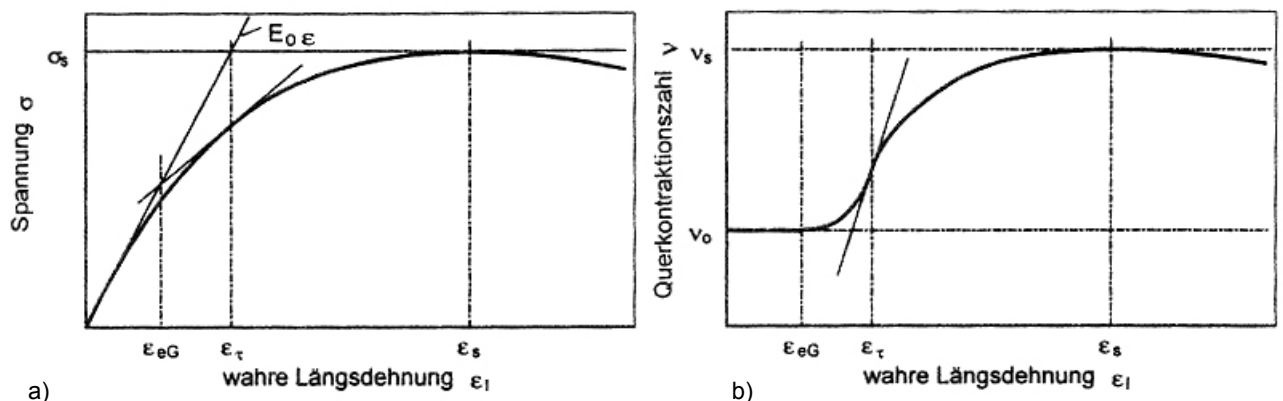


Abb. D 14 Kurzzeit-Zugversuch an teilkristallinen Thermoplasten: a) näherungsweise Ermittlung der Kriechgrenze im Spannungs-Dehnungsdiagramm; b) Querkontraktionszahl-Dehnungsdiagramm, jeweils basierend auf der wahren Längsdehnung  $\varepsilon_1$ ; DASSOW 1995 [39]

In Abb. D 14 (a) werden die Werte  $\varepsilon_{eG}$ ,  $\varepsilon_\tau$  und  $\varepsilon_S$  folgendermaßen ermittelt: Die Streckgrenze (Streckspannung  $\sigma_S$ ; engl.: yield stress  $\sigma_Y$ ) ergibt sich idealerweise durch eine horizontale Tangente der Spannungs-Dehnungsbeziehung. Sie definiert das Einsetzen großer (plastischer) Dehnungen (zunächst ohne eine Spannungssteigerung). Die Tangente an die Spannungs-Dehnungs-Kennlinie durch den Ursprung wird als HOOKE'sche Gerade ( $\sigma = E_0 \varepsilon$ ) aufgefasst. Der Schnittpunkt der HOOKE'schen Geraden mit der (horizontalen) Tangente durch die Streckgrenze definiert die so genannte Relaxationsdehnung  $\varepsilon_\tau$ . Bildet man nun die Tangente an die Spannungs-Dehnungs-Kennlinie durch den Kennlinienpunkt  $\varepsilon_\tau$ ,  $\sigma(\varepsilon_\tau)$ , so ergibt sich ein Schnittpunkt mit der HOOKE'schen Geraden. Dieser Schnittpunkt definiert die Dehnung  $\varepsilon_{eG}$ , die den zeitunabhängigen elastischen Dehnungsbereich vom zeitabhängigen viskoelastischen Dehnungsbereich abgrenzt. Der Punkt  $\varepsilon_\tau$ ,  $\sigma(\varepsilon_\tau)$  liegt etwa in der Mitte des viskoelastischen Verhaltensbereichs ( $\varepsilon_{eG}$  bis  $\varepsilon_S$ ), der auch Übergangsbereich genannt wird.

Zur Bestimmung der Kriechgrenze  $\varepsilon_{eG}$  (Grenzwert zwischen elastischem und viskoelastischem Bereich) kann auch die von ROBERTS 1988 [155] beschriebene Methode der Abweichung der Spannungs-Dehnungs-Kennlinie von einer Geraden herangezogen werden. Bei diesem Verfahren wird im Spannungs-Dehnungsdiagramm die Spannung logarithmisch aufgetragen. Nach DASSOW 1995 [39] zeigt ein Vergleich der nach ROBERTS ermittelten Grenzen gute Übereinstimmung mit den mittels Tangentenkonstruktion gewonnenen Werten. Auch zeigen theoretische und phänomenologische Betrachtungen an teilkristallinen Thermoplasten, dass die Querkontraktionszahl im elastischen Bereich konstant ist:  $\nu = \nu_0$ . Im viskoelastischen Bereich steigt sie bis zur Relaxationsdehnung  $\varepsilon_\tau$  zunächst langsam und dann sehr schnell an. Dort erreicht ihre Funktion einen Wendepunkt. Danach verlangsamt sich ihr Anstieg bis zum Maximum ( $\nu = \nu_S$ ) an der Streckgrenze (Streckdehnung  $\varepsilon_S$ ; engl.: yield strain  $\varepsilon_Y$ ). Bei Dehnungen oberhalb der Streckdehnung fällt die Querkontraktionszahl schließlich wieder etwas ab (s. Abb. D 14 b) und Gleichungen D 80 bis D 82):

$$\text{für } \varepsilon_1 \leq \varepsilon_{eG}: \quad \nu(\varepsilon_{el}) = \nu_0 = \text{const} \quad (\text{D 80})$$

$$\text{für } \varepsilon_{eG} < \varepsilon_1 \leq \varepsilon_S: \quad \nu_0 \leq \nu(\varepsilon_{v,el}) \leq \nu_S \quad (\text{D 81})$$

$$\text{für } \varepsilon_1 > \varepsilon_S: \quad \nu(\varepsilon_{v,pl}) \leq \nu_S \quad (\text{D 82})$$

In den beiden Diagrammen in Abb. D 14 wird die wahre Dehnung verwendet. Diese unterscheidet sich von der zumeist gemessenen technischen Dehnung. In Kapitel D 5 sind die beiden Dehnungen erläutert.



## D 4.2 Definition der Fließgrenze

Im idealisierten Fall elastisch plastischen Verhaltens träte im Versuch bei Überschreiten eines im Spannungs-Dehnungsdiagramm deutlich sichtbaren Knickes schlagartig Fließen ein, mit entsprechenden irreversiblen Verformungen nach der anschließenden Entlastung (s. Abb. D 5 e). Bei etlichen Materialien, insbesondere bei Kunststoffen, existiert keine exakt definierbare Fließgrenze, also eine Grenze zwischen elastischem und plastischem Verhalten (bzw. zwischen viskoelastischem und viskosem) Verhalten (s. Abb. D 5 f).

Vielmehr nehmen hier die reversiblen Dehnungsanteile in einem bestimmten Bereich zugunsten irreversibler Dehnungsanteile deutlich ab. Das Fließen beginnt lokal und breitet sich bei Laststeigerung über die Probe aus.

Bei Metallen ist dieses Verhalten zwar auch bekannt, aber zumeist viel weniger ausgeprägt, als bei den Kunststoffen. Mann bedient sich in solchen Fällen bestimmter charakteristischer Werte, um die jeweiligen Verhaltensweisen im einachsigen Zugversuch abzugrenzen, so z.B. beim Stahl der Streckgrenze, der Elastizitätsgrenze, der Proportionalitätsgrenze, der 0,1 %-Dehngrenze (technische Elastizitätsgrenze) und der 0,2 %-Dehngrenze (s. Abb. D 15).

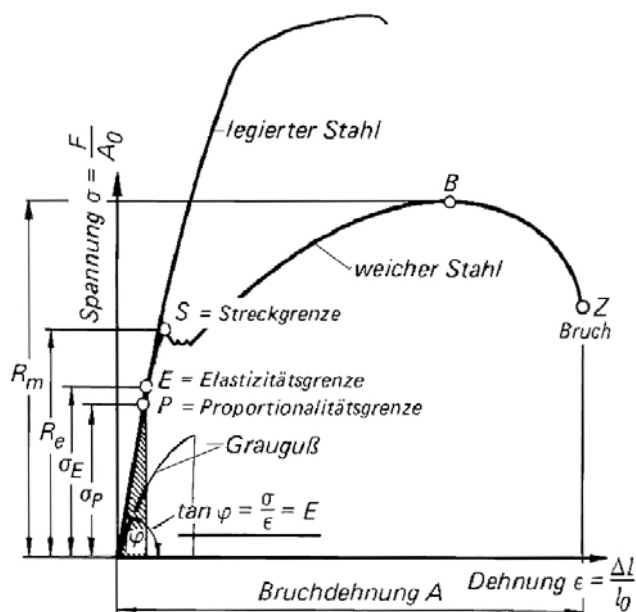


Abb. D 15 Spannungs-Dehnungs-Kennlinien verschiedener Stahllarten, einachsiger Zugversuch, NADLINGER 2006 [135]

Die **Streckgrenze  $R_e$**  wird durch den ersten Spannungswert, bei dem ein Zuwachs der Dehnung ohne Steigerung der Spannung auftritt, definiert. Bei Stahl (bei Zugbeanspruchung) wird die Streckgrenze als Fließgrenze angesetzt, obwohl bei einer anschließenden Entlastung von diesem Spannungsniveau auf Null eine irreversible Restdehnung verbleibt.

Die **Elastizitätsgrenze  $E$**  kennzeichnet den Punkt der Spannungs-Dehnungsbeziehung, bis zu welchem die Dehnung bei der Entlastung vollständig zurückgeht.

Die **Proportionalitätsgrenze  $P$**  kennzeichnet den Punkt der Spannungs-Dehnungsbeziehung, bis zu welchem die Dehnung proportional zur Spannung ist

(HOOKE'sche Gerade, linear elastisches Verhalten). Als charakteristischer Werkstoffkennwert findet sie heute keine Verwendung mehr. Proportionalitätsgrenze und Elastizitätsgrenze sind i.d.R. nicht identisch.

Die **0,1 %-Dehngrenze  $R_{p0,1}$**  (technische Elastizitätsgrenze) definiert den Punkt der Spannungs-Dehnungsbeziehung, bei welchem nach der Entlastung eine irreversible Restdehnung von 0,1 % der Ausgangslänge verbleibt. Sie wird im Spannungs-Dehnungsdiagramm durch eine zur HOOKE'schen Geraden parallele Gerade durch den Punkt (0,1 %, 0 N/mm<sup>2</sup>) konstruiert.

Die **0,2 %-Dehngrenze  $R_{p0,2}$**  definiert den Punkt der Spannungs-Dehnungsbeziehung, bei welchem nach der Entlastung eine irreversible Restdehnung von 0,2 % der Ausgangslänge verbleibt. Sie wird bei Werkstoffen, die keine ausgeprägte Streckgrenze aufweisen, als Fließgrenze definiert und analog zur 0,1 %-Dehngrenze konstruiert.

In Fällen ohne ausgeprägte Streckgrenze wird in der Prüfpraxis häufig ein Tangentenverfahren zur Definition einer (ideellen) Fließgrenze angewendet, bei dem die Ursprungstangente der Kennlinie, ggf. die HOOKE'sche Gerade, mit der Tangente des auf die Fließgrenze unmittelbar folgenden Bereichs zum Schnitt gebracht wird. Mit dem Schnittpunkt lässt sich die Fließgrenze näherungsweise beschreiben. Mit Bezug auf den Kurvenverlauf im Fließbereich (als Grundlage dieser Definition der Fließgrenze) seien folgende Hinweise gegeben:

- Ein Abfallen der Spannung oberhalb der Streckgrenze hat bei Polymeren i.d.R. prüftechnische Ursachen. Mit der Ermittlung von Spannungs-Dehnungs-Diagrammen auf der Basis wahrer Spannungen und Dehnungen konnte nach GRELLMANN 2005 [66] gezeigt werden, dass es sich bei derartigen Spannungsabfällen nur um einen Geometrieeffekt (Teleskopeffekt) handelt (s. Abb. D 16)

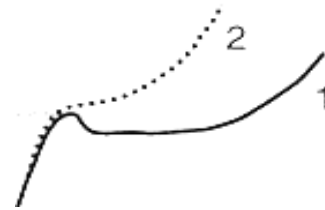


Abb. D 16 Typisches Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Polymeren: Kurve 1: scheinbarer Verlauf auf der Basis technischer Spannungen und Dehnungen; Kurve 2: wahrer Verlauf, GRELLMANN 2005 [66]

- Grundsätzlich ist jede Deformation eines Werkstoffs neben der Änderung des inneren Energiezustandes mit einer Erwärmung verbunden (die sich mittels Videothermographie darstellen lässt [66]). Insbesondere bei Fließvorgängen entsteht eine erhöhte Dissipation (Wärmefreisetzung). Somit verliert die Annahme einer konstanten Temperatur spätestens bei Fließeintritt des Probekörpers ihre Gültigkeit.

Aussagen zum Kurvenverlauf im plastischen Bereich bei konstanter Umgebungstemperatur sind daher mit großer Vorsicht vorzunehmen.

#### D 4.3 Definition der Bruchgrenze

Die Bruchgrenze wird bei den lediglich auf Zug beanspruchten dünnen Folien durch die Maximalwerte der Reißfestigkeit und der zugeordneten Dehnung (Reißdehnung) definiert.

**D 5 Wahre Dehnung, technische Dehnung, konstante Dehngeschwindigkeit**

Unter technischer Dehnung versteht man den Bezug der Längenänderung auf die Ausgangslänge des Probekörpers.

$$\text{Technische Dehnung: } \varepsilon = \int_{L_0}^{L_1} \frac{1}{L_0} dL = \frac{L_1 - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (\text{D 83})$$

Im Gegensatz dazu bezieht sich die wahre Dehnung nicht auf die Längenänderung  $L_1 - L_0$ , sondern auf die Längenänderung im Probekörper während des gemessenen Zeitintervalls:

$$\text{Wahre Dehnung: } \varphi = \int_{L_0}^{L_1} \frac{1}{L} dL = \ln\left(\frac{L_1}{L_0}\right) \quad (\text{D 84})$$

Der Zusammenhang zwischen technischer  $\varepsilon$  und wahrer Dehnung  $\varphi$  ergibt sich zu:

$$\varphi = \ln(\varepsilon + 1) \quad (\text{D 85})$$

Nach SCHMACHTENBERG 1985 [171] treten nennenswerte Abweichungen der Spannungs-Dehnungsbeziehung in Abhängigkeit von der verwendeten Dehnungsdefinition erst für große Dehngeschwindigkeiten (für Dehnungen  $\varepsilon > 10\%$ ) auf. Daher scheint der erhöhte versuchstechnische Aufwand beim Prüfen mit wahrer Dehngeschwindigkeit bei kleineren Dehnungen nicht vertretbar. Jedoch sollte bei Prüfungen oberhalb der Streckgrenze seiner Ansicht nach mit den wahren Dehnungen, den wahren Spannungen, d.h. bezogen auf den verformten Querschnitt, sowie mit einer konstanten Dehngeschwindigkeit gearbeitet werden.

Darüber hinaus kann die Abzugsgeschwindigkeit (Traversengeschwindigkeit) der jeweiligen Prüfeinrichtung von der technischen Dehngeschwindigkeit abweichen. Hierfür gibt es nach SCHMACHTENBERG drei Gründe:

- Durch die Geometrie des Probekörpers, z.B. bei Schulterproben (Probekörper-Typen 5 und 1 B nach DIN EN ISO 527-3 [N23], ergeben sich bei gleicher Belastung Bereiche mit unterschiedlichen Spannungen und, hieraus resultierend, unterschiedlichen Dehnungen und Dehngeschwindigkeiten.
- Durch Nachgiebigkeiten im Kraftmeßsystem und den Spannvorrichtungen liegt keine konstante Dehngeschwindigkeit des Probekörpers vor. Dies gilt um so mehr für biaxiale Prüfanordnungen, bei denen die Spanneinrichtungen Kräfte tangential zu den Spannköpfen übertragen können.
- Ein nichtlinearer Spannungsanstieg führt zu einer unterschiedlichen Verteilung der Dehnungen im Probekörper (bei steiferen Werkstoffen ggf. auch in den Einspannvorrichtungen).

Will man mit der wahren Dehngeschwindigkeit arbeiten und diese konstant halten, bedarf es einer geeigneten Mess- und Regeleinrichtung. Nach SCHMACHTENBERG hat der Zugversuch mit konstant gehaltener Dehngeschwindigkeit den gravierenden Vorteil gegenüber der Prüfung mit konstant gehaltener Abzugsgeschwindigkeit, dass sich die Messwertstreuungen in bemerkenswerter Weise reduzieren, da hierdurch eine konstante und reproduzierbare Beanspruchung im Probekörper erzeugt wird.

## D 6 Festigkeitshypothesen für Fließ- und Bruchbedingungen

### D 6.1 Allgemeines

Bei der Dimensionierung eines Bauteils im mehrachsigen Spannungszustand stellt sich die Frage, ob der Werkstoff für den jeweiligen Spannungszustand bereits die Kriechgrenze, die Fließgrenze oder die Bruchgrenze erreicht hat. Häufig lässt sich diese Frage nur schwer auf Anhieb beantworten.

Die Theorie der Festigkeitshypothesen beinhaltet mathematisch-physikalische Modelle zur Lösung dieser Fragestellungen. Das Ziel ist die Herstellung einer Beziehung zwischen mehrachsigen Spannungszuständen und einer rein rechnerischen Vergleichsspannung  $\sigma_V$ . Diese bietet ein eindimensionales Kriterium für das Erreichen eines bestimmten Zustands. Der jeweilige Zustand kann beispielsweise der Eintritt des Fließens oder des Bruches sein. Die Vergleichsspannung ermöglicht, den Ausnutzungsgrad bei einem mehrachsigen Spannungszustand durch Vergleich mit der aus einachsig untersuchten Proben ermittelten Fließ- oder Bruchgrenze für den jeweiligen Werkstoff anzugeben, was eine enorme Vereinfachung bei der Bemessung von Bauteilen bedeutet. Je nachdem, ob die Vergleichsspannung mit der Fließspannung  $\sigma_F$  (engl.:  $\sigma_Y$ ) oder der Bruchspannung  $\sigma_B$  verglichen wird, spricht man von einer Fließ- oder von einer Bruchhypothese.

Anders als beispielsweise bei metallischen Werkstoffen, ist das Verhalten der Polymere im baupraktischen Bereich zeit- und temperaturabhängig. Dies gilt auch für die Fließ- und die Bruchgrenze, und somit auch für die Vergleichsspannung. In Tab. D 1 (s. Kap. D 6.4) sind verschiedene Vergleichsspannungen, basierend auf den jeweiligen Festigkeitshypothesen, dargestellt.

### D 6.2 Fließbedingungen (Fließhypothesen)

Die Fließbedingung stellt eine mathematische Bedingung dafür dar, wann ein Werkstoff bei einem beliebigen ein- oder mehrachsigen Spannungszustand beginnt, plastisch zu fließen. Hierbei definiert die Fließfunktion  $k$  die Grenzfläche zwischen elastischem und plastischem Verhalten. Bei isotropem Werkstoffverhalten muss die Fließfunktion invariant gegen eine Koordinatentransformation sein. Basierend auf den Invarianten des Spannungstensors ergibt sich die Funktion  $k$  zu:

$$k = f(J_1, J_2, J_3) \quad (\text{D } 86)$$

Unter der Annahme der bei einigen Werkstoffen anzutreffenden Volumenkonstanz bei plastischer Verformung entfällt der hydrostatische Anteil des Spannungstensors. Nach Gleichung D 13 (a) ist die erste Invariante des Deviators  $J_1' = 0$ , so dass  $k$  als Funktion der beiden Invarianten des deviatorischen Anteils des Spannungstensors angegeben werden kann:

$$k = f(J_2', J_3') \quad (\text{D } 87)$$

Die Annahme der Volumenkonstanz führt im dreidimensionalen Raum der Hauptspannungen zu einem so genannten Fließkörper, der in Richtung der hydrostatischen Achse ausgerichtet ist. Die Fließfunktion bildet die Oberfläche dieses nach oben und unten geöffneten Körpers. Spannungszustände auf dieser Oberfläche bilden den Übergang zum plastischen Fließen.

In Abb. D 17 (a) ist der Fließkörper nach VON MISES, in Abbildung Abb. D 17 (b) der Fließkörper nach TRESKA, abgebildet.

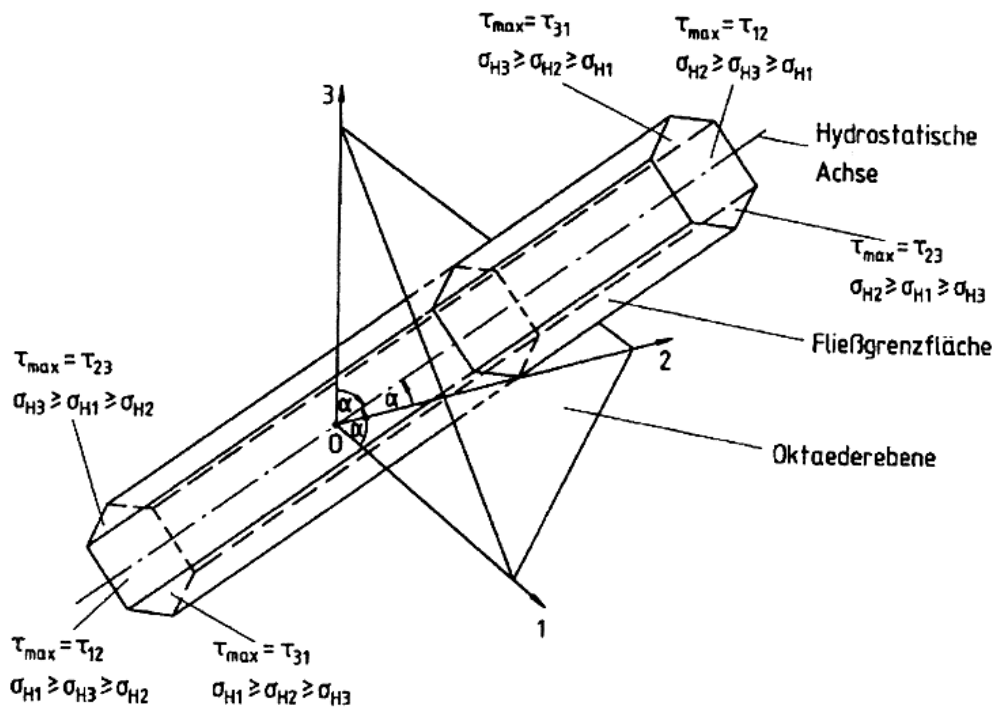
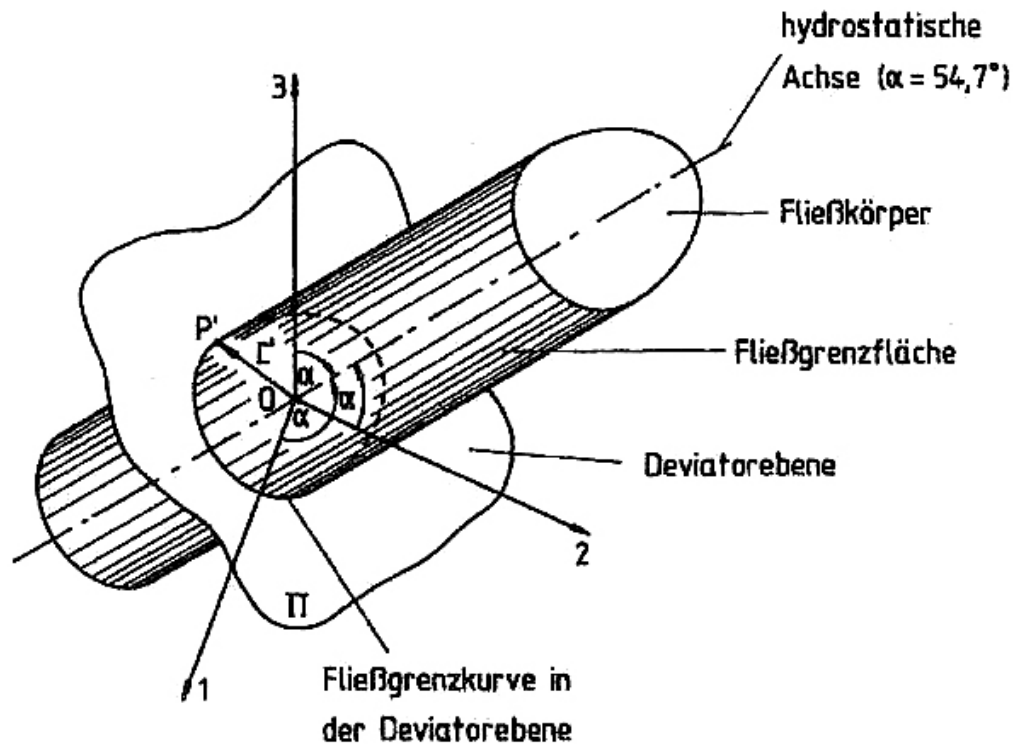


Abb. D 17 Fließkörper im dreidimensionalen Hauptspannungsraum  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  (hier bezeichnet mit 1, 2, 3): a) nach VON MISES; b) nach TRESKA; s. ISSLER, RUOSS und HÄFELE 1995 [88]

### D 6.2.1 Fließbedingung nach VON MISES (Gestaltänderungsenergiehypothese nach HUBER, MISES und HENCKY)

Unter der Annahme, dass der hydrostatische Anteil des Spannungstensors keinen Einfluss auf die Fließbedingung hat, tritt nach VON MISES plastisches Fließen ein, wenn die zweite Invariante  $J_2'$  des Spannungsdeviators den kritischen Wert  $k$  erreicht. Die VON MISES'sche Fließbedingung gründet auf der Gestaltänderungsenergiehypothese (GEH), da die hydrostatischen Spannungsanteile keinen Einfluss auf die Fließbedingung haben. Die Annahme, dass alleine der deviatorische Spannungsanteil für den Fließbeginn verantwortlich ist, bedeutet Volumenkonstanz bei der plastischen Verformung. Wird die VON MISES'sche Fließgrenzkurve für die Hauptspannungsebene  $\sigma_1, \sigma_2$  durch einen ebenen Schnitt des Fließkörpers erzeugt, ergibt sich die in Abb. D 18 dargestellte Ellipse. Hierin ist der Wert  $R_e$  die im einachsigen Zugversuch gemessene Fließspannung.

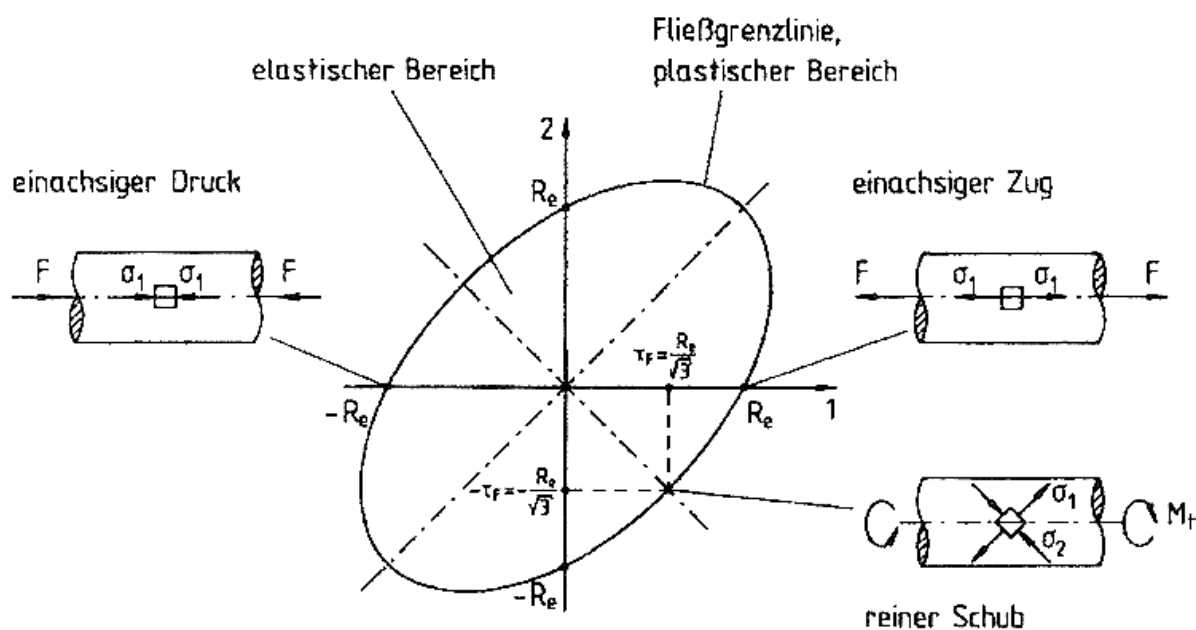


Abb. D 18 Fließgrenzlinie in der Hauptspannungsebene  $\sigma_1, \sigma_2$  (hier bezeichnet mit 1, 2): nach VON MISES;  $R_e$  = monoaxiale Fließspannung; ISSLER, RUOSS und HÄFELE 1995 [88]

Zur Auslegung von Bauteilen mit zähem Werkstoffverhalten, deren kritische Spannungen bezüglich des Fließbeginns für Zug- und Druckbeanspruchung gleich sind, wird i.d.R. die auf der Fließbedingung nach VON MISES aufbauende Gestaltänderungsenergiehypothese (GEH) nach HUBER, MISES und HENCKY verwendet (ISSLER, RUOSS und Häfele 1995 [88], s. auch Abb. D 19)

### D 6.2.2 Fließbedingung nach TRESKA (Schubspannungshypothese)

Nach TRESKA tritt plastisches Fließen ein, wenn die maximale Schubspannung  $\tau_{\max}$  den kritischen Wert  $\tau_F$  erreicht. Man nennt diese Fließbedingung daher auch die Schubspannungshypothese. Plastisches Fließen tritt nach der Schubspannungshypothese ein, sobald mindestens eine der drei Fließspannungen  $\tau_{F1}, \tau_{F2}, \tau_{F3}$  erreicht wird. Im Vergleich zur Fließbedingung nach VON MISES umschreibt die Fließbedingung nach TRESKA einen kleineren Bereich, und ist daher konservativer. Der Literatur zufolge, ist die Fließbedingung nach VON MISES eher bei zähen Werkstoffen zutreffend, während die Fließbedingung nach TRESKA eher bei spröden Werkstoffen anzuwenden ist.

Bei Achsensymmetrie der Fließpunkte zur Winkelhalbierenden des I und III Quadranten folgt isotropes Werkstoffverhalten, bei Achsensymmetrie zur Winkelhalbierenden des II und IV Quadranten folgt gleiches Werkstoffverhalten für die Fließbedingung unter Druck- und Zugbeanspruchung (s. Abb. D 19).

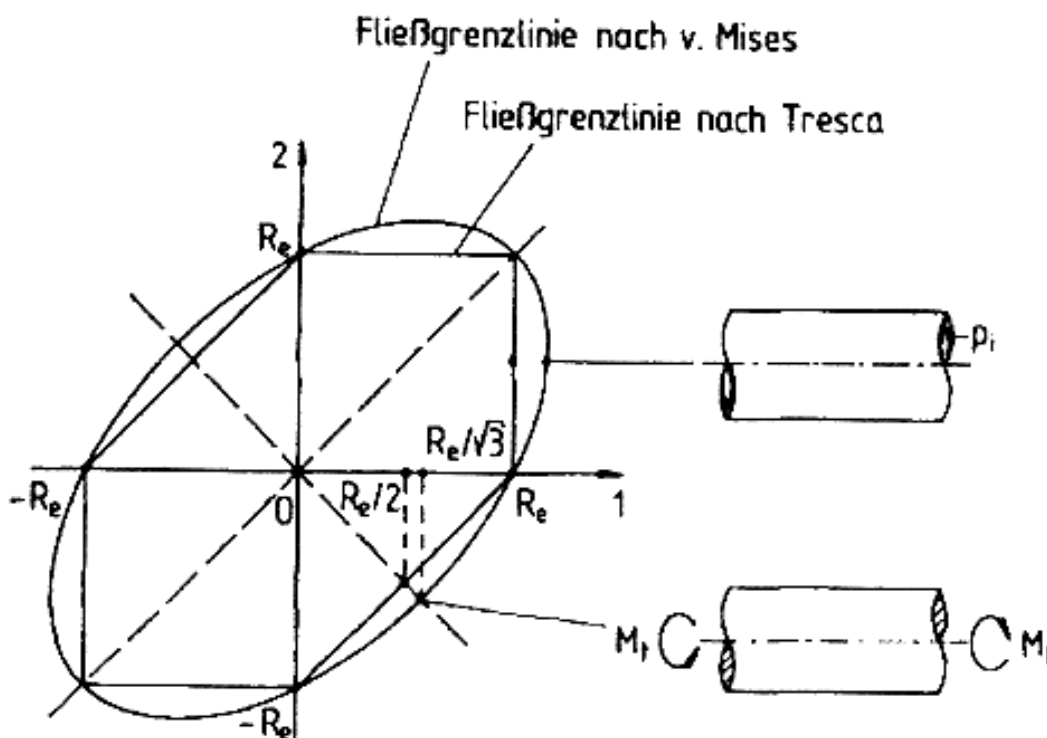


Abb. D 19 Vergleich der Fließgrenzlinien nach VON MISES und nach TRESKA in der Hauptspannungsebene; ISSLER, RUOSS und HÄFELE 1995 [88]

## D 6.3 Bruchbedingungen (Bruchhypothesen)

### D 6.3.1 Allgemeines

Wesentliche Kriterien zur Beurteilung eines Bruches sind die Höhe der den Bruch auslösenden Belastung, die vorhergehende Verformung und sein Entstehungsort im Bauteil. Man unterscheidet spröde von zähen Brüchen. Beim spröden Bruch tritt keine oder nur eine geringe plastische Verformung bis zum Brucheintritt auf. Ein Spröbruch kann aber auch eintreten, wenn das Fließen durch einen mehrachsigen Spannungszustand verhindert wird. Im Gegensatz dazu ist der zähe (duktile) Bruch im Normalfall mit großen Verformungen verbunden.

Die Bruchmechanik beschreibt den Bruch als einen, aus mehreren Stadien bestehenden, Prozess. Er beginnt mit der Rissbildung in einem bis dahin rissfreien Bereich, und endet – wenn er nicht aufgefangen oder arretiert wird - nach der Rissausbreitung schließlich im tatsächlichen Bruch des Körpers. Man differenziert zwischen einer stabilen und einer instabilen Rissausbreitung. Die stabile Rissausbreitung erfolgt relativ langsam unter ständigem Energieverbrauch und führt zu einem makroskopischen Zähbruch durch Bildung oder Vereinigung von Hohlräumen vor der Risspitze. Ein Kriechbruch stellt einen sehr langsamen Prozess der stabilen Rissausbreitung dar. Die instabile Rissausbreitung erfolgt bei ständiger Energiefreisetzung (Dissipationswärme) mit hoher Geschwindigkeit und führt zu einem makroskopischen Spröbruch. Sie kann mit oder ohne vorherige stabile Rissausbreitung auftreten.

Bei vielen amorphen und teilkristallinen Thermoplasten treten bei hohen Dehnungen zunächst Scherbänder oder Mikrorisse (Crazing, Kavitation) auf, die durch stark verstreckte, parallel zur Beanspruchungsrichtung orientierte, Molekülketten erzeugt werden (s. Abb. D 20). Bei Zunahme der Dehnungen kommt es schließlich zur Rissbildung durch Zerstörung der Fibrillen zwischen den Hohlräumen.

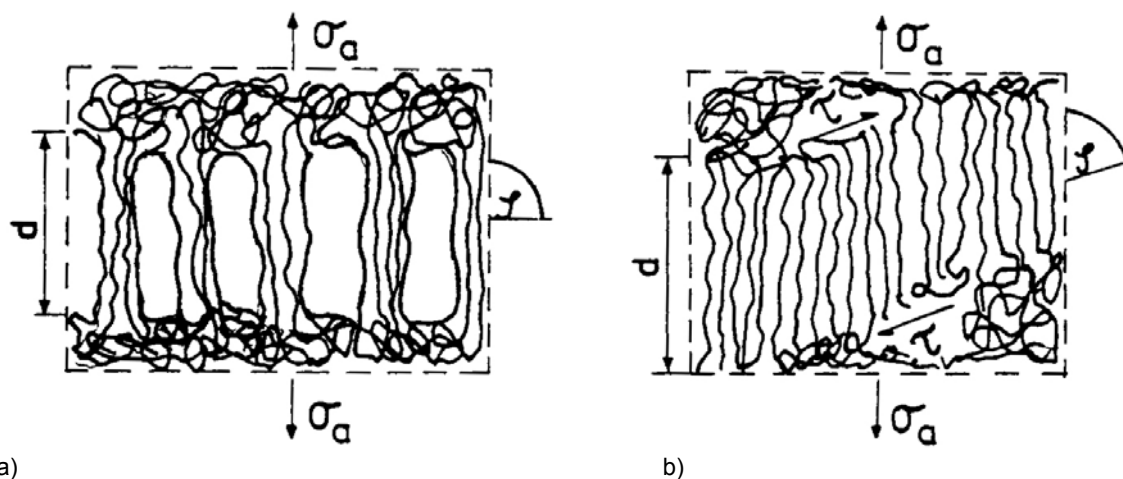


Abb. D 20 Schematische Darstellungen anisotroper Deformationen in der amorphen Phase:  
 a) Craze ( $\varphi \cong 90^\circ$ ,  $d \cong 0,05 - 10 \mu\text{m}$ , Dichteänderung bis 40 Prozent)  
 b) Scherbänder ( $\varphi \cong 30 - 45^\circ$ ,  $d \cong 500 \text{ nm} - 1 \text{ mm}$  (Mikro- oder Makroscherbänder) Dichteänderung nur wenige Prozent); SCHMIEDEL 1992 [174]



Wie bei der Definition der Fließbedingung greift man auch in Bezug auf die Bruchbedingung auf Festigkeitshypothesen zurück. Neben der Gestaltänderungsenergiehypothese nach VON MISES, HUBER und HENCKY und der Schubspannungshypothese nach TRESCA, wird hier die Normalspannungshypothese als dritte Hypothese kurz vorgestellt.

### D 6.3.2 Normalspannungshypothese

Die Normalspannungshypothese wird häufig als Bruchbedingung für sprödes Verhalten benutzt. Sie besagt, dass der Bruch unabhängig von allen anderen Spannungen durch die größte Normalspannung ausgelöst wird. Dies ist im räumlichen Spannungsraum die größte der drei Hauptspannungen (s. Abb. D 21), definitionsgemäß also  $\sigma_1$ . Nach der Normalspannungshypothese bildet bei Zugbeanspruchung die einaxiale Zugfestigkeit, bei Druckbeanspruchung die einaxiale Druckfestigkeit des Werkstoffes die Bruchgrenze.

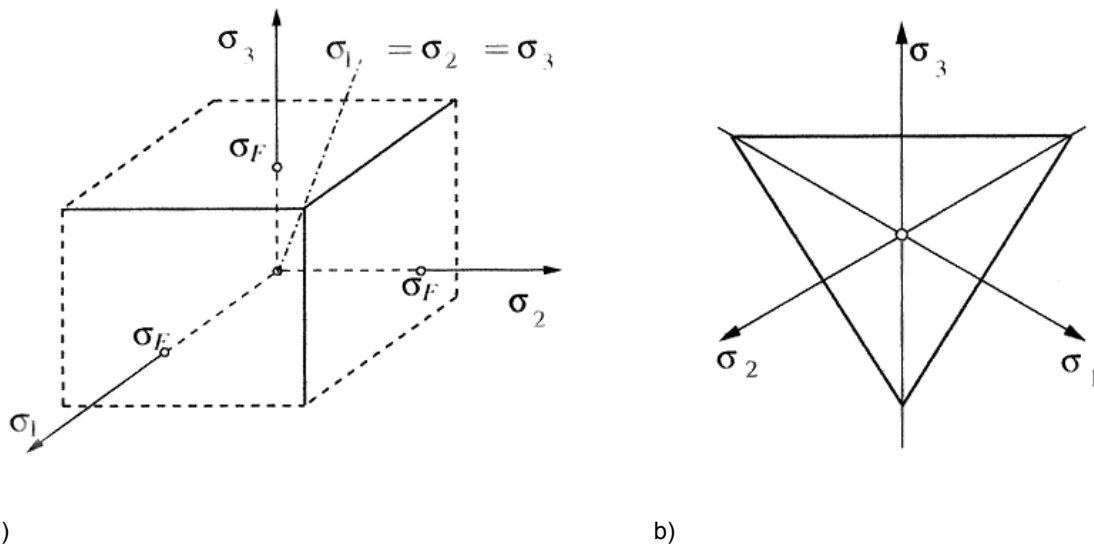


Abb. D 21 Bruchgrenzfläche nach RANKINE a) im dreidimensionalen Hauptspannungsraum  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ; b) in der deviatorischen Ebene; N.N. Mechanik Skript FHBB, 2006 [54]

### D 6.4 Überblick der bekannten Festigkeitshypothesen

Die o.g. Festigkeitshypothesen führen zu entsprechenden Vergleichsspannungen  $\sigma_V$ , deren Überschreitung bei elastisch-plastischem Werkstoffverhalten zu Fließen bzw. zum Bruch führt. Mit der Vergleichsspannung wird also der Spannungstensor auf einen eindimensionalen Wert überführt, der die Bedingung für den Eintritt des jeweiligen Fließ- oder Bruchzustandes darstellt.

In Tab. D 1 sind Formeln der Normalspannungshypothese (NH), der Schubspannungshypothese (SH) und der Gestaltänderungsenergiehypothese (GEH) für den einachsigen und den ebenen Spannungszustand zusammengestellt (JAHR, 2006 [89]).

Festigkeits- hypothese	Einachsiger Spannungszustand		Zweiachsiger Spannungszustand		
	allgemeine Richtung	Hauptspannungs- richtung	allgemeine Richtung	Hauptspannungsrichtung	reiner Schub
	$\sigma_x, \tau_{xy}$	$\sigma_1$	$\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$	$\sigma_1, \sigma_2$	$\tau_{xy,max}$
größte Normalspannung <b>NH</b>	$\sigma_V = \frac{1}{2} \sigma_x  + \frac{1}{2}\sqrt{\sigma_x^2 + 4\tau_{xy}^2}$	$\sigma_V =  \sigma_1 $	$\sigma_V = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}$	$\sigma_V = \max( \sigma_1 ,  \sigma_2 )$	$\sigma_V = \tau_{xy,max}$
größte Schubspannung <b>SH</b>	$\sigma_V = \sqrt{\sigma_x^2 + 4\tau_{xy}^2}$	$\sigma_V =  \sigma_1 $	$\sigma_V = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}$ für $\sigma_1 \geq 0, \sigma_2 \geq 0, \sigma_3 = 0$ $\sigma_V = \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}$ für $\sigma_1 \geq 0, \sigma_2 \leq 0, \sigma_3 = 0$ $\sigma_V = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) - \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}$ für $\sigma_1 \leq 0, \sigma_2 \leq 0, \sigma_3 = 0$	$\sigma_V = \max( \sigma_1 ,  \sigma_2 )$ für $\text{sign}(\sigma_1) = \text{sign}(\sigma_2)$  $\sigma_V =  \sigma_1 - \sigma_2 $ für $\text{sign}(\sigma_1) \neq \text{sign}(\sigma_2)$	$\sigma_V = 2 \tau_{t,max}$
größte Gestalt- änderungsenergie <b>GEH</b>	$\sigma_V = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2}$	$\sigma_V =  \sigma_1 $	$\sigma_V = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2}$	$\sigma_V = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2}$	$\sigma_V = \sqrt{3} \tau_{xy,max}$

Tab. D 1 Vergleichsspannung  $\sigma_V$  für Gestaltänderungsenergie-, Schubspannungs- und Normalspannungshypothese, JAHR 2006 [89]

Es sind folgende Festigkeitshypothesen bekannt (nach KARA 2005 [91]):

1. Normalspannungs-Hypothese
2. Normaldehnungs-Hypothese
3. Schubspannungs-Hypothese (TRESKA)
4. Schubdehnungs-Hypothese
5. Hypothese der Gesamtbelastungsenergie
6. Hypothese der Gestaltänderungsenergie (HUBER-MISES-HENCKY)
7. Hypothese der gespeicherten Gestaltänderungsenergie (REINER und WEISSENBERG)

Nach KARA 2005 [91] beinhaltet nur die Theorie der gespeicherten Gestaltänderungsenergie von REINER und WEISSENBERG 1939 [149] eine Zeitabhängigkeit. Sie besagt, dass das Versagen vom Erreichen eines kritischen Wertes der gespeicherten Gestaltänderungsenergie abhängt und damit ein zeitliches Phänomen ist. Diesbezüglich sei auf die in KARA 2005 [91] aufgeführte umfangreiche Literatur verwiesen. Bei viskoelastischen Werkstoffen wird demnach keine der Hypothesen 1 bis 6 eine – in Hinblick auf den zeitlichen Einfluss - befriedigende Fließ- oder Bruchbedingung für ETFE-Folie liefern können. Es sei angemerkt, dass für die Fließbedingung nicht dieselbe Hypothese gelten muss, wie für die Bruchbedingung.

## D 7 Zeit-Temperatur-Verschiebungsprinzip (ZTV)

Bei Polymeren, und so auch bei ETFE, ist das mechanische Verhalten stark von der Temperatur und der Zeit abhängig. Phänomenologisch betrachtet, kann dies damit begründet werden, dass die Umlagerung eines Kettensegmentes, einer Seitengruppe oder einer ganzen Kette eine bestimmte Zeit braucht. Die molekularen Relaxationsvorgänge laufen mit ansteigender Temperatur schneller ab, d.h. das Relaxationszeitspektrum verschiebt sich in Richtung kürzerer Relaxationszeiten.

Zur quantitativen Erfassung des Zusammenhangs von Zeit und Temperatur wird die von EYRING entwickelte Theorie der Reaktionsgeschwindigkeit auf der Basis einer ARRHENIUS Gleichung verwendet (MENGES, HABERSTROH, MICHAELI und SCHMACHTENBERG 2002 [111]):

$$\text{ARRHENIUS-Gleichung:} \quad \log a_T = \log \left( \frac{t}{t_{ref}} \right) = k \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \quad (\text{D 88})$$

In der Gleichung bedeutet  $t / t_{ref}$  [-] die Zeitraffung einer Reaktion durch die Änderung der Bezugstemperatur  $T_{ref}$  [K] auf die Temperatur  $T$  [K]. Die ARRHENIUS-Konstante  $k$ , ebenfalls in Kelvin, ist ein Werkstoffkennwert, der sich aus der allgemeinen Gaskonstanten, der Aktivierungsenergie für den betrachteten Prozess, und einem Umrechnungsfaktor vom natürlichen auf den Zehnerlogarithmus zusammensetzt.

Wendet man die Zeit-Temperatur-Verschiebung nicht auf die Zeit selbst, sondern auf die zeitabhängige Dehngeschwindigkeit an, ergibt sich analog zu Gleichung D 88 die folgende Beziehung:

$$\log a_T = \log \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{ref}} = k \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \quad (\text{D 89})$$

Durch Anwendung des **Zeit-Temperatur-Verschiebungsprinzips** (ZTV) (engl.: **time-temperature shift-principle** (TTS)) lassen sich Temperatureinflüsse durch eine Änderung des Zeitmaßstabes darstellen und umgekehrt. In Kenntnis der werkstoffabhängigen Beziehung zwischen Zeit und Temperatur kann durch Vergleich einer Bezugskurve mit einer Kurve bei geringerer Temperatur und gleicher Dehngeschwindigkeit (wie die Bezugskurve), eine entsprechende Kurve bei erhöhter Dehngeschwindigkeit und gleicher Temperatur (wie die Bezugskurve) abgeleitet werden. Desgleichen gilt auch umgekehrt. Das Prinzip wird dazu genutzt, aus Kurzzeitversuchen bei hohen Temperaturen Vorhersagen für lange Belastungszeiträume oder geringe Dehngeschwindigkeiten zu gewinnen.

Infolge der Verschiebung des Relaxationszeitspektrums mit der Temperatur verschieben sich auch die Kurven der viskoelastischen Kenngrößen - bei amorphen Polymeren parallel zur logarithmischen Zeitachse - ohne dabei ihre Form zu verändern. Eine derartige Beziehung mit dem Verschiebungsfaktor  $\log a_T$  wird als "thermorheologisch einfach" (engl.: **thermorheological simple** (TRS)) bezeichnet. Eine empirische Beschreibung des Verschiebungsfaktors  $\log a_T$  oberhalb der Glasübergangstemperatur für amorphe Polymere liefert die **WILLIAMS-LANDEL-FERRY-Gleichung** (WLF-Gleichung) (HYING 2003 [84]):

$$\log a_T = \frac{-c_1(T - T_{ref})}{c_2(T - T_{ref})} \quad (\text{D 90})$$

bzw. 
$$T = T_{ref} + \frac{c_2 \log a_T}{c_1 - \log a_T} \quad (\text{D 91})$$

Die hierin enthaltenen Werkstoffkonstanten  $c_1, c_2$  werden durch Versuche bestimmt. Die WLF-Gleichung gilt für amorphe Thermoplaste im Bereich zwischen der Glasübergangstemperatur  $T_g$  bis  $T_g + 100 \text{ K}$  (SCHMIEDEL 1992 [174]). Sie liefert beispielsweise für

für  $T_{ref} = T_g$  :  $c_1 = 17,44$  und  $c_2 = 51,60$  (D 92 a)

für  $T_{ref} = T_g + 45 \text{ K}$  :  $c_1 = 8,86$  und  $c_2 = 101,6$  (D 92 b)

Ist zur o.g. horizontalen Verschiebung eine zusätzliche vertikale Verschiebung der Bezugskurve erforderlich, spricht man von thermorheologisch komplexem Verhalten (engl.: **thermorheological complex** (TRC)). Teilkristalline Thermoplaste gehören zu dieser Gruppe (Hying 2003 [84]). Bei den komplexen Polymerwerkstoffen wird die am Institut für **Kunststoffverarbeitung** (IKV) der RWTH Aachen entwickelte numerische Simulationsmöglichkeit mit dem Programm PRO-SIM (Version 2.0, 1995) angewendet (MICHAELI und GLISSMANN 2001 [209]).

Nach SCHMIEDEL 1992 [174] ergibt die Änderung der Deformationszeit um den Faktor 10 eine Verschiebung der Glasübergangstemperatur um etwa 3 bis 7 Kelvin. MICHAELI, BRINKMANN und LESSENICH-HENKYS 1995 [116] nennen als allgemeine Faustregel, dass eine Veränderung der Temperatur um 10 Kelvin eine Zeitdehnung bzw. Zeitraffung

etwa um den Faktor 10 bewirkt und umgekehrt. Wenn die letztgenannte Faustregel auch für den teilkristallinen Thermoplastwerkstoff ETFE zuträfe, würde beispielsweise ein Versuch bei einer Dehngeschwindigkeit  $\dot{\epsilon}_{Prüf} = 100 \% / \text{min}$  und einer Prüftemperatur  $T_{Prüf} = +23^{\circ}\text{C}$  auf das Verhalten bei einer Belastungsgeschwindigkeit  $\dot{\epsilon}_{in situ} \cong 1 \% / \text{min}$  und einer Temperatur  $T_{in situ} \cong +3^{\circ}\text{C}$  schließen lassen, und umgekehrt. Dies bedeutet auch, dass man für die Herleitung einer Fließbedingung bzw. einer Vergleichsspannung aus dem Vergleich von Biaxialversuchen mit Monoaxialversuchen bei gleicher Temperatur zunächst einmal die ggf. unterschiedlichen Dehngeschwindigkeiten ins Verhältnis setzen muß. Es bedeutet letztlich auch, dass man mit einer Versuchsreihe im Temperaturbereich zwischen  $-25^{\circ}\text{C}$  und  $+35^{\circ}\text{C}$  mit einer einzigen Dehngeschwindigkeit der Größenordnung  $\dot{\epsilon}_{Prüf} \cong 10 \% / \text{min}$ , die mit den Prüfungen getestete Werkstoffeigenschaft in einem Dehngeschwindigkeitsfenster zwischen  $\dot{\epsilon} \approx 10^{-5}$  bis  $10^{+7} \% / \text{min}$  deuten könnte. Die Faustregel nach MICHAELI, BRINKMANN und LESSENICH-HENKYS 1995 [116] wurde in Tab. D 2 angewendet.

		entspricht nach Faustregel näherungsweise der Dehngeschwindigkeit $\dot{\epsilon}_{in situ}$ :			
Prüfgeschwindigkeit $\dot{\epsilon}_{Prüf} [\% / \text{min}]$	Prüftemperatur $T_{Prüf} [^{\circ}\text{C}]$	$\dot{\epsilon}_{(-25^{\circ}\text{C})}$	$\dot{\epsilon}_{(0^{\circ}\text{C})}$	$\dot{\epsilon}_{(+25^{\circ}\text{C})}$	$\dot{\epsilon}_{(+35^{\circ}\text{C})}$
		[% / min]	[% / min]	[% / min]	[% / min]
<b><math>1 \times 10^1</math></b>	<b>- 25° C</b>	<b><math>1 \times 10^1</math></b>	$\sim 5 \times 10^3$	$\sim 1 \times 10^6$	$\sim 1 \times 10^7$
	<b>0° C</b>	$\sim 5 \times 10^{-2}$	<b><math>1 \times 10^1</math></b>	$\sim 5 \times 10^3$	$\sim 5 \times 10^4$
	<b>+ 25° C</b>	$\sim 1 \times 10^{-4}$	$\sim 5 \times 10^{-2}$	<b><math>1 \times 10^1</math></b>	$\sim 1 \times 10^2$
	<b>+ 35° C</b>	$\sim 1 \times 10^{-5}$	$\sim 5 \times 10^{-3}$	$\sim 1 \times 10^0$	<b><math>1 \times 10^1</math></b>

Tab. D 2 Zeit-Temperatur-Verschiebungsprinzip: Anwendung der Faustregel von MICHAELI, BRINKMANN und LESSENICH-HENKYS 1995

HABERSTROH und GRAMBOW 2001 [65] und 2002 [72] beschreiben die Anwendung des Zeit-Temperatur-Verschiebungsprinzips am Beispiel gummielastischer Werkstoffe. Darin wird deutlich, dass es nicht nur auf einzelne Kenngrößen, sondern zumindest auch auf die Spannungs-Dehnungs-Linie bis zur Fließgrenze anwendbar ist (s. Abb. D 22).

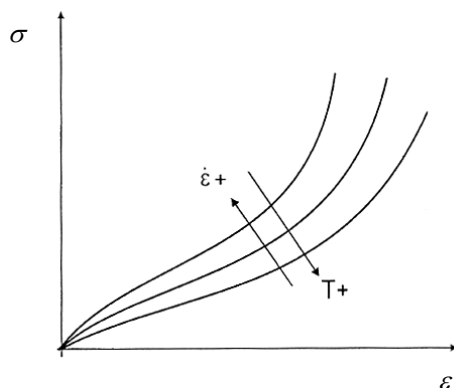


Abb. D 22

Zeit-Temperatur-Verschiebungsprinzip (ZTV)  
(engl.: time-temperature shift principle - TTS)  
am Beispiel von Spannungs-Dehnungs-  
Kennlinien eines gummielastischen Werkstoffes,  
HABERSTROH und GRAMBOW 2002 [72]

### D 8 BOLTZMANN'sches Superpositionsprinzip

Das BOLTZMANN'sche Superpositionsprinzip erlaubt die additive Überlagerung einzelner Verformungsanteile (s. Abb. D 23). Es gilt nur im linearen Bereich der Spannungs-Dehnungsbeziehung. Bei einer Anwendung darüber hinaus, ergeben sich mit zunehmender Beanspruchung Abweichungen. Das Prinzip besagt:

- Führt die Dehnung  $\varepsilon_{10}(t)$  zur Spannung  $\sigma_1(t)$  und die Dehnung  $\varepsilon_{20}(t)$  zur Spannung  $\sigma_2(t)$ , dann ruft die Summe der Dehnungen  $\varepsilon_{10}(t) + \varepsilon_{20}(t)$  die Gesamtspannung  $\sigma_1(t) + \sigma_2(t)$  hervor, s. Abb. D 23 (a).
- Führt die Spannung  $\sigma_{10}(t)$  zur Dehnung  $\varepsilon_1(t)$  und die Spannung  $\sigma_{20}(t)$  zur Dehnung  $\varepsilon_2(t)$ , dann ruft die Summe der Spannungen  $\sigma_{10}(t) + \sigma_{20}(t)$  die Gesamtdehnung  $\varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t)$  hervor, s. Abb. D 23 (b).

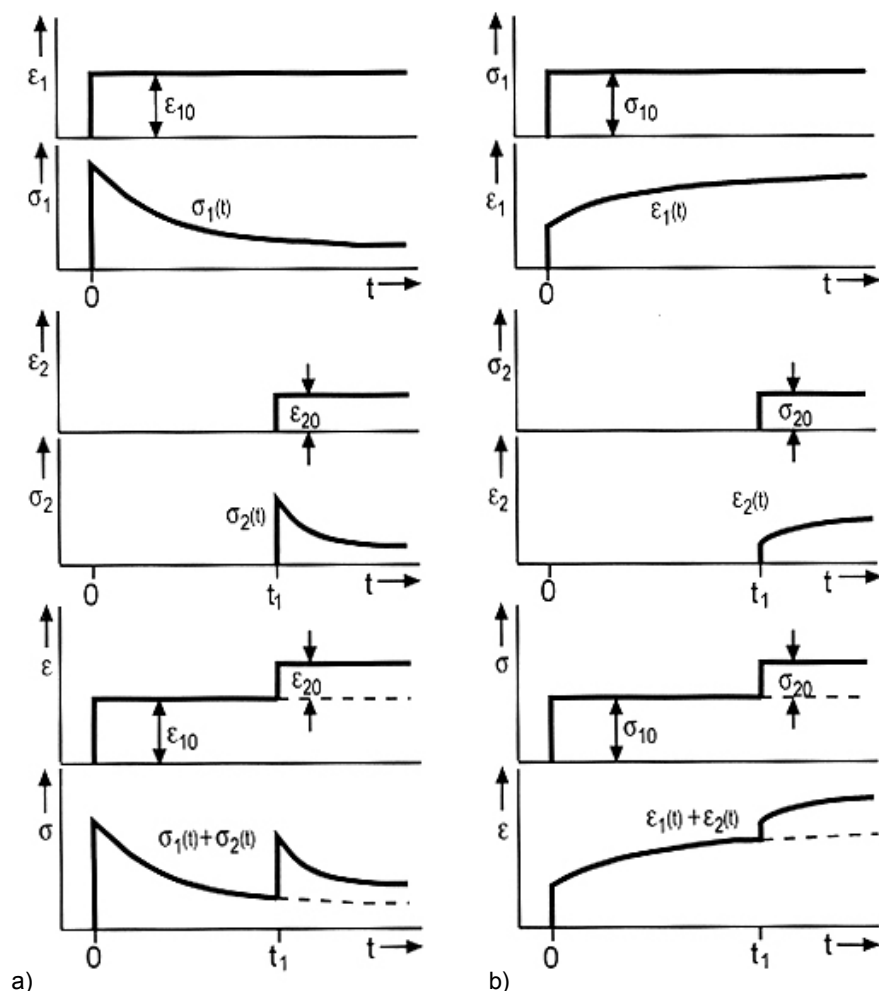


Abb. D 23  
 BOLTZMANN'sches  
 Superpositionsprinzip:  
 a) bei konstanter  
 Dehnung  
 b) bei konstanter  
 Spannung  
 EHRENSTEIN 1999 [51]

---

**Literaturverzeichnis**

- [1] Allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis Nr. P-BWU 03-I-16.5.107 "Transparente oder weiße ETFE-Folie „Nowoflon ET-Folie 6235“ als schwerentflammbarer Baustoff (Baustoffklasse DIN 4102-B1)" des Herstellers Nowofol, Otto-Graf-Institut, Stuttgart, v. 07.11.2002
- [2] Allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis Z-10.5-91 „Texlon Dachsystem mit Folienkissen“, der Firma Foiltec, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, v. 10.06.2003
- [2] Allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis Z-10.5-91 „Texlon Dachsystem mit Folienkissen“, der Firma Foiltec, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, v. 10.06.2003
- [3] Ansell M.P.: Acceptability of ET HOSTAFLON Film for Use in Buildings, Report of a Test Programme carried out for Buro Happold Consulting Engineers, School of Material Science, University of Bath, 1985
- [4] Bardenheier, Reinhard: Mechanisches Versagen von Polymerwerkstoffen – Anstrengungsbewertung mehrachsialer Spannungszustände, Kunststoffe – Fortschrittsberichte, Band 8, Carl Hanser Verlag, München, 1982
- [9] Barthel, Rainer; Burger, Norbert, Saxe, Klaus: Dachkonstruktionen mit ETFE-Folie, in: Deutsche Bauzeitschrift DBZ, Heft 4/2003, S. 518 – 521, Bauverlag BV GmbH, Gütersloh, 2003
- [10] Barthel, Rainer; Burger, Norbert: ETFE-Folie für eine transluzente Dachkonstruktion eines Konferenz- und Ausstellungsgebäudes, erschienen in: Berichtsband zum Symposium "Transparenz und Leichtigkeit", Essen, November 2002
- [13] Bauregelliste Ausgabe 2002/1; Sonderheft Nr. 26 der "Mitteilungen des DIBT am 31. Juli 2002 (Datum des Inkrafttretens: 14.08.2002), wird ständig fortgeschrieben, Bezugsquelle: Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 2002
- [14] Bayer Material Science: Thermoplastics Testing Center, [www.ttc.bayermaterialscience.com](http://www.ttc.bayermaterialscience.com), Leverkusen, 2006
- [15] Becker, Wieland: Die Entwicklung eines Werkstoffverbunds und einer Betonschalung zur Herstellung räumlich gekrümmter Flächentragwerke, Dissertation TU Wien, Institut für Tragwerkslehre und Ingenieurholzbau, Wien, 2002
- [16] Begemann, Walter: Alterung Technischer Textilien – Beanspruchung und Prüfungsmöglichkeiten, Forschungskuratorium Textil e.V., Arbeitskreis Technische Textilien, Eschborn 1999
- [17] Bletzinger, Kai-Uwe; Ziegler, René: Theoretische Grundlagen der numerischen Formfindung von Membrantragwerken und Minimalflächen, in Beton Kalender, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 2000
- [18] Blum, Rainer: Abschlußbericht über Untersuchungen zum mechanischen Verhalten am Material Asahi ETFE Folie 200 Micron 200 NJ im Vergleich zum Material Nowofol ETFE-Film Nowoflon ET 6235 - 200 µm, Bericht 643, Labor Dr. Blum, 2004 (unveröffentlicht)
- [19] Blum, Rainer: Bericht über die Überwachung der Produktion der Kissen in der Fa. KfM in Edersleben und über die Langzeitversuche im Labor Blum, Bericht 626-12, Stuttgart, 2005 (unveröffentlicht)
- [20] Blum, Rainer; Bögner, Heidrun: Untersuchungen an der Folie Nowoflon ETFE 6235 – 200 µm, Voruntersuchungen für ein DFG Forschungsprojekt, Labor Dr. Blum, Stuttgart, 2003 (unveröffentlicht)

- [21] Blum, Rainer; Bögner, Heidrun; Köhnlein, J.: Final Report: Tests on the mechanical Behaviour of ASAHI ETFE-FOIL 200 micron 200 NJ; for the approval at the DIBt; Stuttgart, 2004 (unveröffentlicht)
- [22] Bögle, Annette: Zur Morphologie komplexer Formen im Bauwesen, Dissertation, Institut für Leichtbau, Entwerfen und Konstruieren, Universität Stuttgart, 2005
- [23] Bomin Solar Research GmbH, Lörrach: [www.bomin-solar.de](http://www.bomin-solar.de), 2005
- [24] Boyle, James T.; Spence, John: Stress Analysis for Creep, Butterworth, London, 1983
- [25] Brandt, H.-J.; Harnach, R.; Niemann, H.-J.: DIN 4134 E für Tragluftbauten – Entwicklung und Grundlagen, Bauingenieur 55 (1980), S. 289 – 296, Springer Verlag, Berlin, 1980
- [26] Bronstein, Ilja Nikolaevic; Semendjaev, Konstantin Adolfovich: Taschenbuch der Mathematik, 21. Auflage, Verlag Nauka, Moskau, BSB B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1981
- [27] Brower, David I.: An Introduction to Polymer Physics; Cambridge, 2002
- [28] Brüller, O.S.; Pütz, D.: Einfache Temperatur- und spannungsabhängige Bestimmungsgleichungen für das Kriechen von Polymeren, in: Rheol. Acta 15, S. 143 – 147, 1976
- [29] Brüller, Otto; Potente, Helmut; Menges, Georg: Energiebetrachtungen zum Kriechverhalten von Polymeren, ISSN 0035-4511, Springer Verlag, Berlin / Heidelberg, 1977
- [30] Büchel, Rainer: Tragverhalten von luftgestützten Konstruktionen, Diplomarbeit, Universität Stuttgart, 1996
- [31] Bullinger, Hans-J.: Einführung in das Technologiemanagement, Teubner Verlag, Stuttgart, 1994
- [32] Bulson, P. S.: Design Principles of Pneumatic Structures, in: The Structural Engineer (No. 6, Vol. 51), June 1973
- [33] BÜV-Empfehlung - Tragende Kunststoffbauteile im Bauwesen [TKB]: Entwurf, Bemessung und Konstruktion, Diskussionsentwurf, Fassung Oktober 2002
- [34] Carlowitz, Ulrich: Kunststofftabellen, 4. völlig überarbeitete und erweiterte Auflage, ISBN 3-446-17603-9, Carl Hanser Verlag, München – Wien, 1995
- [35] Cook, M. J.; Liddell, W. I., Gill, C.: Cushion Roof System for a Hospital Atrium, London, in: Structural Engineering International, No. 1, 1994
- [36] Covertex GmbH, Obing, [www.covertex.de](http://www.covertex.de), 2006
- [37] Crawford R. J.; Benham Peter P.: Creep Rupture of Thermoplastics under Triaxial Stress Condition, Imperial College of Science and Technology, 1974
- [38] Cycon, H. L.: Von Seifenhäuten, Zeltdächern und Schneckenhäusern - Minimalflächen und andere mathematische Schönheiten, FB1, fhtw Berlin, 2005
- [39] Dassow, Jörg: Messung und Beschreibung der Querkontraktionszahl von teilkristallinen Thermoplasten als nichtlinear viskoelastischer Materialkennwert, Dissertation, Institut für Kunststoffverarbeitung an der RWTH Aachen, (Aachener Beiträge zur Kunststoffverarbeitung – Band 50), Aachen, 1995
- [40] De Vries, Joos W. J.: Tensile Foil – ETFE-Foil as Membrane Construction Material, Masters Project, Delft University of Technology, Civil Engineering and Geosciences, Structural and Building Engineering, Delft, 2003



- 
- [41] Dierkes, U.; Hildebrandt, S.; Küster, A.; Wohlrab, O.: Minimal Surfaces I + II, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1992
- [42] Domke, Helmut: Strukturrheologisches Modell zur Beschreibung des Festigkeits-, Verformungs- und Bruchverhaltens von Kunststoffen, *plasticconstruction* 3, S. 104 – 107, 1977
- [43] Domke, Helmut; Rübber, A., Fix, W.: Einfluss des wirklichen Temperaturablaufes auf das Kriechverhalten und die Festigkeit von tragenden Kunststoffen, *Plasticconstruction* 7, S. 52 – 57, 1977
- [44] DuPont: Tefzel Fluorpolymer Resin – Chemical Use Temperature Guide, Wilmington, USA ([www.teflon.com](http://www.teflon.com)), 2003
- [45] DuPont: Tefzel Fluorpolymer Resin – Properties Handbook, Wilmington, USA ([www.teflon.com](http://www.teflon.com)), 2003
- [46] Ehrenstein, Gottfried W., Erhard, Gunter: Konstruieren mit Polymerwerkstoffen - ein Bericht zum Stand der Technik, Carl Hanser Verlag, München, 1983
- [47] Ehrenstein, Gottfried W., Pongratz, Sonja: Thermische Einsatzgrenzen von Technischen Kunststoffbauteilen, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998
- [48] Ehrenstein, Gottfried W., Riedel, Gabriela, Trawiel, Pia: Praxis der thermischen Analyse von Kunststoffen, Carl Hanser Verlag, München, 2003
- [49] Ehrenstein, Gottfried W.: Kunststoff-Schadensanalyse - Methoden und Verfahren, Carl Hanser Verlag, München, 1992
- [50] Ehrenstein, Gottfried W.: Mit Kunststoffen Konstruieren, Carl Hanser Verlag, München, 2002
- [51] Ehrenstein, Gottfried W.: Polymer-Werkstoffe, 2. völlig überarbeitete Auflage, Carl Hanser Verlag, München Wien, 1999
- [52] Einsfeld, Ulrich: Bemessung von Tragwerken aus Kunststoff, in: *Der Ingenieurbau* [9] – Bemessung, Hrsg. Gerhard Mehlhorn, ISBN 3-433-01575-9, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1998
- [53] Engineering + Design GbR, Rosenheim: [www.membranstatik.de](http://www.membranstatik.de), 2006
- [54] Fachhochschule b.d. Basel, Nordwestschweiz, Institut für Mechanik, Vorlesungsskript, 2006
- [55] Fischer, Lutz: Das neue Sicherheitskonzept im Bauwesen, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 2001
- [56] Fitz, Herbert: Neue Wege im Einsatz von Fluorkunststoffen für transparente Überdachungen, in: *Technische Rundschau* 51/52, 1983 (auch als Sonderdruck 6288 der Hoechst AG – Kunststoffe), 1983
- [57] Fitz, Herbert: Witterungsbedingte Fluorkunststoffe im Außeneinsatz, in: *Kunststoffe* 1989 (79), Heft 6, 1989
- [58] Flasch, Frank: Pastenextrudierte Materialien für Auskleidungen im Rohrleitungs- und Apparatebau, Beitrag auf der Fachtagung Fluorpolymere – Leistungspotentiale und innovative Anwendungen, Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ), Würzburg, 09. -10. April, 2003
- [59] Vector-Foiltec Group, Foiltec GmbH, Bremen und Vector Special Projects, London: <http://www.vector-foiltec.com>; 2006; Fachbeitrag und Projektportfolio auf CD, Symposiums "Changing the face of architecture – Fassaden aus ETFE-Folie", Berlin, 2004, Firmenbroschüre: "Intelligente Dachsysteme"
- [60] Forschungszentrum Jülich: Wissenschaftlicher Beitrag zur mathematischen Definition von Flächeneigenschaften ([http://wwwzb.zb.kfa-juelich.de/mathe/daten/kap\\_3/](http://wwwzb.zb.kfa-juelich.de/mathe/daten/kap_3/)) 2005
-

- [61] Forster, Brian; Mollaert, Marijke: European Design Guide for Tensile Surface Structures, Tensinet, ISBN 90 8086 871x, Brüssel, 2004
- [62] Franck, Adolf: Kunststoff-Kompodium, 5. überarbeitete Auflage, ISBN 3-8023-1855-2, Vogel Buchverlag, Würzburg, 2000
- [63] Fraunhofer Gesellschaft: Institut für Bauphysik (IBP), Fachbeiträge, Symposium: "Der 5. Baustoff – Bauen mit Membranen", 17.07.2006, [www.ibp.fraunhofer.de](http://www.ibp.fraunhofer.de), Holzkirchen, 2006 sowie Institut für Kurzzeitmechanik (EMI), [www.emi.fraunhofer.de](http://www.emi.fraunhofer.de), Freiburg, 2006
- [64] Gleiter, U.; Wörner, J.-D., Institut für Werkstoffe und Mechanik der TU Darmstadt: Bauen mit transparenten Thermoplasten, in: Bauingenieur, Band 79, Heft Januar 2004, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 2004
- [65] Grambow, A.; Haberstroh, E.: Application of the time temperature shift principle to the material behaviour of rubber under high deformations; in: Conference Proceedings, ANTEC 2001 (59) in Dallas/Texas, 2001
- [66] Grellmann, Wolfgang (Seidler, Sabine, Hrsg.): Kunststoffprüfung, ISBN 3-446-22086-0, Carl Hanser Verlag, München, 2005
- [67] Groß, Dietmar; Mehlhorn, Gerhard (Hrsg.): Werkstoffmechanik, in: Der Ingenieurbau [4] – Werkstoffe, Elastizitätstheorie, ISBN 3-433-01570-8, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1996
- [68] Grundlagen zur Beurteilung von Baustoffen, Bauteilen und Bauarten im Prüfzeichen- und Zulassungsverfahren, IfBt (heute: DIBt), Berlin, Mai 1986
- [69] Gummert, Peter: Materialgesetze des Kriechens und der Relaxation - Zur Problematik der zeitabhängigen nichtlinearen Stoffgleichungen, VDI Verlag, Düsseldorf, 1978
- [70] Habermann, Karl J.: Geschichte des Membranbaus, in: Koch, Klaus-Michael, Bauen mit Membranen, Prestel Verlag, München, Berlin, London, New York, ISBN 3-7913-3048-9 (deutsche Ausgabe), 2004
- [71] Haberstroh, E.; Brandt, M.: Determination of mechanical properties of thermoplastics suitable for micro systems; in: Macromolecular Materials Engineering 2002 (287) 12, pp. 881-888
- [72] Haberstroh, E.; Grambow, A.: Das Zeit/Temperatur-Verschiebungsprinzip (ZTV-Prinzip) - Simulation von Elastomerbauteilen; Kunststoffe-Synthetics 2002 (49) 4, S. 22-27, 2002 (s. auch: Haberstroh, E.; Grambow, A.: Application of the time-temperature shift principle to the material behaviour of rubber under high deformations; in: Macromolecular Materials and Engineering 2000 (284/285), pp. 14-18, 2000)
- [73] Hellerich, Walter; Harsch, Günther; Haenle, Siegfried: Werkstoffführer Kunststoffe / Eigenschaften / Prüfungen, Kennwerte, 8.Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2001
- [74] Herzog, Thomas: Pneumatische Konstruktionen – Bauten aus Membranen und Luft, mit Beiträgen von Gernot Minke und Hans Eggers, Verlag Gerd Hatje, Stuttgart, 1976
- [75] Hildebrandt, Stefan; Tromba, Anthony: Kugel, Kreis und Seifenblasen – Optimale Formen in Geometrie und Natur, Birkhäuser Verlag, 1996
- [76] Hilgenberg; Axel: Beitrag zur Bemessung von Baukonstruktionen aus Kunststoff unter besonderer Berücksichtigung der Windbelastung, Dissertation, Fakultät für Bauwesen der RWTH Aachen, 1974
- [77] Hodann, Robert: "Eigenschaften und Besonderheiten moderner Membranmaterialien", Nowofol GmbH & Co KG, Vortragsabdruck, Fachsymposiums "Der 5. Baustoff – Bauen mit Membranen", Fraunhofer IBP, Holzkirchen, 2006
- [78] Hodann, Robert; Steurer, Helga: "Fluorpolymer Films for Architectural Structures", NOWOFOL GmbH & Co KG, Vortragsabdruck, Fachsymposiums "Fluoroplast 2004", Zürich

- 
- [79] Hoechst AG (Hoechst High Chem): Informationsblätter und Broschüren zum Werkstoff Hostaflon ET 6235, von April 1977, April 1983, Dezember 1983, August 1984 und Februar 1991
- [80] Höller, Ralf: Formfindung, Dissertation, Verlag Dr. Thomas Balistier, ISBN 3-9806168-9-4, Mähringen, 1999
- [81] Hortmanns, Michael; Hügler, Volker, Klinkhammer, Ralf; Kemper, Frank,: AWD Arena Hannover – Aerodynamische Analyse für das neue glatte Membrandach, PSP – Technologien im Bauwesen, Prof. Sedlacek & Partner, Berichte W 928 / 0304 und W 921 / 0104, Aachen, 2004 (unveröffentlicht)
- [82] Hortmanns, Michael; Hügler, Volker: AWD Arena Hannover – Temperaturabhängige Modellierung der Windlasten für das Foliendach, Prof. Sedlacek & Partner (PSP – Technologien im Bauwesen), Aachen, Bericht W 945 / 0604 Rev 01, 2004 (unveröffentlicht)
- [83] Hosser, D.: Erläuterungen zum Bemessungskonzept für Tragluftbauten, Frankfurt, 1979 (unveröffentlicht)
- [84] Hying, Klaus: Analyse der viskoelastischen Eigenschaften von Poly(tetrafluorethylen) im Bereich des  $\beta$ -Übergangs, Dissertation, RWTH Aachen, 2003
- [85] Off, Robert, Institut für Membran- und Schalenttechnologie e.V.: BEKAERT Belt System, in: Tensinews-Newsletter Nr. 5, Nov. 2003
- [86] Isenberg, Cyril: The Science of Soap Films and Soap Bubbles, ISBN 04-862-6960-4, 1992
- [87] ISO 8930:1991: Allgemeine Grundsätze für die Zuverlässigkeit von Tragwerken - Verzeichnis der gleichbedeutenden Begriffe, März 1991
- [88] Issler, L.; Ruoß, H.; Häfele, P.: Festigkeitslehre Grundlagen, Springer Verlag, Berlin, 1995
- [89] Jahr, A.: Skript, Konstruktionslehre I, FH Düsseldorf, 2006
- [90] Juillard, M., Mazzo, G.: Extrapolationsverfahren zur Berechnung der zulässigen Langzeitbeanspruchung von Kunststoffen, in Kunststoffe, S. 334 – 340, 1976
- [91] Kara, Harun: Untersuchung des viskoelastisch exzentrischen Knickens von Polymeren, Dissertation, TU München, 2005
- [92] Karcher, H.; Polthier, K.: Die Geometrie der Minimalflächen, Spektrum der Wissenschaft, Moderne Mathematik, Spektrum, Akademischer Verlag, 1996
- [93] Kass, Franz: Tabelle "Chemische Beständigkeit von Kunststoffen", Bürkle GmbH, Lörrach (<http://www.buerkle.de>), 2003
- [94] Kausch, H.H.: Schädigungsprozess in Kunststoffwerkstoffen, in Material und Technik, Heft 3, S. 111 – 116, 1979
- [95] Kawaguchi, Mamoru: Pneumatische Konstruktionen, in arcus (10), Der umgekehrte Weg, Köln, 1990
- [96] Kerbow, Dewey L.: Ethylene/Tetrafluorethylene Copolymer Resins, ed. by John Scheirs in: Modern Fluoropolymers (ISBN 0-471-97055 7), Wiley Series in Polymer Science, New York, 1997
- [97] Knausenberger, Rainer: Das mechanische Verhalten isotroper und anisotroper Werkstoffe mit nichtlinearen Eigenschaften, Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen der RWTH Aachen, Juli 1982
- [98] Koch, Herbert: Anwendung von Beschichtungen und Folien aus Fluorkunststoffen im Bauwesen; in: Membrankonstruktionen – Teil 2, Bubner, Ewald; Baier, Bernd; Koenen, Reinhold und Oelbermann, Jobst (Hrsg.), Beiträge zur Vortragsveranstaltung vom 12./13. Juni 1980 an der Universität Essen; ISBN 3-481-11152-5, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Köln-Braunfels, 1981
-

- [99] Korinek, P.M.: Fluorkunststoffe, in: Kunststoffe (83), Heft 10, S. 782 – 784, Carl Hanser Verlag, München, 1993
- [100] Kraus, Harry: Creep Analysis, Wiley, New York, 1980
- [101] Kraus, Oliver: Systemzuverlässigkeit von Hallenrahmen aus Stahl unter zeitvarianten Belastungen, Schriftenreihe Stahlbau – RWTH Aachen - Heft 51, 2004
- [102] Krebs, C.; Avonet, M.-A.; Leu, K. W.: Langzeitverhalten von Thermoplasten, Carl Hanser Verlag München Wien, 1999
- [103] Krumpholz, T.: Lebensdauerabschätzung von Elastomerbauteilen mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode; in: Tagungsbeiträge zum IKV-Seminar "CAE in der Kunststoffverarbeitung - Grundlagen, Anwendungen, Perspektiven", 27. - 28. September 2001 in Aachen, S. 1-16, 2001
- [104] Ledwoch, Klaus-H.: Neue Entwicklungen / Anwendungen bei Fluorthermoplasten, Beitrag auf der Fachtagung Fluorpolymere – Leistungspotentiale und innovative Anwenan der Schwelle zum neuen Jahrtausend, Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ), Würzburg, 25. – 26. Oktober 2000
- [105] Lehnert, Stefan: Folien für Fassaden und Dächer - drei Beispiele, in DBZ, Heft 7/2000
- [106] Lehnert, Stefan: Vor- und Nachteile von Glas- und Foliensystemen, in: Glas, Heft 4/2004
- [107] Lehnert, Stefan; Schween, Tobias: Bauen mit Folienkissen, in: Bauingenieur (81), S. 285 – 288, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, Juni 2006
- [108] Lewen, Bernd: Das nichtlineare viskoelastische Verhalten von Kunststoffen am Beispiel der Zeit-Temperatur-Verschiebung und der Querkontraktionszahl, Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen der RWTH Aachen, Juni 1991
- [109] Linhard, Johannes; Wüchner, Roland; Bletzinger, Kai-Uwe; Technische Universität München, Lehrstuhl für Statik: Introducing Cutting Patterns in Form Finding and Strucural Analysis, ECCOMAS, Conference Inflatable Membranes, Stuttgart, 2005
- [110] Linke, Dieter: Membranwerkstoff für Gebäudehüllen: ETFE-Folien im Bauwesen, 02/2005, München 2005
- [111] Menges, Georg; Haberstroh, Edmund; Michaeli, Walter, Schmachtenberg, Ernst: Werkstoffkunde Kunststoffe, Carl Hanser Verlag, München, 5. völlig überarbeitete Auflage, ISBN 3-446-21257-4, 2002
- [112] Menges, Georg; Schmachtenberg, Ernst: Beschreibung des mechanischen Verhaltens viskoelastischer Werkstoffe mit Hilfe von Kurzzeitversuchen, in Kunststoffe (73), Heft 9, S. 543 – 546, 1983
- [113] Menges, Georg; Schmachtenberg, Ernst: Das Deformationsmodell, Kunststoffe (77), Heft 3, S. 289 – 292, 1987
- [114] Menges, Georg; Wiegand, G.; Pütz, D.; Maurer, F.: Ermittlung der kritischen Dehnung teilkristalliner Thermoplaste, in Kunststoffe (65), S. 368 – 371, 1975
- [115] Michaeli, W.; Gutberlet, D.; Glißmann, M.: Determination of mechanical characteristics of semi-crystalline thermoplastics in dependence on molecular orientation; in: Macromolecular Materials and Engineering 2000 (279), pp. 19-25, 2000
- [116] Michaeli, Walter, Brinkmann, Thomas, Lessenich-Henkys, Volker: Kunststoff-Bauteile werkstoffgerecht konstruieren, ISBN 3-446-17535-0, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1995
- [117] Michaeli, Walter, Fölster, T.; Lewen, Bernd: Beschreibung des nichtlinear-viskoelastischen Verhaltens mit dem Deformationsmodell, Kunststoffe (79), Heft 12, S. 1356 – 1358, 1989
- [118] Michaeli, Walter: Einführung in die Kunststoffverarbeitung, 4. völlig überarbeitete Auflage, ISBN 3-446-21261-2, Carl Hanser Verlag, München – Wien, 1999

- 
- [119] Michaeli, Walter; Glißmann, M.: Concept for the numerical description of the true stress/strain behaviour of semi- crystalline thermoplastics; in: Polymer Testing 2001 (20), pp. 591-596, 2001
- [120] Michaeli, Walter; Glißmann, M.: Investigation and measurement of the true stress/strain behaviour of semi-crystalline themoplastics; in: Macromolecular Materials and Engineering 2000, 284/285, pp. 19-24, 2000
- [121] Michler, Georg H.: Kunststoff-Mikromechanik – Morphologie, Deformations- und Bruchmechanismen, Carl Hanser Verlag, München Wien, 1992
- [122] Minte, Jörg: Das mechanische Verhalten von Verbindungen beschichteter Chemiefasergewebe, Dissertation, Institut für Kunststoffverarbeitung, Aachen, 1981
- [123] Moore, D.R.; Pavan, A.; Williams, J.G. (Hrsg.): Fracture Mechanics Testing Methods for Polymers Adhesives and Composites, Elsevier Science Ltd., Oxford, UK, 2001
- [124] Moritz, Karsten, Barthel, Rainer: Bauen mit ETFE-Folien, in: Detail Praxis - Transluzente Materialien, S. 70– 78, Institut für Internationale Architekturdokumentation, München, 2003
- [125] Moritz, Karsten, Barthel, Rainer: Transparente Architektur, in: Detail, Heft 12/2002, S. 1616 – 1620, Institut für Internationale Architekturdokumentation, München, 2002
- [126] Moritz, Karsten: Die Stadionhülle der Allianz Arena, in: Detail Konzept, Heft 9/2005, S. 974 - 978, Institut für Internationale Architekturdokumentation, München, 2005
- [127] Moritz, Karsten: Materialeinsatz und Konfektionierung von Membranwerkstoffen, in: Stahlbau, Heft 8/2000, S. 619 – 626, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 2000
- [128] Moritz, Karsten: Membranbau - Transparente Gebäudehüllen aus ETFE-Folie, Kap. 6, Buch zum Symposium "Stahl, Glas und Membranen im Industriebau", Dresden, S. 48 – 57, Arbeitsgemeinschaft Industriebau e.V. (Hrsg.), Callwey Verlag, München, 2003
- [129] Moritz, Karsten: Membranwerkstoffe im Hochbau – Gewebe und Folien, in: Detail Praxis - Transluzente Materialien, S. 58 – 69, Institut für Internationale Architekturdokumentation, München, 2003
- [130] Moritz, Karsten: Membranwerkstoffe im Hochbau, in: Detail, Heft 6/2000, S. 1050 – 1058, Institut für Internationale Architekturdokumentation, München, 2000
- [131] Moritz, Karsten: monoaxiale Prüfungen an ETFE-Folie –Nowoflon ET 6235 – transparent, Prüfbericht zu Materialprüfungen im Werk Nowofol, Siegsdorf, 30.08.2000 (unveröffentlicht)
- [132] Moritz, Karsten; Brengelmann, Tim; Schiemann, Lars: Tankstellendächer aus Stahl und Folie, in: Detail, Heft 7/8 2005, S. 798 - 804, Inst. f. Internat. Architekturdokum., München, 2005
- [133] Moritz, Karsten; Linke, Dieter: AWD Arena in Hannover, Vordimensionierung (2003) sowie Standsicherheitsnachweis für das ETFE-Foliendach, Engineering + Design GbR, Rohrdorf, 2004 (unveröffentlicht)
- [134] Münsch, Raimund; Reinhardt, Hans-Wolf: Zur Berechnung von Membrantragwerken aus beschichteten Geweben mit Hilfe genäherter elastischer Materialparameter, in: Bauingenieur 70 (1995), Springer Verlag Berlin, 1995
- [135] Nadlinger, M. (BLT Wieselburg): Diagramm der Spannungs-Dehnungs-Kennlinie von Stahl, Skript, 2006
- [136] Naumer, Wolfgang: Konstruieren mit Luft – Entwicklungen der pneumatischen Architektur, Dissertation, Universität Innsbruck, Fakultät für Bauingenieurwesen und Architektur, 1999
- [137] Nentwig, Joachim: Kunststoff-Folien – Herstellung – Eigenschaften – Anwendung, 2. völlig überarbeitete Auflage, ISBN 3-446-21420-8, Carl Hanser Verlag, München – Wien, 2000
- [138] Neukirch, J.: Die Costa'sche Minimalfläche, Vorlesungsskript Minimalflächen II, Universität Regensburg, 2006 ([http://www.uni-regensburg.de/Fakultaeten/nat\\_Fak\\_I/sammlung/mnf2.htm](http://www.uni-regensburg.de/Fakultaeten/nat_Fak_I/sammlung/mnf2.htm))
-

- [139] Nieratschker, Johann: Neuentwicklungen bei Fluorpolymeren, Beitrag auf der Fachtagung Fluorpolymere – Leistungspotentiale und innovative Anwendungen, Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ), Würzburg, 09. -10. April, 2003
- [140] Nitsche, J.C.C.: Vorlesungen über Minimalflächen, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1975
- [141] Nowofol Produktspezifikation Nowoflon ET 6235 – transparent (100 – 250  $\mu\text{m}$ ), 27.03.2002
- [142] Off, Robert: Belt System, 2004 (unveröffentlicht)
- [143] Osswald, Tim A.; Menges, Georg: Material Science of Polymers for Engineers, 2end Edition, Carl-Hanser-Verlag, München, Wien, 2003
- [144] Pomeroy, C.D. (Hrsg.): Creep of Engineering Materials, Mechanical Engineering Publications, London, 1978
- [145] Prüfzeugnis Nr. PZ IV/99-138, für Kunststoff-Folie aus ETFE „Toyoflon“ des Herstellers Toray Deutschland GmbH, MFPA, Leipzig, v. 04.10.1999
- [146] Prüfzeugnis zum Nachweis des Brandverhaltens nach DIN 4102-Teil 1 Nr. PZ-Hoch-03093 für die transparente Folie „ETFE-film NJ“ des Herstellers Asahi Glass Company, Prüfinstitut Hoch, Fladungen, v. 25.02.2003
- [147] Quinson, R.; Perez, J.: Yield Criteria for Amorphous Glassy Polymers, in Journal of Material Science 1997 (32), S. 1371 – 1379, 1997
- [148] Rabotnow, J. U.; Iljuschin, A. A.: Methode der Viskoelastizitätstheorie, Carl Hanser Verlag, München, 1970
- [149] Reiner, M.; Weissenberg, K.: A Thermodynamical Theory of the Strength of Materials, Rheol. Leaf., 10, 12-20, 1939
- [150] Reinhardt, Hans-Wolf, Mehlhorn, Gerhard (Hrsg.): Der Ingenieurbau – Band 4 - Werkstoffe/Elastizitätstheorie, Teil 1 - Werkstoffe des Bauwesens, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1997
- [151] Reinhardt, Hans-Wolf: Ein- und zweiachsige Verformungs- und Festigkeitsuntersuchungen an einem beschichteten Gittergewebe, Sonderforschungsbereich (SFB) 64 – Weitgespannte Flächentragwerke, Universität Stuttgart und DFG, Mitteilungen 31/1975, Stuttgart 1975
- [152] Richtlinie für die statistische Auswertung von Prüfergebnissen bei Zulassungs- und Überwachungsprüfungen von Bauteilen und Bauarten aus Kunststoff, DIBt, Berlin, 1982 (mit redaktionellen Änderungen v. Oktober 1987)
- [153] Richtlinie für die Zulassungsprüfung bechichteter Chemiefasergewebe und deren Verbindungen, DIBt, Berlin, Oktober 1983
- [154] Ritz, Klaus: Werkstoffe ECTFE und MFA und amorphe Perfluorpolymere – Eigenschaften und Anwendungen, Fachtagung Fluorpolymere – Leistungspotentiale und innovative Anwendungen, Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ), Würzburg, 09. -10. April, 2003
- [155] Roberts, J.: Stress-Strain property reference points for non-linear materials, in: Plastics and Rubber Processing and Applications, 9, 1988
- [156] Robinson-Gayle, S.; Kolokotroni, M.; Cripps, A., Tanno, S.: ETFE Foil Cushions in Roof Atria, in: Construction and Building Materials (15), S. 323-327, Elsevier Science Ltd., Oxford, UK, 2001
- [157] Rudolf-Wittrin; Stimpfle, Bernd; Blümel, Stefan; Pasternack, Hartmut: Von der CargoLifter-Werfthalle zu Tropical Islands – Konstruktion, Herstellung und Montage der neuen ETFE-Folienkissen-Eindeckung, in: Bauingenieur (81), Heft 1/2006, S. 33 – 42, Springer Verlag, Berlin, 2006
- [158] Saechtling, Hansjürgen; Oberbach, Karl et. al.: Saechtling - Kunststoffaschenbuch, 28. überarbeitete Ausgabe, ISBN 3-446-21605-7, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2001

- 
- [159] Sarabi, Bahman: Das Anstrengungsverhalten von Polymerwerkstoffen infolge ein- und zweiachsigen Kriechens – Ermittlung von Langzeitbemessungskennwerten, Dissertation im Fachbereich Maschinenbau der Universität Gesamthochschule Kassel, 1984
- [160] Sauvigny, Friedrich: Partielle Differentialgleichungen der Geometrie und Physik - Band 2: Funktionsanalytische Lösungsmethoden, Springer Verlag, 2005
- [161] Sauvigny, Friedrich: Partielle Differentialgleichungen der Geometrie und Physik, Band 1: Grundlagen und Integraldarstellungen, Springer Verlag, 2004
- [162] Saxe, Klaus: Zum Einsatz von ETFE-Folien für einlagige Membrankonstruktionen am Beispiel des Konferenzentrums der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück, in: Berichtsband zum Symposium "Transparenz und Leichtigkeit", Essen, November 2002
- [163] Saxe, Klaus; Baier, Bernd (Hrsg.): Ein biaxiales Prüfsystem – Entwicklung, Stand, Perspektiven, in: Skelett und Haut, Symposium, Gesamthochschule Essen, Fachbereich 10 Bauwesen, Essen, 1998
- [164] Saxe, Klaus; Koenen, Reinhold, Universität GH Essen: Biaxiale Zugprüfungen an technischen Membranen, Tectextil Symposium 1991, Vortragsabdruck 352 b, Frankfurt, 1991
- [165] Schanz, M., Mechanik II – Festigkeitslehre, Manuskript des Instituts für Baumechanik, TU Graz, 2005
- [166] Schenkel, G.: Verfahren zur Bestimmung der Poissonzahl insbesondere bei Kunststoffen, in: Kunststoffe 63, 1973
- [167] Schlaich, Bergermann und Partner, et al.: "Ins rechte Licht gerückt – Stierkampfarena Vista Alegre Madrid/E", in: DBZ (Deutsche Bauzeitschrift) 04/2003, S. 32 – 37, Bauverlag BV, Gütersloh
- [168] Schlaich, Jörg; Schober, Hans: Filigrane Kuppeln, tec 21, Heft 12/2002
- [169] Schlimpf, Michael: Fluorpolymere in der Übersicht, Beitrag auf der Fachtagung Fluorpolymere – Leistungspotentiale und innovative Anwendungen, Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ), Würzburg, 09. -10. April 2003
- [170] Schmachtenberg, Ernst; Wanders, Martin: Der Einfluss des biaxialen Spannungszustandes auf die Werkstoffkennwertfunktionen nichtlinear viskoelastischer Werkstoffe, in: Deformation und Bruchverhalten von Kunststoffen, Hrsg. Grellmann, W., Seidler, S., 1998
- [171] Schmachtenberg, Ernst: Die mechanischen Eigenschaften nichtlinear viskoelastischer Werkstoffe, Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen der RWTH Aachen, November 1985
- [172] Schmachtenberg, Ernst; Brandt, Marcel: Nicht-lineare Viskoelastizität, in: Kunststoffe 94 (2004) 6, S. 89-93
- [173] Schmachtenberg, E.; Glißmann, M.; Brandt, M.; Krumpholz, T.; Brinkmann, M.: Modellierung mechanischer Eigenschaften von Thermoplasten, in: Tagungshandbuch zum 22. Internationalen Kunststofftechnischen Kolloquium des IKV, 10.-12. 3. 2004, Aachen, Block 10, S. 1-20, 2004
- [174] Schmiedel, Heinz: Handbuch der Kunststoffprüfung, Carl Hanser Verlag, ISBN: 3-446-16336-0, München, 1992
- [175] Schober, Hans: Geometrische Prinzipien für wirtschaftliche und effiziente Schalenträgerwerke, Bautechnik 2002 (79), Heft 1, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 2002
- [176] Schock, Hans-Joachim: Segel, Folien und Membranen, Birkhäuser – Verlag für Architektur, ISBN 3-7643-5449-6, Basel, Berlin, Boston, 1997
- [177] Schöne, Lutz: Florale Transparenz: Das neue Dach über dem Innenhof der IHK in Würzburg, in: Stahlbau (73), Heft 11, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 2004
-

- [178] Schuëller, G. I.: Einführung in die Sicherheit und Zuverlässigkeit von Tragwerken, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, München, 1981
- [179] Schwarz, Otto; Ebeling, Friedrich-Wolfhard: Kunststoffkunde, 7. korrigierte und erweiterte Auflage, ISBN 3-8023-1917-6, Vogel Buchverlag, 2002
- [180] Schwarz, Otto; Ebeling, Friedrich-Wolfhard; Furth, Brigitte: Kunststoffverarbeitung, 9. überarbeitete Auflage, ISBN 3-8023-1893-5, Vogel Buchverlag, Würzburg, 2002
- [181] Schwarzl, Friedrich Rudolf: Polymermechanik; Berlin Heidelberg; 1990
- [182] Sedlacek; Hortmanns; Klinkhammer; Kemper; Hügler (PSP – Technologien im Bauwesen): Aerodynamische Analyse für das neue glatte Membrandach, Druckmessungen, Modellversuch am Sectionsmodell 1:1, Numerische Simulation der Dachreaktion im turbulenten Wind, Berichte W921/0104 und W928/0304 (Zusätzliche Messungen), Aachen, 2004
- [183] Sidor, Neven, Nicholas Grimshaw & Partners, London: "Transparente Architektur", Vortrag im Rahmen des Symposiums "Changing the face of architecture – Fassaden aus ETFE-Folie", Berlin, 2004
- [184] Referenzliste Skyspan Europe GmbH, Rimsting: [www.skyspan.de](http://www.skyspan.de), 2000 - 2004
- [185] Sobek, Werner: Auf pneumatisch gestützten Schalungen hergestellte Betonschalen, Dissertation, Institut für Massivbau, Universität Stuttgart, 1987
- [186] Sobek, Werner; Speth, Martin: Textile Werkstoffe, Bauingenieur 70, Springer Verlag, Berlin, , S. 243 – 250, 1995
- [187] Spindler, Heinz: Differentialgeometrie von Flächen, Fachbereich Mathematik/Informatik der Universität Osnabrück, 2002
- [188] Steigenberger, Christian; Bauer, Maximilian (Bauer Membranbau): [www.bauermembranbau.de](http://www.bauermembranbau.de), Freising, 2005
- [189] Stewart, Ian: Die unbegreifliche Leichtigkeit der Seifenblase, in: Spektrum der Wissenschaft, Dezember 1998
- [190] Sunovation GmbH, Klingenberg-Trennfurt: [www.sunovation.de](http://www.sunovation.de), 2006
- [191] Sunways AG, Konstanz: [www.sunways.de](http://www.sunways.de), 2006
- [192] Tanno, Stephen: ETFE Foil Cushions as an alternative to glass for atriums and rooflights, Buro Happold, Centre of Window and Cladding Technology, ICBEST, 1997
- [193] Technicoat s.r.o., Homole 198,370 01 České Budějovice, Tschechische Republik: [www.technicoat.cz/de/](http://www.technicoat.cz/de/), 2006
- [194] Tragende Kunststoffbauteile im Bauwesen [TKB]: Entwurf, Bemessung und Konstruktion; BÜV-Empfehlung (Diskussionsentwurf), Fassung Oktober 2002
- [195] Wagner, Rosemarie, Raible, Tilmann: Wann trägt Luft wirklich?, in: Bauen mit Textilien, Heft 3, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 2000
- [196] Wikipedia: [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org), 2006
- [197] Winemann, Alan S.; Rajagopal, K. R.: Mechanical Response of Polymers, Cambridge, 2000
- [198] Wörner, J.-D.; Gleiter, U.: Bemessung tragender Kunststoffbauteile, in: Bauen mit Kunststoffen – Jahrbuch 2002, Teil C1, Kap. 3, Ernst & Sohn, Berlin, 2001
- [199] Zettlitzer, Walter: Allianz Arena – Planung, Fertigung und Montage der Kissenhülle, in: Detail Konzept, Heft 9/2005, S. 966 - 969, Institut für Internationale Architekturdokumentation, München, 2005



- 
- [200] Zettlitzer, Walter: Pneumatisches Bauen am Beispiel der Allianz Arena München, in: Kunststoffe und freie Formen – ein Werkbuch, ISBN 3-211-21077-6, Springer Verlag, Berlin, 2004
- [201] Ziegler, René; Wagner, Werner; Bletzinger, Kai-Uwe: Ein Finite-Elemente-Modell zur Berechnung von Falten in vorgespannten Membrantragwerken, in: Bauingenieur (77), Heft 2, Springer Verlag, Berlin, 2002
- [202] Zwick GmbH & Co. KG, Ulm: [www.zwick.de](http://www.zwick.de), 2004
- [203] Airlight Ltd., Biasca: [www.airlight.biz](http://www.airlight.biz), 2003
- [204] Hightex GmbH, Rimsting/Chiemsee: [www.hightexworld.com](http://www.hightexworld.com), 2006
- [205] Tentech, Utrecht (NL): [www.tentech.nl](http://www.tentech.nl), 2006 und 2007
- [206] Buitink Technology (NL): [www.buitink-technology.com](http://www.buitink-technology.com), 2006
- [207] Poly-Nederland (Polyned, NL): [www.polyned.nl](http://www.polyned.nl), 2006
- [208] Böhme, Magdaly: Synthese und Charakterisierung von Protonenaustauschmembranen durch strahlungsinduziertes Pfropfen auf Basis von Sulfon-, Phosphor- und Phosphonsäure, Dissertation, Fakultät für Natur- und Materialwissenschaften, Technische Universität Clausthal, Clausthal-Zellerfeld, 2005
- [209] Michaeli, Walter; Glissmann, Markus: Concept for the Numerical Description of the True Stress/Strain Behaviour of Semi-Crystalline Thermoplastics, in: Polymer Testing 20 (2001), S. 591-596, Elsevier Science Ltd., Oxford, UK, 2001
- [211] Luchsinger, R.H.; Crettol, R.: Transparent Tensairity Girder, Abb. in TensiNews, Newsletter Nr. 11, [www.tensinet.com](http://www.tensinet.com), Oktober 2006
- [212] Meffert, Bernd: Mechanische Eigenschaften PVC-beschichteter Polyestergewebe, Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen der RWTH Aachen, 1978
- [213] Neborg, Jens-Uwe: Zweiachsige Zugversuche an technischen Membranen - Untersuchungen zur Homogenität der Krafterleitung bei Kreuzproben; Diplomarbeit, Universität GH Essen, Fachbereich Bauwesen, Fachgebiet Konstruktive Gestaltung, Prof. Dr.-Ing. E. Bubner, Essen, 1989
- [214] Doering, Norbert: Zweiachsige Zugversuche an technischen Membranen - Untersuchungen zur Abhängigkeit des Kraft-Dehnungsverhaltens von der Temperatur; Diplomarbeit, Universität GH Essen, Fachbereich 10 Bauwesen, Fachgebiet Baukonstruktion/Konstruktive Gestaltung, Prof. Dr.-Ing. E. Bubner, Essen, 1993
- [215] Wälken, Christoph: Zweiachsige Zugversuche an technischen Membranen - Untersuchungen zur Abhängigkeit des Kraft-Dehnungsverhaltens bei PTFE-beschichteten Glasgeweben von der Temperatur; Diplomarbeit, Universität GH Essen, Fachbereich 10 Bauwesen, Fachgebiet Baukonstruktion/Konstruktive Gestaltung, Prof. Dr.-Ing. E. Bubner, Essen, 1994
- [216] Baumann, Thomas: Statisch-konstruktive Eigenschaften von PTFE-beschichtetem Glasgewebe; in: Bauingenieur, Band 77, S. 158 – 166, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, April 2002
- [217] Hengl, Rüdiger; Gust, Herbert: Einfluß von Vorbeanspruchungen auf die mechanischen Eigenschaften polymerer Werkstoffe; in: Kunststoffe 79 (1989), Heft 3, S. 265 – 270, Carl Hanser Verlag, München, 1989
- [218] Herzog, Thomas, Moro, José-Luis: Umbau einer Industriehalle in München, in: Baumeister, 10/1997, S. 44-49
- [219] Texlon International GmbH, Giswil, Schweiz, <http://www.texlon.ch>; 2006
- [220] Mimesis Atelier, München, <http://www.messe-ausstattung.de>; 2006
-

- [221] Hauschild + Boesel et. al., München: Verwaltungsgebäude in München, in: Detail: 06/2000, S. 1005-1008, Verlag für internationale Architekturdokumentation, München
- [222] Alsop & Störmer Architects et. al., London: Pavillon im Earth Centre in Doncaster in: Detail: 06/2000, S. 1002-1004, Verlag für internationale Architekturdokumentation, München
- [223] Renzo Piano Building Workshop et al.: Präsentationshalle im Design-Center Daimler-Chrysler, Sindelfingen, in: Glas – Architektur und Technik 04/1999, S. 13 – 19
- [224] Eichenhofer GmbH, Illertissen: [www.eichenhofer.com](http://www.eichenhofer.com), 2007
- [225] Dyneon GmbH & Co. KG: Membranen für den Flughafen München; in: Stahlbau (73), Heft 06/2004; S. A7 – A8; Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 2004
- [226] Naumer, Wolfgang: Meilensteine in der Entwicklung von transparenten Membrandächern, in: Glas – Architektur und Technik 01/2003, S. 42 - 47
- [227] Ceno Tec GmbH, Greven: <http://www.ceno-tec.de>, 2006
- [228] Moritz, Karsten: Bauweisen der ETFE-Foliensysteme, in: Stahlbau, Heft 5/2007, S. 336 – 342, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 2007
- [229] Oberbach, Karl; Schmachtenberg, Ernst: Konstruktionsgerechte Kennwerte – Voraussetzung für werkstoffgerechte Konstruktion von Präzisionsteilen aus Kunststoff; Anwendungstechnische Information ATI 956; Bayer AG, 1995 (Aktualisierter Sonderdruck aus „Plaste und Kautschuk 38“, Heft 4/1991, Deutscher Verlag für die Grundstoffindustrie, Leipzig)

## Normenverzeichnis

- [N1] DIN 1055-100: 2001-03: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung, Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln, März 2001
- [N2] DIN 1055-4:1986-08: Lastannahmen für Bauten – Teil 4: Verkehrslasten, Windlasten bei nicht schwingungsanfälligen Bauwerken, August 1986 (zurückgezogenes Dokument, ersetzt durch DIN 1055-4:2005)
- [N3] DIN 1055-4: 2005-03: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 4: Windlasten, März 2005
- [N4] DIN 1055-5: 2005-07: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 5: Schnee- und Eislasten, Juli 2005
- [N5] DIN 31051: 2003-06: Grundlagen der Instandhaltung, Juni 2003
- [N6] DIN 4134: 1983-02: Tragluftbauten: Berechnung, Ausführung und Betrieb, Februar 1983
- [N7] DIN 53354: 1981-02: Prüfung von Kunstleder, Februar 1981
- [N8] DIN 53363:2003-10: Prüfung von Kunststoff-Folien - Weiterreißversuch an trapezförmigen Proben mit Einschnitt, Oktober 2003
- [N9] DIN 53455: 1988-06: Prüfung von Kunststoffen – Zugversuch, Juni 1988 (zurückgezogenes Dokument, ersetzt durch DIN EN ISO 527)
- [N10] DIN 53515:1990-01: Prüfung von Kautschuk und Elastomeren und von Kunststoff-Folien - Weiterreißversuch mit der Winkelprobe nach Graves mit Einschnitt, Januar 1990
- [N11] DIN 53598-1: 1983-07: Statistische Auswertung an Stichproben mit Beispielen aus der Elastomer- und Kunststoffprüfung, Juli 1983
- [N12] DIN 53386: 1982-06: Prüfung von Kunststoffen und Elastomeren - Bewitterung im Freien, Juni 1982
- [N13] DIN EN 10204: 1995-08: Arten von Prüfbescheinigungen, August 1995

- 
- [N14] DIN EN ISO 10350-1:2001-03 (ISO 10350-1:1998), Deutsche Fassung EN ISO 10350-1:2000): Kunststoffe – Ermittlung und Darstellung vergleichbarer Einpunktkennwerte, Teil 1: Formmassen, März 2001
- [N15] DIN EN ISO 11403-1: 1994 (ISO 11403-1:1994, Deutsche Fassung EN ISO 11403-1:1999): Kunststoffe – Ermittlung und Darstellung vergleichbarer Vielpunktkennwerte – Teil 1: Mechanische Eigenschaften, 1994
- [N16] DIN EN ISO 11403-2: 1995 (ISO 11403-2:1995, Deutsche Fassung EN ISO 11403-2:1999), Kunststoffe – Ermittlung und Darstellung vergleichbarer Vielpunktkennwerte – Teil 2: Thermische und Verarbeitungseigenschaften, 1995
- [N17] DIN EN ISO 2286-2:1998-06, Juni 1998
- [N18] DIN EN ISO 291:1997-01 (ISO 291:1997; Deutsche Fassung EN ISO 291:1997): Kunststoffe – Normalklimate für Konditionierung und Prüfung, Januar 1997
- [N19] DIN EN ISO 4892-1: 2001-09: Kunststoffe - Künstliches Bestrahlen oder Bewittern in Geräten - Teil 1: Allgemeine Anleitung (ISO 4892-1:1999); Deutsche Fassung EN ISO 4892-1:2000; September 2001
- [N20] DIN EN ISO 4892-2: 2003-10: Kunststoffe - Künstliches Bestrahlen oder Bewittern in Geräten - Teil 2: Gefilterte Xenonbogenbestrahlung (ISO/DIS 4892-2:2003); Deutsche Fassung prEN ISO 4892-2:2003, November 2000, DIN EN ISO 4892-2 Entwurf: Oktober 2003
- [N21] DIN EN ISO 4892-3: 2004-01: Kunststoffe - Künstliches Bestrahlen oder Bewittern in Geräten - Teil 3: UV-Leuchtstofflampenstrahlung (ISO/DIS 4892-3:2003); Deutsche Fassung prEN ISO 4892-3:2003, Oktober 2000, DIN EN ISO 4892-3 Entwurf: Januar 2004
- [N22] DIN EN ISO 527-1: 1996-04: Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 1: Allgemeine Grundsätze, April 1996
- [N23] DIN EN ISO 527-3: 2003-07: Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 3: Prüfbedingungen für Folien und Tafeln, Juli 2003
- [N24] DIN EN ISO 899 – 1: 2003-10 (Deutsche Fassung: EN ISO 899-1:2003): Kunststoffe – Bestimmung des Kriechverhaltens, Teil 1: Zeitstand-Zugversuch (Ersatz für: DIN EN ISO 899 – 1: 1997-03 und DIN 53 444: 1990-01)
- [N25] DIN ISO 34 – Teil 1: 2004-07: Bestimmung des Weiterreißwiderstandes - Teil 1: Streifen-, winkel-, und bogenförmige Probekörper
- [N25] E DIN 53 370: 2002-04: Prüfung von Kunststoff-Folien – Bestimmung der Dicke mit mechanischer Abtastung, April 2002 (Entwurf)
- [N26] DIN EN 1990:2002-10 (Eurocode 0): Grundlagen der Tragwerksplanung, Oktober 2002
- [N27] DIN EN 1991-Teile 1 bis 4: (Eurocode 1): Einwirkungen
- [N28] DIN 53 765: 1994-03: Prüfung von Kunststoffen und Elastomeren – Thermische Analyse – Dynamische Differenzkalorimetrie (DDK)



---

## Vita

Karsten Moritz

- seit 2007            Leiter des Bereiches Forschung und Entwicklung (F&E)  
Covertex GmbH, Obing
- seit 2006            Lehrauftrag, Lehrgebiet Structural Design Concepts  
First International Master Programme for Membrane Structures (M.Eng.)  
Hochschule Anhalt (FH), Dessau
- 2000 bis 2007        Tragwerksplaner und Büropartner  
Engineering + Design GbR, Rosenheim  
Ingenieurbüro für Tragwerksplanung
- 2000 bis 2005        Wissenschaftlicher Assistent  
Fakultät für Architektur, Institut für Entwerfen und Bautechnik  
Lehrstuhl für Tragwerksplanung, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rainer Barthel  
Technische Universität München
- 1997 bis 1999        Stellvertretender Technischer Leiter und Projektleiter  
Koch Membrane Structures GmbH (später Skyspan Europe GmbH), Rimsting  
  
Mitarbeit (10/1998) im Büro Tensys Ltd., Bath (UK)  
Ingenieurbüro für Membranstatik
- 1992 bis 1997        Projektleiter und Planer  
Abteilung Hochbau/Architektur  
Obermeyer Planen + Beraten, Planungsgesellschaft für Bau, Umwelt, Verkehr  
und Technische Ausrüstung mbH, Niederlassung Hannover
- 1986 bis 1997        Studium der Architektur, Universität Hannover  
Abschluß: Dipl.-Ing. (Univ.)  
  
Studenten-Förderpreis *Textile Strukturen für neues Bauen* für den Entwurf des  
Freilichttheaters in Bremervörde, Tectextil Messe Frankfurt, 1995
- 1984 bis 1992        Studium des Bauingenieurwesens, Universität Hannover  
Abschluß: Dipl.-Ing. (Univ.), Vertiefungsrichtung: Konstruktiver Ingenieurbau  
  
Wissenschaftliche Hilfskraft, Institut für Grundbau, Bodenmechanik und  
Energiewasserbau (IGBE), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hanno Müller-Kirchenbauer,  
Fachbereich Bauingenieurwesen, Universität Hannover, 1987 bis 1991  
  
Werkstudent/Praktikant in verschiedenen Unternehmen, Bereiche Hoch-, Tief-  
und Bergbau, 1982 bis 1987
- 1982 bis 1983        Grundwehrdienst, Clausthal-Zellerfeld
- 1973 bis 1982        Robert-Koch-Gymnasium, Clausthal-Zellerfeld, Abschluß: Abitur
- 1969 bis 1973        Grundschule Bremerhöhe, Clausthal-Zellerfeld
- 1963                    Geburt in Hannover
-

