

Technische Universität München
Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen
Institut für Baustoffe und Konstruktion
Fachgebiet Leichtmetallbau und Ermüdung

Berechnungskonzept für die Klebflanschfestigkeit in Gesamtkarosseriemodellen

Cornelis Wirth

Vollständiger Abdruck der von
der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen
der Technischen Universität München
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs
genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. K. Schikora

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing., Dr.-Ing. habil. D. Kosteas
2. Univ.-Prof. Dr. rer. pol., Dr. rer. pol. habil., Dr. h. c. H. Wildemann

Die Dissertation wurde am 17.03.2004
bei der Technischen Universität München eingereicht und
durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen
am 11.06.2004 angenommen.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen eines Methodenentwicklungsprojektes in der Karosserieberechnungsabteilung des Forschungs- und Innovationszentrums der **BMW Group**. Aus der Arbeit an den verschiedenen Fahrzeugprojekten, insbesondere des 7er-Modelles, bei große Teile der Struktur auch geklebt sind, war die Aufgabe entstanden, eine Methode zur Festigkeitsberechnung von Karosserieklebungen zu entwickeln.

Neben der an den grundlegenden Materialmodellen interessierten Forschung in den entsprechenden Instituten verfolgt dabei die interne Methodenentwicklung das Ziel, Lösungen voranzutreiben, die in den bestehenden Berechnungsprozess direkt implementierbar sind. Während der Entwicklung dieses Berechnungskonzeptes stellte ich immer wieder fest, dass bestimmte mechanisch viel versprechend erscheinende Lösungsansätze aufgrund des enormen Aufwandes bei der Modellerstellung für die Verwendung in Fahrzeugprojekten nicht geeignet sind. Diese Orientierung an der Umsetzbarkeit einer Methode habe ich für mich als die besondere Herausforderung an einer Industriepromotion empfunden. Sie bedeutet einerseits eine Einschränkung der möglichen Lösungswege, andererseits aber hat man den Ansporn, die erarbeitete Methode schon bei der nächsten Fahrzeugentwicklung mit einfließen zu sehen.

Diese Arbeit wäre ohne die Unterstützung meines Doktorvaters und zahlreicher Kollegen bei **BMW** nicht möglich gewesen.

Ganz besonders möchte ich mich bei meinem Doktorvater Prof. Dr. Kosteas bedanken, der mich während der gesamten Arbeit in zahlreichen angeregten Gesprächen und Sachdiskussionen unterstützt, motiviert, gefordert und gefördert hat.

Prof. Dr. Wildemann danke ich für die Begutachtung der Arbeit und seine Tätigkeit als Zweitprüfer.

Meinen Kollegen Dr. Gabriel Tokar und Dr. Heinrich Werner danke ich für die vielen guten Ideen und befruchtenden Diskussionen. Dr. Martin Eis

und Dr. Petra Ritzenhoff haben mir bei der Probenherstellung und Materialbeschaffung viele nützliche Hinweise gegeben. Dr. Hans Gössing und Horst Stamm haben den Anstoß für das Thema gegeben. Ihnen möchte ich ebenso danken wie Daniel Heiserer und Dr. Gero Pflanz, die mir bei IT-Fragen mehrfach mit Rat und Tat zur Seite standen. Mein Dank gilt Vlad Popa für die schnelle Hilfe bei allen Problemen mit FE-Berechnungen. Rafael Stryczek danke ich für die Schaffung der angenehmen und motivierenden Rahmenbedingungen, die es mir ermöglicht haben, neben der Arbeit als Berechnungsingenieur diese Dissertation zu verfassen.

Für die zuverlässige und schnelle Durchführung und Auswertung der Versuchsreihen an der TU München gilt mein Dank Marianna Michaloudaki.

Inhaltsverzeichnis

Lateinische Formelzeichen	VII
Griechische Formelzeichen	VIII
Abkürzungen	IX
Kurzfassung - Abstract	X
1 Einleitung	1
2 Ziel der Arbeit	3
3 Kleben im Karosseriebau	4
3.1 Aufbau von Klebstoffen	5
3.2 Abbindemechanismus	6
3.3 Oberfläche der Fügeteile	6
3.4 Schubspannungs-Gleitungs-Verhalten	7
3.5 Thermomechanische Zustandsbereiche	8
4 Stand der Forschung	11
4.1 Versuche zur Klebfestigkeit	11
4.2 Beanspruchung von Klebungen - Spannungsanalysen	17
4.3 Versagenshypothesen	27
5 Versuchsprogramm	34
5.1 Werkstoffe	37
5.1.1 Stahlbleche	37
5.1.2 Klebstoff	37
5.2 Probenformen, Herstellung, Parameter	38
5.2.1 DB-Proben	38

5.2.2	T-Proben	41
5.2.3	KS-Proben	42
5.3	Anordnung und Prüfbedingungen	44
5.3.1	DB-Proben	44
5.3.2	T-Proben	45
5.3.3	KS-Proben	45
5.4	Versuchsergebnisse	47
5.4.1	Bruchlasten und Streuung	47
5.4.2	Auswertung nach Einflussgrößen	53
5.4.3	Kernaussagen	56
5.5	Diskussion der Ergebnisse	57
6	Kleblanschfestigkeit	66
6.1	Modellbildung	66
6.2	Parameter des Berechnungskonzeptes	67
6.3	Effektive Normalspannung	68
6.4	Effektive Schubspannung	72
6.5	Klebschichtmodell und Spannungsanalyse	73
6.6	Überlagerung und Ausnutzungsgrad	75
6.7	Validierung mithilfe der KS-Proben	76
7	Zusammenfassung und Ausblick	79
	Literaturverzeichnis	84

Lateinische Formelzeichen

<i>Größe</i>	<i>Bedeutung</i>
A	Fläche
b	Probenbreite, Klebschichtelementbreite
d	Klebschichtdicke
f	Fugenfüllungsgrad
h	Klebschichtelementhöhe
k_σ	Normalspannungsüberhöhungsfaktor
k_τ	Schubspannungsüberhöhungsfaktor
l	Klebschichtelementlänge
n	Anzahl der Einzelversuche
\hat{s}	Standardabweichung der Stichprobe
t	Fügeteildicke, Blechdicke
u	Überlappungslänge
u_0	Überlappungslänge der Grundversuche
v	Gegenseitige Verschiebung der Fügeteile
\hat{v}	Variationskoeffizient der Stichprobe
C_1	Approximationsvariable 1
C_2	Approximationsvariable 2
E	Elastizitätsmodul
E_F	Elastizitätsmodul des Fügeteiles
F	Kraft
F_b	Bruchkraft
\bar{F}_b	Mittelwert der Bruchkräfte
G	Schubmodul
G_k	Schubmodul des Klebstoffes
J_1	Erste Invariante des Spannungstensors
J_2'	Zweite Invariante des deviatorischen Spannungstensors
R_p	Fließgrenze
$R_{p0,2}$	0,2 %-Fließgrenze des Bleches

Griechische Formelzeichen

<i>Größe</i>	<i>Bedeutung</i>
α	Lastrichtungswinkel
β	Ausnutzungsgrad
γ	Gleitung
ε	Dehnung
ε_I	1. Hauptdehnung
ε_{II}	2. Hauptdehnung
ε_{III}	3. Hauptdehnung
ν	Querdehnungszahl
σ	Normalspannung
σ_{eff}	Effektive Normalspannung
σ_F	Fließnormalspannung
σ_{krit}	Kritische Normalspannung
σ_v	Vergleichsnormalspannung
σ_N	Nennnormalspannung
τ	Schubspannung
τ_{max}	Maximale Schubspannung
τ_{eff}	Effektive Schubspannung
τ_F	Fließschubspannung
τ_{krit}	Kritische Schubspannung
τ_v	Vergleichschubspannung
τ_N	Nennschubspannung

Abkürzungen

<i>Abkürzung</i>	<i>Bedeutung</i>
d. h.	das heißt
CAE	Computer Aided Engineering
CFK	Carbonfaser verstärkter Kunststoff
DB-Probe	Dreiblech-Probe
DIN	Deutsches Institut für Normung, Deutsche Industrienorm
FE	Finite Elemente
FEA	Finite-Elemente-Analyse
FEM	Finite-Elemente-Methode
KS-Probe	Kopfzug-Scherzug-Probe
KTL	Kathodische Tauchlackierung
PU	Polyurethan
T-Probe	T-förmige Schälprobe
v. a.	vor allem
z.B.	zum Beispiel
z.T.	zum Teil
z. Zt.	zur Zeit

Kurzfassung

Im Karosseriebau gewinnt die Verbindungstechnik Kleben immer größere Bedeutung. Um die Vorteile der Tragfähigkeit von Strukturklebungen als Leichtbau-Potenzial voll ausschöpfen zu können, muss die rechnerische Erfassung und Bewertung ihrer Eigenschaften in den virtuellen Auslegungsprozess integriert werden.

In dieser Arbeit wird ein Berechnungskonzept für die statische Festigkeit von geklebten Dünnscheiben aus Stahl entwickelt. Versuche an charakteristischen Flanschgeometrien liefern für einen typischen hochfesten Epoxid-Klebstoff ein semi-empirisches Versagenskriterium als Kombination von Normal- und Schubspannung, das an einer weiteren Probenform validiert wird.

Der vorgeschlagene Ausnutzungsfaktor der Klebschicht basiert auf der Umrechnung von Nennspannungen, die auch an Finite-Elemente-Modellen von Gesamtkarosserien berechnet werden können. Dadurch lässt sich die Methode für die schnelle Variantenbewertung im automatisierten CAE-Prozess anwenden.

Abstract

Adhesive bonding becomes a more and more important joining technology in car body construction. To take full advantage of the load carrying capacity of structural adhesive joints as light weight potential the the virtual design process must integrate the computational assessment of their properties has to be implemented.

In this work a computational concept for static strength of adhesively bonded thin steel sheets is developed. Tests with characteristic flange geometries provided a semi-empirical failure criteria for a typical high strength epoxy adhesive as a combination of normal and shear stress. It was validated with independent test results.

The suggested efficiency factor of the adhesive layer is based on nominal stresses, which also can be determined from finite element analysis of total vehicle structures. Therefor the method can be used for fast variant assessment in the automatic CAE process.

1 Einleitung

Seit der Entwicklung hochfester und v. a. zäher Strukturklebstoffe, die auch Crashbelastungen standhalten, hat die Klebtechnik im Karosseriebau massiven Einzug gehalten. Bis zu 160 m Klebnahtlänge stecken in einer modernen Leichtbaukarosserie. Durch die kontinuierliche Verbindung der Bauteile steigt nicht nur die Steifigkeit und die Crashtauglichkeit des Fahrzeuges, sondern auch die Festigkeit bei statischer und schwingender Belastung.

Bei der Entwicklung des Fahrzeuges ist es allerdings von entscheidender Bedeutung aus Sicherheitsgründen die Grenzen der Belastbarkeit und aus Gründen des kostengünstigen Einsatzes die besonders großen Potenziale beim Einsatz von Klebungen durch Simulationen im Voraus möglichst genau abschätzen zu können.

Die virtuelle Fahrzeugauslegung, d. h. die Berechnung der den Charakter des Fahrzeuges prägenden Funktionen und Eigenschaften, ohne dass ein tatsächlicher Prototyp existiert, ist dabei zu einem festen Baustein im Entwicklungsprozess geworden. Insbesondere aus wirtschaftlicher Sicht, birgt die virtuelle Auslegung entscheidende Vorteile:

- Einsparung von Prototypen, deren Bau enorme Kosten verursacht
- Optimierung und Absicherung von Funktionen zu einem sehr frühen Zeitpunkt im Entwicklungsprozess
- Schneller und effizienter Vergleich zahlreicher Konstruktionsvarianten
- Effizienter Materialeinsatz und damit Gewichts- und Kostenreduzierung durch die Möglichkeit intelligenter Optimierungsalgorithmen
- Quantifizierbarkeit der Funktionen
- Umfassende Visualisierung der Ergebnisse zur Erleichterung der Kommunikation und Beschleunigung des Entwicklungsprozesses

Wichtige Funktionen im Bereich der Karosserieentwicklung sind die Steifigkeit, die Crashtauglichkeit und die Festigkeit. Bei der Festigkeit, also der Fähigkeit der Struktur, bestimmten Belastungen standzuhalten, ohne Schaden zu nehmen, kommt den Verbindungsmitteln eine besondere Bedeutung zu. Verwendet wird im Karosseriebau hauptsächlich das Punktschweißen, das Linienschweißen, das Nieten und Clinchen und zunehmend das Kleben.

Das bedeutet, für die *virtuelle Festigkeitsauslegung* der Karosserie ist die *simulative Beherrschung der Verbindungsmittel* von entscheidender Bedeutung. Dies trifft für das *Kleben* und die anderen neueren Verbindungstechniken umso mehr zu, als sich deren ganzes Potenzial nur bei massivem Einsatz virtueller Methoden mit hoher Prognosesicherheit und Geschwindigkeit entfalten kann. Bei immer kürzeren Fahrzeugentwicklungszeiten mit immer weniger Hardwareschleifen in Form von *realen* Prototypen muss ein Teil der Erfahrung *virtuell* gewonnen werden.

2 Ziel der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist, ein Berechnungskonzept für die *statische Festigkeit von Klebverbindungen* zu entwickeln, das sich auch für die Berechnung *ganzer Karosseriemodelle* eignet. Es werden karosserietypische linienförmige Klebflansche in der Tragstruktur zur Verbindung dünner Stahlbleche mithilfe eines typischen hochfesten Strukturklebstoffes bei Raumtemperatur betrachtet. Es wird kohäsives Versagen in der Klebschicht vorausgesetzt. Das Finite-Elemente-Modell der Klebschicht muss sich für *inkompatible Netze*¹ eignen. Insbesondere müssen bei der Ableitung des Konzeptes folgende Teilaufgaben gelöst werden:

- Ermittlung der Beanspruchbarkeitswerte des relevanten Klebstoffes unter Berücksichtigung der dafür wichtigen Einflussgrößen
- Ermittlung der Beanspruchung der Klebschichten im Gesamtkarosseriemodell
- Ableitung von Korrekturfaktoren für einen formelmäßigen Vergleich der Beanspruchung unter Berücksichtigung der Modellierung und der Beanspruchbarkeit

Das Konzept soll dem Berechnungsingenieur bei der *Variantenbewertung* die Frage beantworten:

Wo befinden sich die kritischen Klebungen in der Karosserie und bei welcher Belastung werden sie versagen?

¹Die Bauteile des Klebflansches werden unabhängig voneinander vernetzt, so dass die Knoten der beiden FE-Netze nicht übereinander liegen. Eine genauere Beschreibung des Modelles folgt in 6.5.

3 Kleben im Karosseriebau

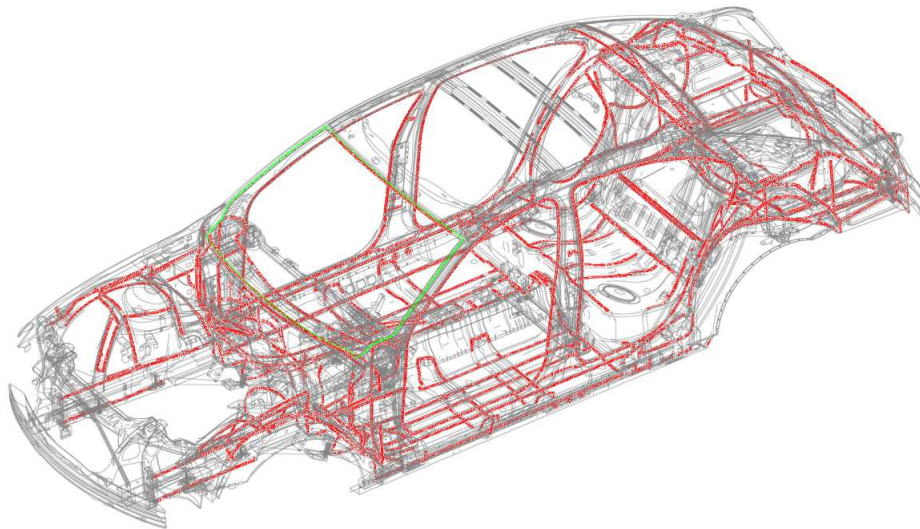


Abbildung 3.1: Beispiel für Klebumfänge in einer modernen Rohkarosserie

Die Klebungen in der Karosserie eines Personenkraftwagens lassen sich aus funktionaler Sicht in die folgenden Hauptgruppen einteilen:

- **Klebungen in der Tragstruktur** zur Verbindung von tragenden Teilen, häufig in Kombination mit Punktschweißen
- **Unterfütterungsklebungen** zum Anbinden von Versteifungsprofilen an Front- oder Heckklappe
- **Bördelfalzklebungen** zur Verbindung von Dünnsblechen an Türen und Klappen. Das Außenblech wird dabei um 180° umgefaltet (umgebördelt) und verklebt, um es mit dem Innenblech zu verbinden

- **Scheibenklebungen** zur Kraft übertragenden Verbindung der Scheibe mit der Fahrzeugtragstruktur

Im Folgenden wird genauer auf die **Klebungen in der Tragstruktur** eingegangen, da sie für die Erfüllung von Festigkeitsfunktionen in der Karosserie vorrangig eingesetzt werden und folglich auch für die virtuelle Festigkeitsauslegung von übergeordneter Bedeutung sind. Das Kapitel lehnt sich stark an [Hab97], das Standardwerk der Klebtechnik an. Bei den Strukturklebungen werden v. a. Epoxidharzklebstoffe mit Schubfestigkeiten von 10 bis 50 MPa häufig in Verbindung mit Schweißpunkten (Punktschweißkleben), Nieten oder Clinchverbindungen entlang von linienförmigen Flanschen zur Verbindung tragender Strukturbauteile im Rohbau eingesetzt. Die Klebungen dienen neben der Verbesserung der globalen Steifigkeit der Karosserie der Erhöhung der lokalen Festigkeit von Lasteinleitungsbereichen. Im Crashfall steigern sie die Energieaufnahme crashrelevanter Bauteile, indem sie das Aufplatzen von Trägern entlang der Flansche verhindern. Die typischen Klebschichtdicken dieser Klebungen liegen zwischen 0,1 und 1 mm.

3.1 Aufbau von Klebstoffen

Die Strukturklebstoffe gehören als Polymerverbindungen ihrem Aufbau nach zu den Kunststoffen. Ihr Ausgangsprodukt sind die Monomere. Dies sind einzelne Moleküle, die sich bei der Polyreaktion über ihre funktionellen Gruppen zu Makromolekülen, den Polymeren, zusammenschließen können. Während dieser chemischen Reaktion bauen die Atome oder Atomgruppen der Monomere aufgrund ihrer polaren Eigenschaften auch die Adhäsionskräfte zu den Fügeflächen auf. Die Polyreaktion der Epoxidharze wird *Polyaddition* genannt. Man spricht deshalb auch von Polyadditionsklebstoffen.

Der Aufbau der Polymere bestimmt stark ihre thermomechanischen Eigenschaften.

Die linear oder verzweigt aufgebauten Fadenmoleküle der *Thermoplaste* erweichen bei Erwärmung und werden bei Abkühlung wieder fest. Die räumlich eng vernetzten *Duromere* werden auch bei hohen Temperaturen nicht plastisch verformbar. Die *Elastomere* bestehen aus weitmaschig ver-

netzten Makromolekülen, die bis zur Zersetzungstemperatur relativ temperaturunabhängig elastisch reversibel verformbar bleiben.

Die im Automobilbau eingesetzten hochmoduligen Epoxid-Klebstoffe sind Thermoplaste, die in einer Nachvernetzungsreaktion zu Duromeren umgewandelt werden und deshalb auch oberhalb ihrer Applikationstemperatur fest bleiben.

3.2 Abbindemechanismus

Es werden die chemisch reagierenden Systeme, die physikalisch abbindenden Systeme und die reaktiven Schmelzklebstoffe unterschieden, zu denen auch die Epoxidharzklebstoffe gehören, die im Karosseriebau verwendet werden.

- Bei den chemisch reagierenden Systemen entsteht durch eine chemische Reaktion aus Monomer- oder Prepolymermolekülen in der Klebfuge eine polymere Klebschicht.
- Die physikalisch abbindenden Systeme bestehen bereits aus Polymerverbindungen. Durch Lösungsmittel oder erhöhte Temperatur werden sie in einen benetzungsfähigen Zustand gebracht. Eine chemische Reaktion findet in der Klebfuge nicht mehr statt.
- Die reaktiven Schmelzklebstoffe kombinieren die beiden Abbindemechanismen. Der Klebstoff wird im erwärmten Zustand (60–80 °C) auf die Bleche aufgetragen. Nach dem Fügen und der Abkühlung der Klebschicht hat die Klebung eine ausreichende Handhabungsfähigkeit für die nachfolgenden Prozessschritte, z.B. die Tauchlackierung. Die vollständige Aushärtung des Klebstoffes erfolgt dann über eine chemische Reaktion beim Erwärmen auf die Aushärtetemperatur. Dafür wird kein zusätzlicher Prozessschritt mehr benötigt, sondern die Hitze des Trocknungsofens im KTL-Prozess benutzt.

3.3 Oberfläche der Fügeteile

Die Fügetechnik Kleben muss sich im Karosseriebau in den Herstellungsprozess mit möglichst geringem Zusatzaufwand einpassen lassen. Ei-

ne aufwändige, aus mehreren Prozessschritten bestehende Oberflächen-Vorbehandlung, wie sie z.B. im Flugzeugbau angewendet wird, kommt aus Kosten- und Zeitgründen deshalb nicht in Frage. Sogar das Entfetten der Blecheteile findet aus produktionstechnischen Gründen erst unmittelbar vor dem Grundieren und Lackieren der fertig gefügten Karosserie statt. Die verwendeten Klebstoffe müssen folglich eine Ölverträglichkeit für Tiefzieh- und Korrosionsschutzöle besitzen. Sie besitzen die Fähigkeit, das Öl im Auftragsbereich aufgrund ihrer kleineren Oberflächenspannung zu verdrängen bzw. eine bestimmte Menge Öl physikalisch zu lösen.

Auch die Verzinkung der im Karosseriebau verwendeten Stahlbleche kann eine Rolle spielen. Nahezu alle Bleche sind entweder galvanisch oder feuerverzinkt, um eine entsprechende Korrosionsbeständigkeit zu gewährleisten. Für die Festigkeit der Verbindung sind daher auch die Haftung der Klebschicht auf der Zinkhydroxid- oder Zinkcarbonatschicht und die Haftung der Verzinkung auf der Stahloberfläche wichtig. Für reproduzierbare Festigkeiten wird kohäsives Versagen angestrebt.

3.4 Schubspannungs-Gleitungs-Verhalten und Schubmodul

Analog zum Spannungs-Dehnungs-Verhalten (σ - ε -Diagramm) bei Metallen wird das Schubspannungs-Gleitungs-Verhalten (τ - γ -Diagramm) bei Klebungen ermittelt, um typische Kenngrößen zu erhalten.

An der ermittelten Kurve lassen sich Schubmodul, Fließgrenze und Bruchspannung ablesen. In Abb. 3.2 auf Seite 9 sind die Spannungs-Dehnungs-Kurven von Stahl und einem Strukturklebstoff gegenübergestellt. Der Klebstoff wird im Vergleich zu gummielastischen, niedermoduligen Klebstoffen auf PU-Basis zwar hochmodulig genannt, im Vergleich zu Stahl ist er jedoch um etwa zwei Größenordnungen weicher.

Der Schubmodul ist für den elastischen Bereich definiert als

$$G = \frac{\tau}{\gamma}. \quad (3.1)$$

Dabei ist τ die Schubspannung in der Klebschicht und γ die Winkelverformung. Für sie gilt bei kleinen Verformungen $\tan \gamma = v/d$ mit der

gegenseitigen Verschiebung der Füge­teile v und der Klebschichtdicke d (s. Abb. 3.3, S. 9).

Der Schubmodul G ist abhängig von der inneren Verformungsmöglichkeit der Klebschicht. Sie wird einerseits von der Molekülbeweglichkeit des Polymers bestimmt und ist damit temperaturabhängig, andererseits ist sie eine Funktion des strukturellen Aufbaus des Polymers (Duromer oder Thermoplast). Der Schubmodul eignet sich daher zur Beschreibung des thermomechanischen Verhaltens einer Klebschicht.

Typische Werte hochmoduliger Klebstoffe in der Tragstruktur liegen um 600 MPa. Dies entspricht mit

$$E = 2(1 + \nu)G \quad (3.2)$$

und

$$\nu = 0,3..0,45$$

E-Moduln zwischen 1500 und 1800 MPa. Dies trifft auch auf den in dieser Arbeit verwendeten Klebstoff zu.

3.5 Thermomechanische Zustandsbereiche

Bei den Thermoplasten gibt es stark ausgeprägte charakteristische Zustandsbereiche, die voneinander durch den sog. Glaspunkt getrennt werden, oberhalb dessen es zu einem drastischen Abfall von E-Modul und Festigkeit kommt.

Bei den Duromeren sind die Bewegungsmöglichkeiten der Moleküle durch den hohen inneren Vernetzungsgrad so stark eingeschränkt, dass die Abhängigkeit von der Temperatur eher linearen Charakter hat. D.h. E-Modul und Festigkeit nehmen mit steigender Temperatur ab, bis schließlich die Zersetzungstemperatur erreicht ist.

Im Vergleich mit metallischen Werkstoffen ist die Temperaturabhängigkeit jedoch auch bei den Duromeren äußerst stark ausgeprägt, wie man in Abb. 3.4, S. 10 erkennen kann.

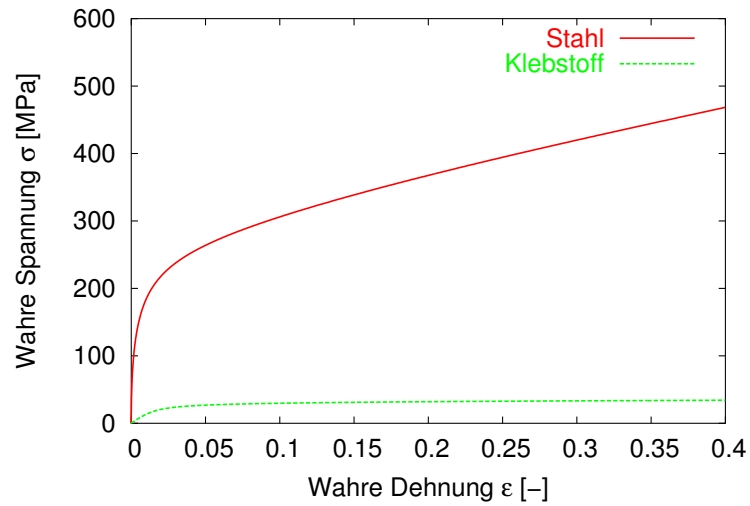


Abbildung 3.2: Typische Spannungs-Dehnungs-Kurven eines hochmoduligen Klebstoffes (Betamate 1496) und eines Tiefziehstahles (FeP04)

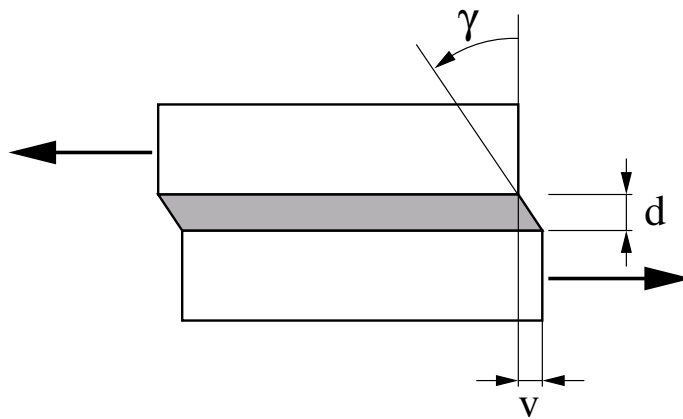


Abbildung 3.3: Skizze zur Definition der Gleitung

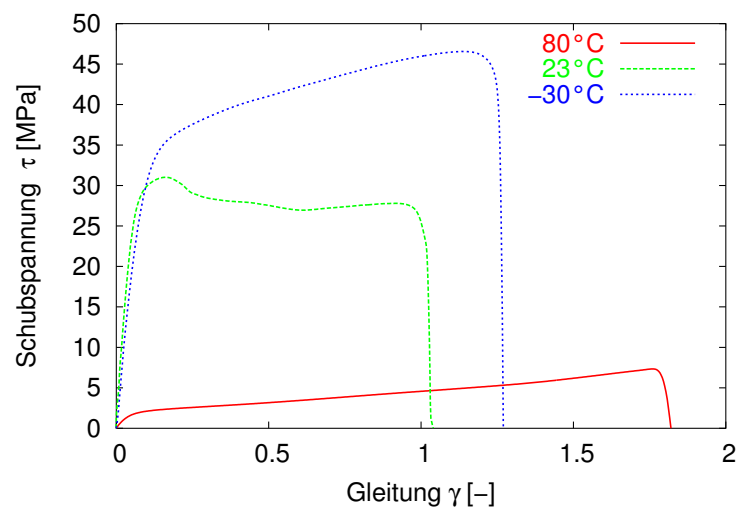


Abbildung 3.4: Einfluss der Temperatur auf die Schubspannungs-Gleitungs-Kurve eines hochmoduligen Klebstoffes (Betamate 1496)

4 Stand der Forschung

Die Auswertung der Literatur richtet sich nach den einzelnen Punkten der Zieldefinition aus Kapitel 2. Die Einteilung in *Beanspruchbarkeit*, *Beanspruchung* und *Versagenstypen* von Klebungen soll einen klaren Bezug zum anschließend vorgeschlagenen Lösungsansatz herstellen.

4.1 Versuche zur Klebfestigkeit

Für Klebversuche kommen unterschiedliche Probenformen in Frage: Substanzproben, einfach und doppelt überlappte Scherzugproben, Schälproben (wegen ihrer Form auch T-Proben genannt), Rohrproben und andere (vgl. Abb. 4.1 auf S. 11).

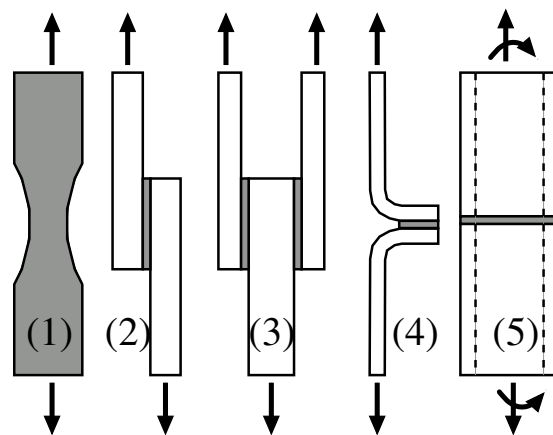


Abbildung 4.1: Probenformen zur Prüfung von Klebungen: Substanzprobe (1), einfach überlappte Scherzugprobe (2), doppelt überlappte Scherzugprobe (3), T-Schälprobe (4), Rohrprobe (5)

Um den großen Einfluss der Probenform auf die mit ihr ermittelten Eigenschaften der Klebung herauszuarbeiten, wird hier eine Unterscheidung in Klebstoff-, Klebschicht- und Klebflanscheigenschaften mit einem fortschreitenden Übergang von reinen Materialeigenschaften hin zu Verbindungseigenschaften eingeführt.

- Mithilfe der Substanzproben lassen sich **Klebstoffeigenschaften** ermitteln. An der schulterförmigen Probe aus ausgehärtetem Klebstoff kann im Zugversuch die Spannungs-Dehnungs-Kurve ermittelt werden. Je nach Herstellungsmethode der Probekörper ergibt sich ein bestimmter morphologischer Aufbau. Dieser entspricht jedoch nicht dem Aufbau einer Klebschicht zwischen zwei Fügeteilen.¹

Ebenso wenig bilden sich bei der Aushärtung der Substanzproben die entsprechenden Eigenspannungen aus, die evtl. in einer fügeteilbeeinflussten Klebschicht vorhanden sind.

Beim Zugversuch selbst kann sich durch die unbehinderte Querkontraktion der Probe ein einachsiger, homogener Zugspannungszustand einstellen.

Umgekehrt muss dann aber bei der Beanspruchungsermittlung für reale Klebverbindungen, deren lokaler mehrachsiger und stark inhomogener Spannungszustand ermittelt und anschließend durch entsprechende Materialmodelle auf den einachsigen Spannungszustand für den Vergleich mit dem Beanspruchbarkeitskennwert umgerechnet werden können.

- **Klebschichteigenschaften**

Im Gegensatz zu den Klebstoffeigenschaften der Substanzprobe ergeben sich bei allen Klebverbindungsproben, die definitionsgemäß aus Fügeteilen und Klebschicht bestehen, schon während der Aushärtung bestimmte fügeteilbeeinflusste Eigenschaften. Zum einen entsteht in der Grenzschicht der Klebschicht ein charakteristischer morphologischer Aufbau zu den Fügeteilen hin, die sich bei der Substanzprobe

¹Kötting hat in [Kö84] für Klebungen von Aluminiumlegierungen nachgewiesen, dass die grenzschichtnahe von der Fügeteiloberfläche ausgehende lamellenartige Struktur andere Verformungseigenschaften besitzt als die eher globular strukturierte mittlere Klebschichtebene (vgl. Abbildung 4.4, S. 16).

so nicht ausbilden können. Zum anderen hat die Querdehnungsbehinderung durch die im Vergleich zum Klebstoff steifen Füge­teile einen großen Einfluss auf die Verformungseigenschaften der Klebschicht. Dieser starke Effekt der Füge­teile rührt auch aus den stark unterschiedlichen geometrischen Größenverhältnissen in Klebschichten her. Wie die Bezeichnung *Schicht* schon sagt, ist die räumliche Ausdehnung in Dickenrichtung um ein Vielfaches kleiner als in Längs- und Breitenrichtung. Der allergrößte Teil der Oberfläche des Klebschichtquaders wird somit mechanisch und morphologisch durch die angrenzenden Füge­teile bestimmt.

Den Unterschied zwischen Klebschichteigenschaften und den anschließend beschriebenen Klebflanscheigenschaften erkennt man am besten in Abb. 4.2 auf S. 14: Die in (b) erkennbaren Verformungen und daraus resultierenden Spannungen der Klebschicht rühren allein von der gegenseitigen Verschiebung der ideal starr angenommenen Füge­teile her, sie werden hier als Dehnungen und Spannungen I. Ordnung bezeichnet. Es resultiert aus dieser Belastung ein konstanter Schubspannungsverlauf in der Klebschicht.

- **Klebflanscheigenschaften**

In 4.2, S. 14 (c) sind die Füge­teile nicht mehr ideal starr, sondern elastisch. Sie erfahren durch die aufgebrachte Belastung eine Zugdehnung. Diese Dehnung übertragen sie aufgrund der gekoppelten Verschiebungen entlang der Grenzschicht auf die Klebschicht. Ihr wird also z.B. am Punkt B und C eine zusätzliche Verformung aufgrund der Füge­teildeformation aufgezwungen. Daraus resultiert ein inhomogener Schubspannungsverlauf in der Klebschicht entlang der Überlappungslänge. An den Enden mit der größten lokalen Verformung herrschen die Maximalwerte, in der Mitte, wo sich die Füge­teildehnungen gegenseitig kompensieren, die Minimalwerte. An praktisch allen Proben in der Realität ermittelt man also im Versuch Klebflanscheigenschaften, da ideal starre Füge­teile praktisch nicht existieren. Der Einfluss der Füge­teildehnungen wird umso größer, je geringer der Steifigkeitsunterschied zwischen Füge­teilen und Klebschicht wird.

Ein weiterer wichtiger Effekt beim Übergang von starren auf elastische Füge­teile ist das Auftreten einer Verdrehung der Fügezone

(vgl. Abb. 4.3, S. 15). Wegen des Versatzes der Füge­teile bezogen auf die Lastrichtung entsteht durch die Lastüberleitung vom einen zum anderen Füge­teil ein Biegemoment, das den Fügebereich verkippt. Dadurch erfährt die Klebschicht zusätzliche Normalspannungen.

Mit dem Begriff der Spannungen und Dehnungen II. Ordnung werden hier beide Effekte zusammengefasst: zusätzliche Spannungen und Dehnungen in der Klebschicht aufgrund von Füge­teilverformungen verursacht durch Biegemomente und Normalkräfte in den Füge­teilen.

Bei Versuchen an Proben aus verklebten Dün­nblechen überlagern sich also alle oben genannten Wirkungen. Die ermittelten Eigenschaften werden in dieser Arbeit zusammenfassend als Kleb­flanscheigenschaften bezeichnet.

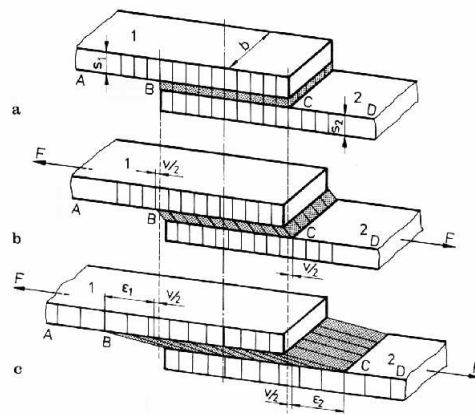


Abbildung 4.2: Verformungen in der Klebschicht bei Belastung: unbelasteter Zustand (a), Schubverformung v der Klebschicht bei ideal starren Füge­teilen (b), überlagerte Verformung durch zusätzliche elastische Dehnung ϵ_1 und ϵ_2 der Füge­teile (c) (aus [Hab97], S.378)

In [RS95, SRK99] wird ausführlich auf die Problematik der zu verwendenden Probekörper eingegangen und der Scherzugversuch nach DIN 54451 als der Grundversuch zur Ermittlung der τ - γ -Funktion von Klebschichten

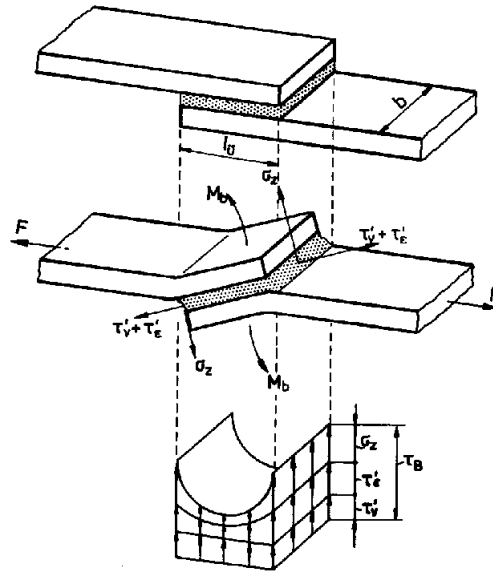


Abbildung 4.3: Verdrehung der Fügezone durch exzentrische Lasteinleitung (aus [Hab97], S.380)

diskutiert. Die Autoren zeigen, dass selbst bei der *Dicken Scherzugprobe* nach dieser DIN keine Klebschichteigenschaften im obigen Sinne ohne eine Verformungskorrektur der Füge Teile ermittelt werden können.

Für ein Auslegungsverfahren ist es entscheidend, dass der in Versuchen ermittelten Beanspruchbarkeit und der in der Simulation berechneten Beanspruchung die gleichen Voraussetzungen zu Grunde liegen: Gelingt es, im Versuch durch die Verwendung von möglichst dicken und damit steifen Füge teilen in Verbindung mit kurzen Überlappungslängen die Spannungen II. Ordnung soweit wie möglich zu minimieren, kann man für die Klebschicht von einem homogenen Spannungs- und Dehnungszustand ausgehen. Die tatsächliche Beanspruchung ist also nur von der aufgebracht Last und der Klebfläche abhängig:

$$\tau = \tau_N = \frac{F}{A}$$

Die Beanspruchbarkeit ist dann als maximal ertragbare Schubspannung

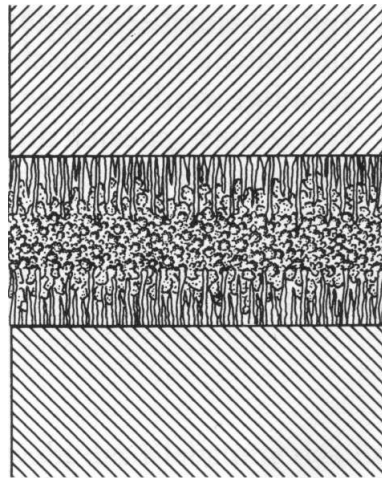


Abbildung 4.4: Morphologischer Aufbau einer Klebschicht (aus [Hab97], S. 263)

definiert durch

$$\tau_{max} = \frac{F_B}{A}.$$

Dementsprechend muss man für den allgemeinen Spannungszustand in der auszulegenden Klebschicht den *lokalen Spannungszustand* mit seinen Spannungsspitzen kennen und über ein Materialgesetz zur Umrechnung in eine Vergleichsspannung verfügen. Die Klebschicht wird versagen, wenn die lokale Vergleichsspannung den maximal ertragbaren Wert überschreitet:

$$\tau_v \geq \tau_{max}$$

Mit den Berechnungsansätzen zur Ermittlung des Beanspruchungszustandes beschäftigt sich der nächste Abschnitt.

4.2 Beanspruchung von Klebungen - Spannungsanalysen

1938 veröffentlichte Volkersen [Vol38] den ersten Berechnungsansatz für den lokalen Spannungsverlauf in Klebverbindungen. Die Arbeit behandelte zwar die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen, durch die Idealisierung eines Nietes als homogene Fläche in Größe der verbundenen Flansche eignet sich der Ansatz aber auch zur Spannungsrechnung in einschnittig überlappten Klebverbindungen und wurde später von ihm auch in dieser Weise erweitert ([Vol53]).

Volkersen trifft folgende Annahmen:

- Die auftretenden Verformungen sind klein,
- Querschnitte bleiben eben.
- Die Klebschicht wird als homogen betrachtet,
- für Klebschicht und Füge­teile nimmt er jeweils ein linear-elastisches Stoffgesetz an.
- Biegemomente werden vernachlässigt.
- Die Füge­teile haben gleiche Abmessungen und besitzen das gleiche Deformationsverhalten.
- Die Klebschicht überträgt ausschließlich Schubspannungen.

Nach Ansatz der Gleichgewichtsbedingung und Einsetzen von Stoffgesetz und Kinematik für Füge­teile und Klebschicht kommt Volkersen schließlich auf eine Differenzialgleichung zweiten Grades. Deren Lösung führt auf folgende Gleichung für die Schubspannungsverteilung über der Klebschichtlänge in Abhängigkeit von der mittleren Schubspannung (Nennschubspannung):

$$\tau(x) = \tau_N \frac{\sqrt{\Delta/\omega}}{\sinh(\sqrt{\omega\Delta})} \left[(\omega - 1) \cosh\left(\sqrt{\omega\Delta} \frac{x}{u}\right) + \cosh\left(\sqrt{\omega\Delta} \left(1 - \frac{x}{u}\right)\right) \right] \quad (4.1)$$

mit

$$\Delta = \frac{G_k u^2}{E_F t_1 d} \quad \text{und} \quad \omega = \frac{t_1 + t_2}{t_1}$$

Es ergibt sich der für Klebverbindungen typische Schubspannungsverlauf mit den Spannungsüberhöhungen an den beiden Enden der Klebschicht (vgl. Abb. 4.7, S. 21).

Um die Effekte der getroffenen Annahmen der analytischen Lösung von Volkersen zu zeigen, wurden Vergleichsrechnungen mit einem *sehr feinen* Finite-Elemente-Modell (s. Abb. 4.5, S. 18) für die Schubspannungsverteilung in der Klebschicht einer Dreiblechprobe gemacht.

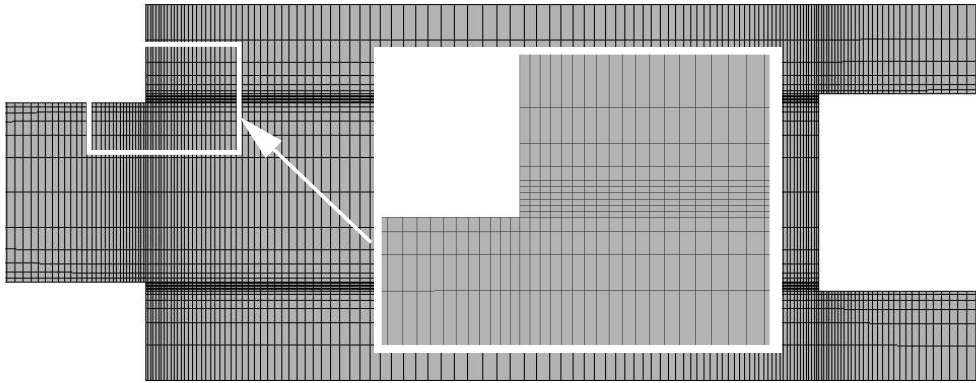


Abbildung 4.5: Ausschnitte aus FE-Feinmodell (6 Elemente über der Klebschichtdicke) der Dreiblechprobe zum Vergleich mit der Volkersen-Lösung

Die weitreichende Annahme der Vernachlässigung von Biegemomenten, die in der einfach überlappten Scherzugprobe in der Realität immer auftreten, ist durch die Verwendung der Dreiblechprobe mit ihrer symmetrischen Lastüberleitung bereits weitgehend gewährleistet. Die an der Kraftüberleitung beteiligten Normalspannungen sind in der genannten Probenform gering. Auch die Annahme kleiner Verformungen ist bei der FE-Rechnung nachvollziehbar. Für Fügepart und Klebstoff wurde ebenfalls linear-elastisches Materialverhalten angenommen.

Das Grundmodell hat allerdings an beiden Enden der Klebschicht freie Ränder, an denen der ebene Dehnungszustand in den ebenen Spannungszustand übergeht. Es kann sich im FE-Modell also eine freie Verwölbung der Querschnitte einstellen, die in der analytischen Lösung von Volkersen nicht möglich ist, da er ein Ebenbleiben der Querschnitte voraussetzt.

Die Schubspannungen sind für die FE-Lösung jeweils in der Mitte der Klebschicht ausgewertet.

Die Annahme der ausschließlich Schub übertragenden Klebschicht im Volkersen-Ansatz wird in der FE-Rechnung auch nicht berücksichtigt. Dies zeigt sich besonders stark in Variante 3 mit gleichem E-Modul für Füge teil und Klebschicht. Dann findet die Kraftübertragung vom einen Blech zum anderen zu einem nicht unwesentlichen Teil auch über Normalkräfte in der Klebschichtebene statt. Es zeigen sich starke Abweichungen zwischen dem numerisch und dem analytisch ermittelten Spannungsverlauf (s. Abb. 4.9, S. 22 und 4.11, S. 23).

Variante 1a) (s. Abb. 4.6, S. 21) zeigt die Gegenüberstellung für realistische E-Moduln. Klebstoff: 1.600 MPa, Füge teile: 210.000 MPa. Die Kurven zeigen gute Übereinstimmung. An den freien Rändern fällt die Schubspannung in der FE-Rechnung wie erwartet gemäß des Satzes von der Zuordnung der Schubspannungen auf Null ab.

Variante 1b) (s. Abb. 4.7, S. 21) bildet dagegen die Annahme vom Ebenbleiben der Querschnitte nach, indem die Knoten auf dem freien Rand durch Koppelgleichungen an die Verschiebungen der beiden Eckknoten auf der Grenzlinie Füge teil-Klebschicht gebunden sind, d. h. sie können sich nur in x-Richtung und auf einer gemeinsamen Verbindungslinie verschieben.

Die Übereinstimmung ist noch besser, die FE-Spannungen am Rand gehen nicht mehr auf Null zurück, da durch die Kopplung Kräfte übertragen werden können.

Variante 2a) (s. Abb. 4.8, S. 22) und 3a) (s. Abb. 4.9, S. 22) veranschaulichen den Effekt der Normalkraftübertragung in der Klebschicht. Bei dem sehr weichen Kleber in Variante 2 ($E_K = 10$ MPa) gibt die Lösung von Volkersen die Realität gut wieder, da hier praktisch keine Normalkräfte übertragen werden müssen. Variante 3 ($E_K = E_F = 210.000$ MPa) zeigt dagegen große Unterschiede zwischen FE- und analytischen Schubspannungen. Eine Lastüberleitung allein durch Schubspannungen, wie bei Volkersen gefordert, ist hier nicht mehr realistisch. In den Varianten 2b) und 3b) sind in der numerischen Lösung jeweils die Knoten auf den freien

Klebschichträndern gekoppelt (s. Abb. 4.10, S. 23 und Abb. 4.11, S. 23).

Grundsätzlich ist also eine sehr gute Übereinstimmung von analytischer Lösung und Finite-Elemente-Lösung innerhalb der jeweils getroffenen Annahmen festzustellen. Es sei aber bereits an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen, dass es sich um ein sehr feines FE-Netz der Klebschicht und der Füge Teile handelte, d. h. die Klebschicht bestand aus sechs Elementen über der Dicke und 120 Elementen über der Überlappungslänge. Dieser Feinheitsgrad führt in Gesamtkarosseriemodellen zu einer explodierenden Elementanzahl.

Auf der Lösung von Volkersen aufbauend entstanden weitere analytische Lösungen des Problems, die zusätzlich die Biegung des Fügebereichs, Normalspannungen sowie elastisch-plastisches Materialverhalten berücksichtigten. Voraussetzung für alle analytischen und empirisch angepassten analytischen Lösungen bleibt allerdings die einfache Grundgeometrie der überlappten Scherzugprobe. Eine Erweiterung auf allgemeine Bauteilgeometrien mit kombinierten Beanspruchungszuständen ist nicht ohne weiteres möglich.

Neben den analytischen Lösungen für die Spannungsanalyse in Klebschichten wurden von zahlreichen Autoren Finite-Elemente-Lösungen untersucht.

So widmen sich Hahn und Wender in [HOL82, HW84, HW85] einer systematischen Parameterstudie des Beanspruchungszustandes einschnittig überlappter, geklebter aus Metall bei linear-elastischem Verformungsverhalten. Dabei werden auch unsymmetrische Verhältnisse im Sinne von unterschiedlichen Werkstoffen, Füge teildicken und Klebstoffkehrändern behandelt. Es wird dabei jeweils die untersuchte Einflussgröße des einen Füge teils konstant gehalten und die des anderen variiert. Die rechnerischen Ergebnisse werden mit Versuchen verglichen.

Es ergeben sich für die Variation des E-Moduls folgende qualitative Aussagen für den Bereich der Fügezone: Die Spannungen im Füge teil mit dem höheren E-Modul sind im Vergleich zum Füge teil mit dem niedrigeren E-Modul höher. Die Randzone der Klebschicht auf der dem weicheren Füge teil zugewandten Seite ist allerdings stärker beansprucht, da hier die größeren Verformungen stattfinden. Je weiter die E-Moduln der Füge teile auseinanderliegen, umso stärker ausgeprägt ist die Inhomogenität der Klebstoffbeanspruchung über der Dicke.

Für die Variation der Füge teildicke wurde die Blechdicke des einen

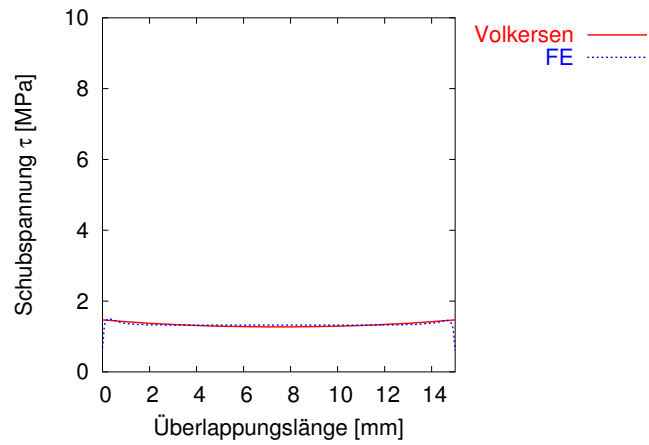


Abbildung 4.6: Variante 1a): Schubspannungen in Klebschicht; Vergleich analytische Lösung – FEA; $E_K = 1.600 \text{ MPa}$, $E_F = 210.000 \text{ MPa}$, FE-Modell mit freiem Rand

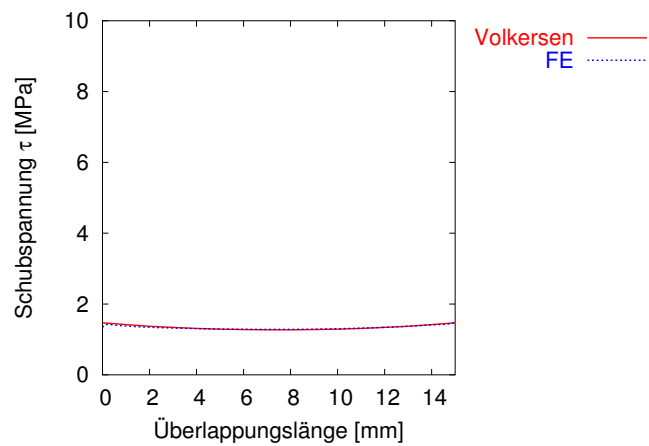


Abbildung 4.7: Variante 1b): Schubspannungen in Klebschicht; Vergleich analytische Lösung – FEA; $E_K = 1.600 \text{ MPa}$, $E_F = 210.000 \text{ MPa}$, FE-Modell mit gekoppelten Randknoten

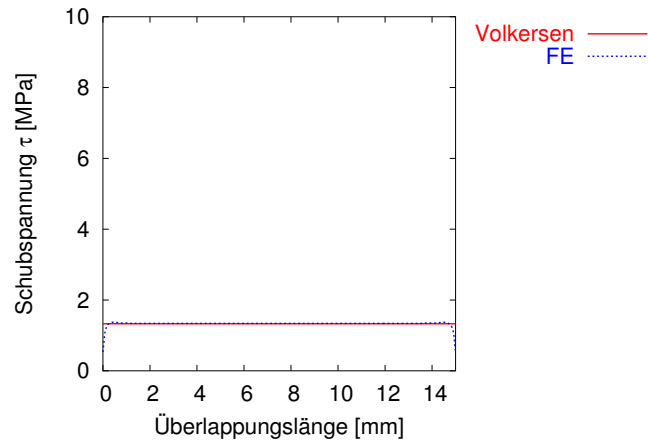


Abbildung 4.8: Variante 2a): Schubspannungen in Klebschicht; Vergleich analytische Lösung – FEA; $E_K = 10$ MPa, $E_F = 210.000$ MPa, freier Rand

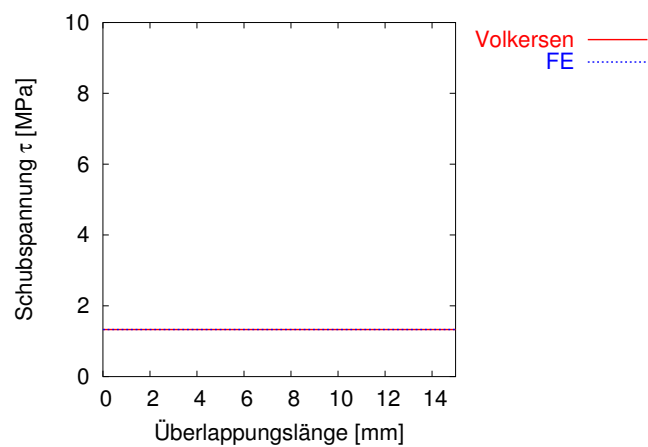


Abbildung 4.9: Variante 2b): Schubspannungen in Klebschicht; Vergleich analytische Lösung – FEA; $E_K = 10$ MPa, $E_F = 210.000$ MPa, FE-Modell mit gekoppelten Randknoten (Die Kurven fallen praktisch zusammen.)

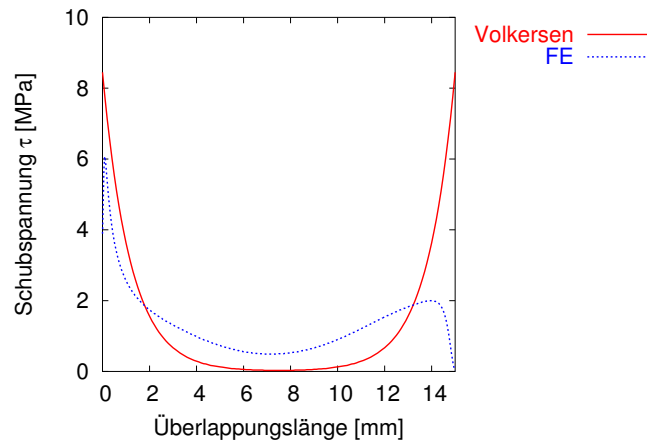


Abbildung 4.10: Variante 3a): Schubspannungen in Klebschicht; Vergleich analytische Lösung – FEA; $E_K = E_F = 210.000$ MPa, freier Rand

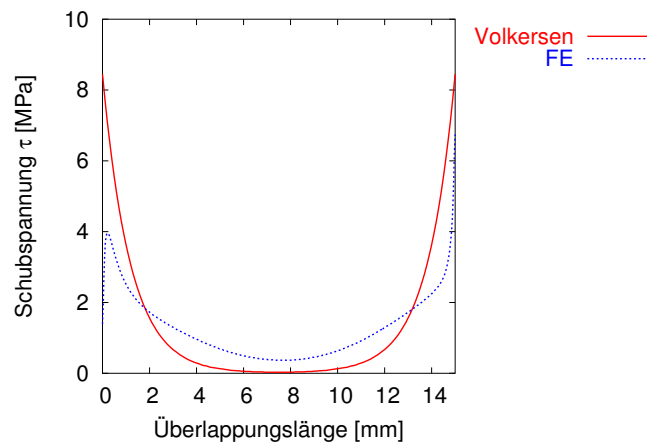


Abbildung 4.11: Variante 3b): Schubspannungen in Klebschicht; Vergleich analytische Lösung – FEA; $E_K = E_F = 210.000$ MPa, FE-Modell mit gekoppelten Randknoten

Fügeteiles konstant gehalten und die des anderen variiert. Die höhere Vergleichsspannung tritt wie erwartet im dünneren Fügeteil auf. Die Beanspruchung der Klebschicht, ausgedrückt durch die normierte Schubspannung bzw. die Hauptzugdehnung, nimmt folglich mit kleinerer Blechdicke des variierten Fügeteiles auch stark zu.

Der Einfluss der Blechdicke spielt offensichtlich eine weit stärkere Rolle als der des E-Moduls.

So nimmt der Maximalwert der Schubspannungsüberhöhung (Spannungsspitzenfaktor = τ_{max}/τ_m) in der Klebschicht am Überlappungsende auf der Seite des variierten Fügeteiles bei einer Steigerung des E-Moduls von 70.000 MPa auf 210.000 MPa (= 300 %) von 4,2 auf 3,0 ($\approx 30\%$), bei einer Steigerung der Blechdicke von 0,8 mm auf 2,4 mm (= 300 %) von 7,0 auf 3,7 ($\approx 50\%$) ab.

Abschließend werden in [HW84] sog. Netztafeln aufgestellt, mit deren Hilfe eine Ermittlung der höchsten Beanspruchung in der Klebschicht und im Fügeteil möglich ist. Um jeweils einen charakteristischen Wert als Maß der Beanspruchung anzugeben, wird für die Fügeteile die Vergleichsspannung nach von Mises und für die Klebschicht die maximale Hauptzugdehnung herangezogen. Als ertragbarer Grenzwert wird eine kritische Hauptzugdehnung von $\varepsilon_I = 0,8\%$ vorgeschlagen, bei der erste Schädigungen in der Klebschicht auftreten (vgl. [Ott78]). Zur Berücksichtigung der bei der Fertigung entstehenden Klebstoffkehlränder, die zu einer geringeren Spannungs- und Dehnungsüberhöhung an den Überlappungsenden führen als die in den Experimenten verwendeten scharfen Kanten, darf die berechnete Hauptzugdehnung um 30 % abgemindert werden.

Da keine Trennung zwischen den Einflüssen der Fügeteilverformung in Längsrichtung, die eine direkte Beanspruchung der angrenzenden Klebschichttrandzone verursacht, und dem Rotationseffekt durch die unterschiedlich hohen Biegemomente in Folge der geometrischen Exzentrizitäten bzw. der unterschiedlichen Biegesteifigkeiten, die zu Zugbeanspruchung in der Klebschicht führt, stattfindet, ist eine Übertragung der Ergebnisse auf allgemeine Klebverbindungsgeometrien nur bedingt möglich.

In [CP86, CSD98, CSD99, DS93, DS95, LLST99, PSS99] werden Zugversuche an verschiedenen Probengeometrien mithilfe von linearen oder nicht-linearen Finite-Elemente-Modellen nachgerechnet und z.T. sehr gute Übereinstimmung der Last-Verformungs-Kurven erreicht. Allen Ansätzen ist dabei die *detaillierte Vernetzung* der Klebschicht mit mehreren Ele-

menten über der Klebschichtdicke und der Überlappungslänge gemeinsam. Neben der großen Anzahl von Elementen ergibt sich insbesondere für die linear-elastischen Ansätze ein Singularitätsproblem. Jeweils an den Ecken der Klebschicht führt eine zunehmende Netzverfeinerung zu immer weiter ansteigenden Spannungen, wenn diese als scharfe 90° -Winkel modelliert sind. D. h. die berechneten Spannungen konvergieren trotz einer immer feineren Diskretisierung² nicht. Die Spannungen sind in diesen Bereichen also hochgradig netzabhängig.

Bei den elastisch-plastischen Modellen, können sich die Spannungsspitzen durch Umlagerung abbauen. Das setzt aber wiederum eine ausreichend feine Vernetzung mit ausreichend vielen Elementschichten über der Klebschichtdicke und zahlreichen, besonders an den Klebschichtträndern verdichteten Elementen entlang der Überlappungslänge voraus.

Die Auswertung der Literatur hinsichtlich der Beanspruchungsanalyse in der Klebschicht lässt sich in Bezug auf die Zielsetzung der Arbeit (siehe Kap. 2) folgendermaßen zusammenfassen: Die vorgeschlagenen analytischen Lösungen haben den großen Nachteil der Probengeometrieabhängigkeit. Bei den Finite-Elemente-Lösungen tritt das Problem auf, dass nur eine feine Vernetzung zu realistischen lokalen Spannungsverläufen in der Klebschicht führt. Es ergeben sich dann die typischen Spannungsverläufe in der Klebschicht einer schubspannungsdominierten Scherzugprobe (vgl. Abb. 4.12, S. 26) und einer normalspannungsdominierten Schälprobe (vgl. Abb. 4.12, S. 26). Der Schubspannungsverlauf der Scherzugprobe zeigt an den Enden der Klebschicht etwas höhere Werte als in der Mitte, ist dabei aber viel ausgeglichener als der Normalspannungsverlauf der Schälprobe, der geprägt ist von einem sehr kleinen Bereich extrem hoher Spannungen, die relativ schnell auf Werte um Null abfallen.

Der Spannungsverlauf ist dabei abhängig von der Fügeteildicke, der Klebschichtdicke, den E-Moduln von Fügeteil und Klebschicht, der Überlappungslänge, der Belastungshöhe und in ganz entscheidendem Maß von der geometrischen Ausgestaltung der Klebschichtkehlränder.

Für die Entwicklung eines Berechnungskonzeptes für die Klebflanschfestigkeit, das für Gesamtkarosseriemodelle eingesetzt werden soll, ist die

²Theoretisch würden die Spannungen gegen unendlich gehen, wenn die Elementkantenlänge gegen Null geht. In der Realität tritt dieses Problem nicht auf, weil es keine ideal scharfen Ecken gibt, bzw. durch Plastifizierung des Materials im höchstbelasteten Bereich eine Spannungsumlagerung stattfindet.

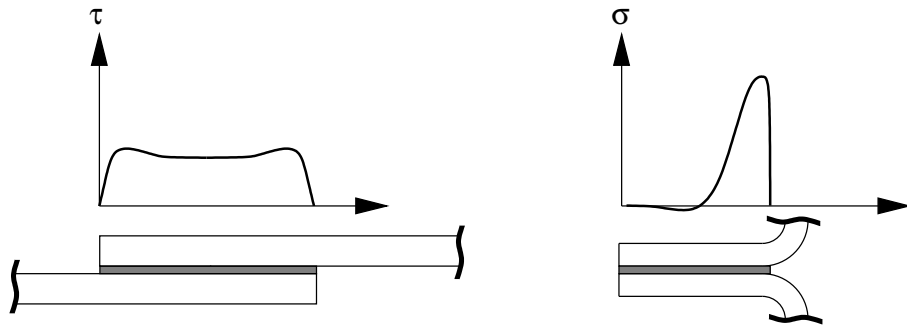


Abbildung 4.12: Typischer Schubspannungsverlauf einer Scherzugprobe und Normalspannungsverlauf in einer Schälprobe)

rechnerische Ermittlung des lokalen Spannungsverlaufes in den Klebschichten aufgrund der benötigten detaillierten Vernetzung kein gangbarer Weg. Nimmt man drei Elemente über die Klebschichtdicke, 15 Elemente über die Überlappungslänge und ein maximal zulässiges Elementkantenlängenverhältnis für Länge zu Breite zu Höhe eines Hexaederelementes von 10/10/1 an, so ergibt sich für eine angenommene Klebschichtdicke von 0,2 mm und eine Klebflanschlänge von 160 m überschlagsmäßig die Elementanzahl von 10,8 Mio. Klebschichtelementen. Selbst eine Reduzierung auf ein Zehntel dieser Zahl durch intelligente Vernetzung und Elementansätze mit größeren zulässigen Elementkantenverhältnissen, hätte zur Folge, dass die Modelle so derzeit nicht mehr rechenfähig wären.

Eine mögliche Abhilfe könnten modellierungsabhängige Versagenshypothesen bieten, deren Ziel nicht die Erfassung der tatsächlichen Spannungsspitzen ist, sondern bei denen eine Abstimmung auf eine vorgeschriebene Elementierung stattfindet.

Im folgenden Abschnitt wird zunächst allgemein auf die für Klebschichten typischen Versagenshypothesen eingegangen, da sie auch den modellierungsabhängigen Ansätzen als Grundlage dienen.

4.3 Versagenshypothesen

Der Begriff *Versagen* darf an dieser Stelle nicht automatisch als Bruch der Verbindung mit einer vollkommenen Trennung der Füge­teile verstanden werden. Das Versagen wird vielmehr spezifisch für die einzelnen Hypothesen definiert (z. B. als der Fließbeginn, als ein bestimmter Wert der plastischen Dehnung, oder als der Punkt der Kraft-Verformungs-Kurve, bei der die Probe keine weitere Laststeigerung mehr erträgt).

Beim Versagen von Klebverbindungen treten grundsätzlich drei unterschiedliche Versagensarten auf:

- Füge­teilversagen
- Versagen in der Klebschicht (kohäsives Versagen, Kohäsionsbruch)
- Versagen zwischen dem Füge­teil und der Klebschicht (adhäsives Versagen, Adhäsionsbruch)

Was das Füge­teilversagen angeht, kommen hierfür die gängigen Methoden der Festigkeitsanalyse zum Einsatz. Sie werden in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

Adhäsives Versagen ist der Formulierung von Versagenshypothesen schwer zugänglich, nicht zuletzt deswegen, weil die Ermittlung von Materialparametern für die Grenzschicht zwischen Füge­teil und Klebschicht besonders schwierig ist. In dieser Arbeit wird deshalb ebenso wie im größten Teil der Literatur, die sich mit der Untersuchung von Versagenshypothesen befasst, die Grundannahme kohäsiven Versagens getroffen. Daraus folgt die Bedingung, dass sämtliche Probekörper zur Ableitung einer Bemessungsformel auch wirklich nur kohäsiv versagen dürfen. Beim hier untersuchten Klebstoff trifft dies für die verwendeten Bleche zu.

Eine weitere Einschränkung der betrachteten Versagenshypothesen wird gemäß der Zielsetzung dieser Arbeit hinsichtlich der Belastungsart getroffen. Berücksichtigt wird nur die kurzzeitige, quasi-statische Belastung. Zyklische Belastung (Ermüdung), Langzeitbelastung (Kriechen) und Belastungen mit hohen Verformungsgeschwindigkeiten (Crash) werden bewusst ausgespart, um den Fokus auf die statische Festigkeit zu richten.

Im Folgenden sollen einige *Grenzwert-Kriterien* vorgestellt werden. Dabei handelt es sich um kontinuumsmechanische Versagenshypothesen, bei

denen angenommen wird, dass sich die Klebschicht als homogenes Kontinuum verhält. Für eine bestimmte Belastung lassen sich die Spannungen und Dehnungen in der Klebschicht berechnen. Diese Spannungen oder Dehnungen werden dann mit den sog. *kritischen* oder *ertragbaren Spannungen* oder *Dehnungen* des Versagenskriteriums verglichen. Liegt die Spannung oder Dehnung an einem beliebigen Punkt in der Klebschicht über dem Grenzwert, tritt definitionsgemäß Versagen ein. Typische Kriterien sind die maximale Zugspannung, die maximale Hauptdehnung (vgl. z.B. [HW84]), die maximale Schubspannung, die von-Mises-Vergleichsspannung, modifizierte von-Mises-Vergleichsspannungen und viele andere.

Für zu den Polymerwerkstoffen gehörende Klebstoffe haben zahlreiche Forscher um den hydrostatischen Spannungszustand erweiterte von-Mises-Kriterien aufgestellt (z. B. [RCY73, Sch82, vS01]). Ausgangspunkt ist dabei die Beobachtung, dass Polymere mit zunehmendem hydrostatischen Druck bei höheren Lasten ins plastische Fließen kommen.

Raghava [RCY73] formuliert dies in Form des parabolischen Fließkriteriums

$$\begin{aligned} \sigma_v^2 - \frac{s-1}{s} \sigma_v (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \\ - \frac{1}{2s} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6\tau_{xy}^2 + 6\tau_{yz}^2 + 6\tau_{zx}^2] = 0 \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\tau_v = \sqrt{\frac{s}{3}} \sigma_v \quad (4.3)$$

Dabei ist

$$s = \frac{R_{p,compression}}{R_{p,tension}} \quad (4.4)$$

das Verhältnis der Fließgrenze im einachsigen Druckversuch zur Fließgrenze im Zugversuch ist. Bei $s = 1$ entspricht der Ausdruck dem bekannten von-Mises-Fließkriterium. Sein Ansatz, der ursprünglich nicht für Klebverbindungen gedacht war, wird von einigen Forschern auf diese erweitert.

Dabei ergibt sich das schon in Abschnitt 4.2 angesprochene Problem der *Spannungssingularitäten*, mit dem alle Versagenskriterien, die mit Grenzwerten für die ertragbare Spannung oder Dehnung arbeiten, zu kämpfen haben. Um dieses Problem zu umgehen, wird die Spannung dann in einer bestimmten Entfernung von der Singularität ausgewertet.

[Rom99], der die Fließbedingung von [RCY73] zur Festigkeitsberechnung von achsensymmetrischen Klebverbindungen anwendet, benutzt z.B. das zweite Element vom Anfang der Klebverbindung.

Auch Schlimmer benutzt in [Sch82, Sch03] eine Fließbedingung, die vom hydrostatischen Spannungszustand abhängig ist. Er schlägt eine schub-basierte Schreibweise vor, um den für Klebverbindungen typischen Spannungszuständen besser gerecht zu werden. Sie lautet

$$\tau_F^2 = J_2' + \frac{1}{3}a_1\sigma_F J_1 + \frac{1}{3}a_2 J_1^2. \quad (4.5)$$

Dabei ist

$$J_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad (4.6)$$

die lineare Invariante, die den hydrostatischen Spannungszustand beschreibt und

$$J_2' = \frac{1}{6} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 \quad (4.7)$$

die quadratische Invariante des deviatorischen Spannungszustandes, die die Gestaltänderungsenergie beschreibt. Als physikalische Deutung des Fließbeginnes gibt Schlimmer die elastische Formänderungsarbeit an. Der Ansatzfreiwert a_1 wird dementsprechend als Maß für die Abnahme der Fließgrenze und Festigkeit durch die hydrostatische Zugbeanspruchung gedeutet und als *hydrostatischer Entfestigungskoeffizient* eingeführt. a_2 ist von der elastischen Querdehnzahl ν abhängig.

In [Sch03] wird die Theorie auf eine elastoplastische Deformationstheorie erweitert, die es ermöglicht, die τ - γ -Kurven verschiedener Versuche an Rohrproben unter kombinierter Schub-Zug-Belastung rechnerisch nachzubilden. Der vorgestellte Vergleich liefert gute Übereinstimmungen.

Außerdem gibt er Methoden zur experimentellen Identifikation der Parameter a_1 und a_2 für den Fließbeginn sowie für den Bruch der Klebschicht an.

Da es sich bei dieser Vergleichsschubspannung um eine Klebschichtei-genschaft handelt, d. h. die zu ihrer Ermittlung verwendeten Proben einen möglichst homogenen Spannungsverlauf zeigen, sollte die Übertragbarkeit dieser kritischen Größe auf andere geometrische Konfigurationen relativ gut sein. Andererseits stellt sich dann das Problem der Spannungsermitt-lung. Sobald sich Singularitätsprobleme ergeben, ist es nicht mehr möglich, die tatsächlich im Klebflansch auftretende maximale Spannung modellie-rungsunabhängig zu berechnen.

Auch in [McC99] werden die grundlegenden Schwachpunkte der Grenzwert-Ansätze betont: Im Zusammenhang mit Strukturen, die am Übergang von zwei unterschiedlichen Materialien (Fügeteil/ Klebschicht) Singularitäten aufweisen, sind die dort berechneten maximalen Spannun-gen oder Dehnungen bedeutungslos. Als ein viel versprechender Ausweg wird für diese Versagenskriterien die Verwendung von in irgendeiner Wei-se gemittelten Werten vorgeschlagen. Dieser Gedanke wird in Kapitel 6 wieder aufgegriffen werden.

Neben den lokalen Ansätzen der Grenzwert-Kriterien gibt es die Grenz-zustands- und Schädigungs-Kriterien, bei denen das Versagen globaler for-muliert wird. Sie werden in den beiden nächsten Abschnitten betrachtet.

Crocombe schlägt in [Cro89] „global yielding“, globales Fließen im Sin-ne eines *Grenzzustands-Kriteriums* für Klebverbindungen vor. Globales Fließen tritt auf, wenn ein Pfad in der Klebschicht entlang der Überlappung einen Zustand erreicht, in dem er keine weitere Steigerung der aufgebracht-ten Last mehr erträgt.

Mithilfe der FEM kann diese Last als der Wert ermittelt werden, bei dem die Rechnung bei einer inkrementellen Laststeigerung nicht mehr kon-vergiert, so dass die Methode eine Abschätzung der ertragbaren Bruchlast liefert. Die berechneten Ergebnisse werden mit Versuchsdaten von drei un-terschiedlichen Verbindungstypen verglichen: der einfach überlappten Ver-bindung, der doppelt überlappten Verbindung und dem *compressive shear test*.³

Die Fließkurve für das Materialverhalten des Klebstoffs übernimmt Cro-combe aus Versuchsdaten von Substanzproben. Auch er nimmt als Fließ-

³ Beim *compressive shear test* (Druck-Schub-Versuch) wird die Probe mit der Klebung in eine Haltevorrichtung gespannt, die eine Verformung der Fügeteile senkrecht zur Klebschicht verhindert. Durch die Unterdrückung von Zugspannungen an den Über-lappungsenden soll reines Schubversagen der Klebschicht erreicht werden.

regel ein modifiziertes von-Mises-Gesetz unter Berücksichtigung des hydrostatischen Druckes an, wobei Druck zu einem verzögerten Fließbeginn führt. Als Verhältnis des Fließbeginnes unter Druck und Zug wird ein Wert von 1,3 : 1 angenommen.

Die Methode liefert gute Vorhersagen für die Bruchlasten der untersuchten Proben. Da bis zur vollen Durchplastifizierung der Klebschicht gerechnet wird und sich im Laufe der elastisch-plastischen Rechnung die lokalen Spannungspitzen bzw. Singularitäten durch Lastumlagerung abbauen können, spielt die Form der Klebstoffkehlen an den Enden der Klebung eine untergeordnete Rolle. Dieser Effekt der Lastumlagerung ermöglicht es auch, dass für die Proben mit der dünneren Klebschicht eine höhere Bruchlast ermittelt wird, als für die Proben mit der dickeren Klebschicht. Bei elastischen Rechnungen hingegen versagen die dünnen Proben auf Grund der lokal höheren Spannungsspitzen an den singulären Enden der Klebung stets eher.

Umgekehrt verlangt ein globales Konzept auch globales Verhalten der Klebung. D. h. primär schubbeanspruchte Verbindungen, bei denen der gesamte Querschnitt zur Lastüberleitung beiträgt und Klebstoffe mit plateauartig ausgebildetem plastischen Bereich in der Spannungs-Dehnungs-Kurve, sind die Voraussetzungen für eine erfolgreiche Anwendung dieses Ansatzes. Bei schälbeanspruchten Verbindungen oder spröden Klebstoffen ist der reale Beanspruchungszustand sehr stark lokal geprägt. Eine Anwendung des *global yielding*-Konzeptes kommt dann nicht in Frage.

[SKT98] versucht das Problem der Netzabhängigkeit lokaler Verfahren dadurch zu umgehen, dass ein Schädigungsbereich, die „damage zone“, definiert wird. Erreicht die Größe dieser Schädigungszone einen kritischen Wert, wird Versagen der Klebung angenommen.

Es handelt sich dabei also um einen Zwei-Parameter-Ansatz:

1. das Kriterium, zur Identifizierung von Elementen, die zur Schädigungszone gehören. Die Autoren verwenden dafür die Vergleichsdehnung nach von-Mises.⁴ Als Wert für die kritische Vergleichsdehnung wird $\varepsilon_{v,krit} = 0,2$ definiert.
2. die Größe der Schädigungszone.

⁴ $\varepsilon_v = \frac{1}{\sqrt{2(1+\nu)}} \sqrt{(\varepsilon_I - \varepsilon_{II})^2 + (\varepsilon_{II} - \varepsilon_{III})^2 + (\varepsilon_{III} - \varepsilon_I)^2}$

Mithilfe dieses Ansatzes bestimmen die Autoren rechnerisch die Bruchlasten unterschiedlicher, hauptsächlich schubbelasteter Proben aus Aluminium und Kompositwerkstoffen.

Das Schädigungszonenmodell ist eine Weiterentwicklung der Grenzwert-Kriterien, da die oben angesprochene Mittelwertbildung durch den Bezug auf die Größe der Schädigungszone schon implementiert ist.

Es sollte allerdings keine Verwechslung mit Modellen der *Schadens-Kontinuumsmechanik* (*damage continuum mechanics*) geben. Wie der Begriffsbestandteil Kontinuumsmechanik schon andeutet, werden dort Mikrorisse nicht in Form von freien Oberflächen wie in der Bruchmechanik berücksichtigt, sondern die Rissdichte bzw. die Auswirkung der Risse wird als gemittelter Parameter in Gestalt einer die Steifigkeitseigenschaften beeinflussenden Schädigungsvariablen eingeführt (vgl. z.B. [Hes00]). Dadurch ist es möglich, durch die schrittweise Reduzierung der Steifigkeit die Lastübertragung in den geschädigten Bereichen bis auf Null herunterzufahren, um fortschreitende Risse zu modellieren. Ein großer Nachteil der Kontinuumsschadensmechanik in Bezug auf die Zielsetzung dieser Arbeit sind die extremen Nichtlinearitäten, die bei der lokalen Entlastung von geschädigten Elementen auftreten und bei impliziten Berechnungscodes⁵ zu Konvergenzproblemen führen können (s. [McC99]). Außerdem ergibt sich auch hier wieder das Problem der feinen Vernetzung, die nötig wird, um eine fortschreitende Entwicklung der Schädigung zu modellieren.

Die größte Einschränkung für die Auswahl eines geeigneten Versagenskriteriums stellt wie gezeigt die Netzfeinheit dar. Sollen Gesamtkarosserie-Modelle simuliert werden können, muss das Klebschichtnetz vergleichsweise grob ausfallen. Dadurch rücken die Grenzwert-Kriterien als viel versprechende Lösung wieder in den Vordergrund. Und zwar in Form eines semiempirischen Ansatzes, bei dem die Berechnung der maximalen Spannung über ein Element gemittelt erfolgt. Die Übertragbarkeit auf andere Verbindungstypen ist wegen der fehlenden physikalischen Begründung durch einen solchen Ansatz zwar nicht gegeben, aber innerhalb der zu untersuchenden Klebverbindungstypen sollten damit gute Ergebnisse zu erzielen sein. In [McC99] wird ausdrücklich auf die Ähnlichkeit der Klebverbindun-

⁵Typische Vertreter impliziter Codes sind FE-Programme wie NASTRAN oder ABAQUS/Standard

gen bezüglich Netzfeinheit, Materialeigenschaften sowie den Auswertungs-ort der maximalen Spannung hingewiesen. Ähnliches Vorgehen bei der Auswertung der kritischen Größe ist essenziell wichtig, da sich ein derartiges semi-empirisches Versagenskriterium nicht direkt auf den Ort bezieht, an dem Versagen eintritt, sondern ein indirektes Maß für ein Versagen ist. Für ein solches Vorgehen wird auch der Begriff Nennspannungskonzept — z.B. bei der Festigkeitsberechnung von Schweißverbindungen — verwendet.

5 Versuchsprogramm

Die vorangegangene Darstellung lässt ein semi-empirisches Vorgehen bei der Herleitung eines Berechnungskonzeptes für die Klebflanschfestigkeit in Gesamtkarosseriemodellen am viel versprechensten erscheinen. Die Berechnung der tatsächlichen lokalen Spannungen in der Klebschicht scheidet wegen der benötigten feinen Modellierung und der explodierenden Elementanzahl für Gesamtkarosserien aus.

Die topologisch-geometrische Ähnlichkeit der Flansche in Karosserien ermöglicht ein semi-empirisches Vorgehen, das durch die Beschränkung auf die wichtigsten Einflussgrößen eine schnelle, vergleichsweise einfache und trotzdem ausreichend genaue Berechnungsmethode für die Klebflanschfestigkeit bereitstellt.

Der Begriff der *Klebflanschfestigkeit* soll dabei analog zu den im Abschnitt 4.1 eingeführten *Klebflanscheigenschaften* auf die Verbundwirkung des betrachteten Klebflansches hinweisen. Die Festigkeit einer solchen Klebung wird zum einen von den Klebstoffeigenschaften bestimmt, aber eben auch sehr stark von den Fügeteilen, die gerade bei dünnen Blechen zu stark inhomogenen Spannungen in der Klebschicht führen.

Das folgende Kapitel enthält zunächst alle Versuche, die im Rahmen dieser Arbeit gemacht wurden. Die Ableitung des Berechnungskonzeptes zur Klebflanschfestigkeit folgt im Kapitel 6. Dort wird dann auf die Versuchsergebnisse zurückgegriffen. Diese Art der Darstellung wurde gewählt, um die Versuchsdaten als geschlossenen Block bereitzustellen, der so auch für weitere Auswertungen leichter verwendet werden kann.

Für die Ableitung des Konzeptes wurden zwei verschiedene Flanschformen gewählt, die die typischen extremen Belastungsarten in Karosseriestrukturen repräsentieren. Nahezu reine Schubbeanspruchung ergibt sich bei der doppelt überlappten Scherzugprobe, hier kurz **Dreiblechprobe (DB-Probe)** genannt.

Bei der T-förmigen Schälprobe, hier kurz als **T-Probe** bezeichnet, ent-

steht reine Schälbeanspruchung, d. h. sehr lokal konzentrierte Normalspannungen.¹

Mithilfe der **Kopfzug-Scherzug-Proben (KS-Proben)** wird anschließend das Versagenskriterium validiert. Diese Versuchsergebnisse werden also *nicht* für die Ableitung der Methodik verwendet. Die Kopfzug-Scherzug-Proben stellen bauteilähnliche Proben dar, die mit unterschiedlichen Lastkombinationen aus Schub- und Normalkraft beaufschlagt werden können.

Die Aufteilung in die Abschnitte „Werkstoffe“, „Probenformen, Herstellung, Parameter“, „Anordnung und Prüfbedingungen“ „Versuchsergebnisse“ sowie „Diskussion der Ergebnisse“ soll ein schnelles Nachschlagen beim Planen oder Vergleichen mit anderen Versuchsreihen erleichtern.

Ein **Satz** besteht aus einer Anzahl von gleichen Versuchen. Das gesamte Versuchsprogramm gliedert sich in die Versuchsteile

- DB-Proben
- T-Proben
- KS-Proben.

Die Abbildungen 5.1, 5.2 und 5.3 auf den Seiten 36, 36 und 36 zeigen die Probengeometrien sowie die Definition der geometrischen Parameter. Dabei wird für alle Probenformen einheitlich für die Überlappungslänge das Formelzeichen u , für die Blechdicke t und für die Klebschichtdicke d verwendet. Der Lastrichtungswinkel α definiert die Lastrichtung, mit der die KS-Proben durch die unterschiedlichen Einspannungen belastet werden.

¹Dabei handelt es sich zwar um einen in der Konstruktion zu vermeidenden Lastfall, jedoch kann nicht ausgeschlossen werden, dass trotzdem aufgrund von anderen Randbedingungen wenigstens teilweise schälbeanspruchte Flansche in der Karosseriestruktur existieren. Die Aufgabe der Festigkeitsberechnung ist es ja gerade diese kritischen Bereiche zu identifizieren. Die Berücksichtigung von Schälzug ist somit ausgesprochen wichtig.

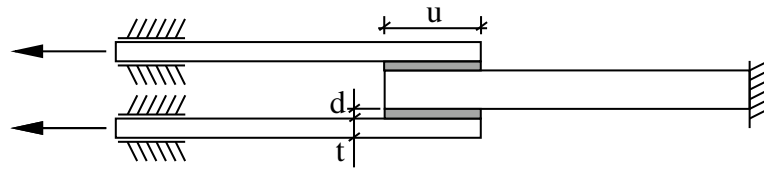


Abbildung 5.1: DB-Probe mit Definition der geometrischen Parameter

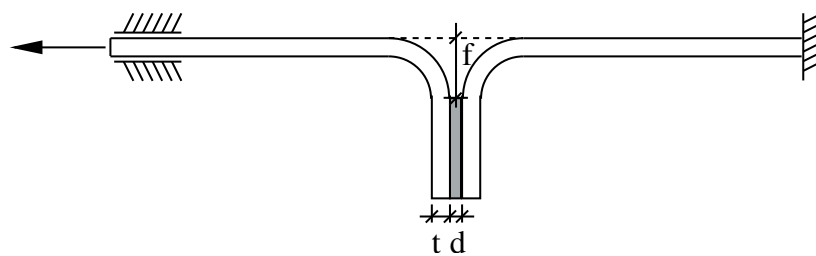


Abbildung 5.2: T-Probe mit Definition der geometrischen Parameter

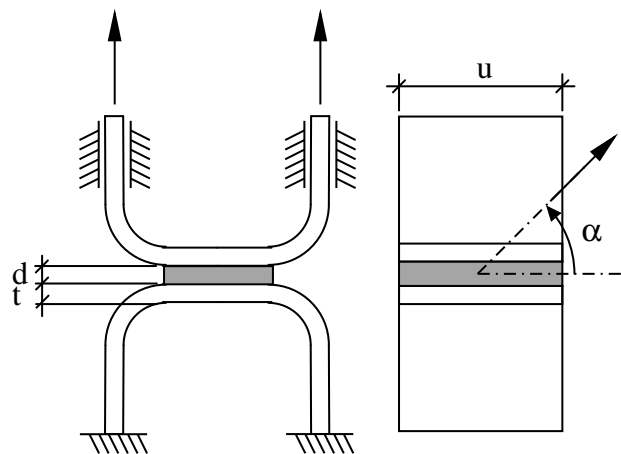


Abbildung 5.3: KS-Probe mit Definition der geometrischen Parameter

5.1 Werkstoffe

5.1.1 Stahlbleche

Bei ersten Vorversuchen stellte sich heraus, dass die üblichen Feinblechgüten durch die hohe Festigkeit der Klebungen sehr früh zu fließen begannen. Deshalb wurden hochfeste Stahlbleche der Dicken 0,8 mm, 1,5 mm und 2,0 mm verwendet. Bei dem 0,8 mm dicken Blech handelte es sich um galvanisch verzinktes TRIP600, bei den 1,5 und 2,0 mm dicken Blechen um feuerverzinktes CP800.

Die Fließgrenzen ($R_{p0,2}$) der 1,5 mm und 2,0 mm dicken Bleche betragen für die Basisproben 680 MPa, die der 0,8 mm dicken Blech nur 450 MPa, da keine höhere Materialgüte in dieser Dicke erhältlich war.

5.1.2 Klebstoff

Für die Klebungen wurde der Strukturklebstoff **Betamate 1496** der Firma **Dow Automotive** verwendet. Dabei handelt es sich um einen im Automobil-Rohbau weit verbreiteten Polyadditionsklebstoff in Form eines reaktiven Epoxidharzschmelzklebstoffs (sog. Hotmelt).

Nach Anlieferung als einkomponentiges Epoxidprepolymer wird der Klebstoff bei 60 °C aufgeschmolzen und aufgetragen. Bei Raumtemperatur liegt der Härter in nicht reaktionsfähiger Form vor. Die eigentliche Härtungsreaktion findet dann unter Hitzeeinwirkung (180 °C, 30 min.) statt. In der Produktion wird dabei der Prozessschritt der kathodischen Tauchlackierung mit der anschließenden Ofentrocknung mitgenutzt.

Durch die Nachvernetzungsreaktion wird der Klebstoff vom thermoplastischen in den duromeren Zustand überführt.

Die mechanischen Eigenschaften dieses Klebstoffes sind vergleichbaren Klebstoffen für das Anwendungsgebiet hochfester, crashtauglicher Klebungen anderer Hersteller sehr ähnlich. Das Verhalten kann als charakteristisch angesehen werden. Für die quantitative Übertragung der in diesen Versuchen gewonnenen Kennwerte auf einen anderen Klebstoff, sollten allerdings einzelne Versuche an ausgewählten Parametersätzen zur Bestätigung dieser Annahme wiederholt werden.

5.2 Probenformen, Herstellung, Parameter

5.2.1 DB-Proben

Bei den DB-Proben handelt es sich um eine Scherzugprobe mit doppelter Überlappung. Dadurch entsteht eine symmetrische Belastung mit geringer Momenteneinleitung. Dies bedeutet für die Klebschicht eine überwiegende Schubbelastung.

Zunächst wurden Blechstreifen aus den Stahlplatten geschnitten. Die Länge eines Bleches beträgt 110 mm, die Breite 25 bzw. 48 mm.

Die Bleche wurden im Ultraschallbad mit Methanolketonacetone gereinigt und anschließend mit frischem Reinigungsmittel abgewischt.

Der Klebstoffauftrag erfolgte manuell mit einer Applikationspistole. Darin wurde der Klebstoff in der Kartusche auf 60 °C erhitzt und mithilfe von Pressluft bei 3 bar Druck ausgedrückt. Die Einstellung der angestrebten Klebschichtdicken wurde mithilfe von auf die Klebschicht aufgestreuten Glaskügelchen mit drei verschiedenen Durchmessern (0,2 mm/ 0,5 mm/ 1,0 mm) vorgenommen, die beim Zusammenpressen der Füge-teile in der Klemmvorrichtung als Abstandhalter zwischen den Blechen dienten.² Die Pressung erfolgte von Hand durch Anziehen von Flügelmutter. Eine Haltevorrichtung, in der 7 bis 12 Proben Platz finden, sorgte für die exakte Ausrichtung. Die mittleren Bleche wurden jeweils doppelt genommen, um die angestrebten Blechdicken zu erreichen, d. h. das Mittelblech war doppelt so dick wie die äußeren Bleche, um einen symmetrischen Dehnungszustand zu erhalten. Diese Innenbleche wurden ebenfalls mit einer dünnen Schicht Klebstoff verklebt.

Die Fügestellen wurden mit einer Klemmvorrichtung fixiert und die Proben samt Haltevorrichtung in den Ofen gestellt. Dort fand die Aushärtung bei 180 °C, 40 min. lang statt. Die Ofenzeit wurde wegen der benötigten Aufheizzeit der Haltevorrichtung um 10 min. gegenüber der Härtezeit des Klebstoffes (30 min.) verlängert.

Die untersuchten Parameter sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst. Das Versuchsprogramm und die Probenbezeichnungen werden in Tabelle 5.2 aufgeführt. Satz 1 enthält die sog. Basisprobe, deren Werte auch für die anderen Sätze übernommen werden, sofern sie nicht der Parametervariation

²In Vorversuchen wurde kein signifikanter Einfluss der Glaskügelchen auf die Klebfestigkeit festgestellt

Tabelle 5.1: Variierte Parameter bei den DB-Proben

<i>Einflussart</i>	<i>Anz. Varianten</i>	<i>Werte</i>
Klebschichtdicke [mm]	3	0,5 0,2 1
Blechdicke [mm]	3	2,0 1,5 0,8
Überlappungslänge [mm]	3	15 10 30
Probenbreite [mm]	2	25 48

unterliegen. Diese beibehaltenen Werte werden in der Tabelle nicht mehr explizit aufgezählt.

Tabelle 5.2: Versuchsteil DB-Proben

<i>Satz 1 Basisprobe</i>			
	Klebschichtdicke	0,5	mm
	Blechdickenkombination	2,0/2,0	mm
	Überlappungslänge	15	mm
	Probenbreite	25	mm
<i>Satz 2 Variation der Klebschichtdicke</i>			
2.1	Klebschichtdicke	0,2	mm
2.2	Klebschichtdicke	1,0	mm
<i>Satz 3 Variation der Blechdicke</i>			
3.1	Blechdickenkombination	1,5/1,5	mm
3.2	Blechdickenkombination	0,8/0,8	mm
3.3	Blechdickenkombination	2,0/1,5	mm
3.4	Blechdickenkombination	2,0/0,8	mm
3.5	Blechdickenkombination	1,5/0,8	mm
<i>Satz 4 Variation der Überlappungslänge</i>			
4.1	Überlappungslänge	10	mm
4.2	Überlappungslänge	30	mm
<i>Satz 5 Variation der Probenbreite</i>			
5	Probenbreite	48	mm
<i>Satz 6 Variation der Überlappungslänge und Blechdickenkombination</i>			

Überlappungslänge	10	mm
6.1 Blechdickenkombination	1,5/1,5	mm
6.2 Blechdickenkombination	0,8/0,8	mm
6.3 Blechdickenkombination	2,0/1,5	mm
6.4 Blechdickenkombination	2,0/0,8	mm
6.5 Blechdickenkombination	1,5/0,8	mm
Überlappungslänge	30	mm
6.6 Blechdickenkombination	1,5/1,5	mm
<i>Satz 7 Variation der Klebschichtdicke und Blechdickenkombination</i>		
Klebschichtdicke	0,2	mm
7.1 Blechdickenkombination	1,5/1,5	mm
7.2 Blechdickenkombination	0,8/0,8	mm
Klebschichtdicke	1,0	mm
7.3 Blechdickenkombination	1,5/1,5	mm
7.4 Blechdickenkombination	0,8/0,8	mm
<i>Satz 8 Variation der Überlappungslänge, Klebschichtdicke und Blechdickenkombination</i>		
Überlappungslänge	10	mm
Klebschichtdicke	0,2	mm
8.1 Blechdickenkombination	1,5/1,5	mm
8.2 Blechdickenkombination	0,8/0,8	mm
Überlappungslänge	10	mm
Klebschichtdicke	1,0	mm
8.3 Blechdickenkombination	1,5/1,5	mm
8.4 Blechdickenkombination	0,8/0,8	mm
<i>Satz 9 Variation der Blechdickenkombination und der Überlappungslänge</i>		
Klebschichtdicke	0,2	mm
9.1 Blechdickenkombination	1,5/1,5	mm
9.2 Blechdickenkombination	0,8/0,8	mm
Klebschichtdicke	1,0	mm
9.3 Blechdickenkombination	1,5/1,5	mm
9.4 Blechdickenkombination	0,8/0,8	mm

5.2.2 T-Proben

Die T-Probe besteht aus zwei um 90° abgewinkelten, verklebten Blechen. Sie wird auch als Schälprobe bezeichnet, da sich die Bleche beim Einreißen der Klebschicht voneinander abschälen.

Die Vorbereitung, Verklebung und Aushärtung der Probekörper erfolgte auf die gleiche Weise wie bei den DB-Proben.

Neben den geometrischen Parametern wird bei den T-Proben auch die Belastungsgeschwindigkeit im Sinne der Traversenvorschubgeschwindigkeit für einen Parametersatz variiert. Dadurch soll überprüft werden, ob die Annahme statischer Belastung auch für 100 mm/min noch zutreffend ist. Dies erlaubt im Hinblick auf die spätere Bestimmung von Klebstoffkennwerten in der Praxis eine schnellere Abarbeitung der Versuchsreihen.

Tabelle 5.3, S. 41 zeigt die untersuchten Parameter. In Tabelle 5.4, S. 41 ist der Versuchsteil T-Proben dargestellt.

Tabelle 5.3: Variierte Parameter bei den T-Proben

<i>Einflussart</i>	<i>Anzahl Varianten</i>	<i>Werte</i>
Fugenfüllungsgrad [-]	3	0 0,3 0,8
Blechdicke [mm]	3	0,8 1,5 2,0
Klebschichtdicke [mm]	3	0,5 0,2 1,0
Fließgrenze Blech [MPa]	2	680/450 200
Belastungsgeschwindigkeit [mm/min]	2	10 100
Probenbreite [mm]	2	25 48

Tabelle 5.4: Versuchsteil T-Proben

<i>Satz 1 Basisprobe</i>		
Fugenfüllungsgrad	0	
Blehdickenkombination	0,8/0,8	mm
Klebschichtdicke	0,5	mm
Fließgrenze Blech	680	MPa
Belastungsgeschw.	10	mm/min
Probenbreite	25	mm
Überlappungslänge	14	mm

<i>Satz 2 Variation des Fugenfüllungsgrades</i>		
2.1	Fugenfüllungsgrad	0,3
2.2	Fugenfüllungsgrad	0,8
<i>Satz 3 Variation der Blechdicke</i>		
3.1	Blechdickenkombination	1,5/1,5 mm
3.2	Blechdickenkombination	2,0/2,0 mm
<i>Satz 4 Variation der Klebschichtdicke</i>		
4.1	Klebschichtdicke	0,2 mm
4.2	Klebschichtdicke	1,0 mm
<i>Satz 5 Variation der Fließgrenze im Blech</i>		
5	Fließgrenze Blech	200 MPa
<i>Satz 6 Variation der Belastungsgeschwindigkeit</i>		
6	Belastungsgeschwindigkeit	100 mm/min
<i>Satz 7 Variation der Probenbreite</i>		
7	Probenbreite	48 mm
<i>Satz 8 Variation des Fugenfüllungsgrades und der Blechdickenkombination</i>		
	Blechdickenkombination	1,5/1,5 mm
8.1	Fugenfüllungsgrad	0,3
8.2	Fugenfüllungsgrad	0,8
	Blechdickenkombination	2,0/2,0 mm
8.3	Fugenfüllungsgrad	0,3
8.4	Fugenfüllungsgrad	0,8
<i>Satz 9 Variation der Klebschichtdicke und der Blechdickenkombination</i>		
	Klebschichtdicke	1,0 mm
9.1	Blechdickenkombination	1,5/1,5 mm
9.2	Blechdickenkombination	2,0/2,0 mm

5.2.3 KS-Proben

Die KS-Proben werden aus Flachblechen hergestellt, die beidseitig um 90° abgewinkelt werden. So ergibt sich im Querschnitt ein U-förmiges Profil. Die abgestellten Flansche werden mit je zwei Bohrungen versehen, durch

die die Verschraubung der Haltervorrichtung für die Zugversuche erfolgt. Anschließend werden je zwei U-Profile miteinander verklebt.

In der Klebschicht entsteht ein kombinierter Beanspruchungszustand aus Normal- und Schubspannungen. Der Probekörper kann unter verschiedenen Winkellagen eingespannt werden, um das Verhältnis der Spannungskomponenten zu variieren.

Die Vorbereitung, Verklebung und Aushärtung der Probekörper erfolgten auf die gleiche Weise wie bei den DB-Proben. Aufgrund der massiven Haltvorrichtung für die exakte Verklebung der KS-Proben, durch die sich die Proben stark verzögert erwärmen, wurde die Ofenzeit auf 2 h 20 min bei 180 °C verlängert. Diese Aushärtezeit hatte sich aus einer Messung des Temperaturverlaufes in der Klebschicht ergeben.

Tabelle 5.5, S. 43 zeigt die untersuchten Parameter. In Tabelle 5.6, S. 43 ist der Versuchsteil KS-Proben dargestellt.

Tabelle 5.5: Variierte Parameter bei den KS-Proben

<i>Einflussart</i>	<i>Anzahl Varianten</i>	<i>Werte</i>				
Klebschichtdicke [mm]	3	0,2	0,5	1,0		
Blechdicke [mm]	3	0,8	1,5	2,0		
Überlapplänge [mm]	2	50	70			
Lastrichtung [°]	5	0	22,5	45,0	67,5	90,0

Tabelle 5.6: Versuchsteil KS-Proben

<i>Satz 1 Basisprobe</i>						
Klebschichtdicke	0,5					mm
Blechdicke	1,5					mm
Überlapplänge	50					mm
Lastrichtung	0	22,5	45,0	67,5	90,0	°
Probenbreite	20					mm
Belastungsgeschw.	10					mm/min

<i>Satz 2 Variation der Klebschichtdicke</i>							
2.1	Klebschichtdicke	0,2					mm
	Lastrichtung	0	22,5	45,0	67,5	90,0	°
2.2	Klebschichtdicke	1,0					mm
	Lastrichtung	0	22,5	45,0	67,5	90,0	°
<i>Satz 3 Variation der Blechdicke</i>							
3.1	Blechdicke	0,8					mm
	Lastrichtung	0	22,5	45,0	67,5	90,0	°
3.2	Blechdicke	2,0					mm
	Lastrichtung	0	22,5	45,0	67,5	90,0	°
<i>Satz 4 Variation der Überlapplänge</i>							
4	Überlapplänge	70					mm
	Lastrichtung	0	22,5	45,0	67,5	90,0	°

5.3 Anordnung und Prüfbedingungen

5.3.1 DB-Proben

Die Zugversuche an den DB-Proben wurden mit einer Universal-Prüfmaschine (ZWICK, Modell Z600) mit servohydraulischem Antrieb durchgeführt. Die Klemmlänge betrug beidseitig 20 mm.

Die Versuche wurden weggesteuert mit konstanter Traversenvorschubgeschwindigkeit von 10 mm/min gefahren.

Bild 5.4, S. 45 zeigt eine eingespannte Probe.

Unmittelbar nach jedem Versuch wurde die tatsächliche Klebschichtlänge ausgemessen und aufgezeichnet. Dabei wurden Lufteinschlüsse in der Klebschicht vermerkt und ihre Fläche überschlägig vermessen. Eine Vorwertung ergab jedoch selbst für die größten Einschlüsse von ca. 3 mm² keinen signifikanten Abfall der Festigkeit. Für die weiteren Auswertungen wurden Lufteinschlüsse bis zu dieser Größe im Rahmen der allgemeinen Streuung akzeptiert und nicht gesondert ausgewertet.



Abbildung 5.4: Versuchsaufbau DB-Probe

5.3.2 T-Proben

Die Zugversuche an den T-Proben wurden mit der gleichen Universal-Prüfmaschine durchgeführt. Die Klemmlänge betrug 30 mm, die freie Einspannlänge 180 mm.

Die Versuche wurden weggesteuert mit konstanter Traversenvorschubgeschwindigkeit und bis zur völligen Trennung der Bleche gefahren.

Die Versuchsanordnung mit einer eingespannten Probe ist in Bild 5.5, S. 46 zu erkennen.

5.3.3 KS-Proben

Für die KS-Proben wurde eine Haltevorrichtung hergestellt, die es ermöglicht, die Proben in Schritten von $22,5^\circ$ zwischen 0° und 90° einzuspannen. Dadurch konnten die unterschiedlichen Lastkombinationen in Bezug auf die Klebschicht erzielt werden. Die Haltevorrichtung und die Probenform sind an die in [HHD02] beschriebenen Versuche angelehnt.

Die Proben wurden jeweils weggesteuert mit konstanter Belastungsge-

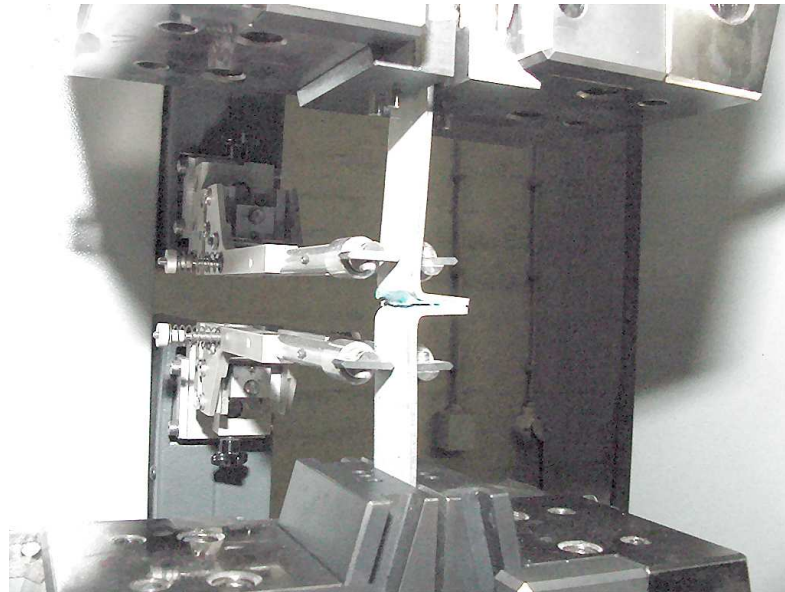


Abbildung 5.5: Versuchsaufbau T-Probe

schwindigkeit bis zum Bruch, d. h. bis zur völligen Trennung der Klebschicht belastet.

Die anfängliche Einspannung der Flansche über Langlöcher musste modifiziert werden, da die Proben zu rutschen begannen und noch vor dem Bruch aus der Einspannung gezogen wurden. Die Flanschhöhe wurde vergrößert, die Kontaktflächen aufgeraut, die Bohrungen kreisrund ausgeführt und die Vorspannung unter Verwendung hochfester Schrauben erhöht, um eine gleitfeste Schraubverbindung zu gewährleisten. Diese Maßnahmen verhinderten nach erneuerter Herstellung der Proben das Verrutschen während des Versuches.

Bei den KS-Proben mussten einige Sätze komplett aussortiert werden, da sie auf Grund einer zu kurzen Ofenzeit nicht völlig ausgehärtet waren.

In Bild 5.6, S. 47 ist die Haltevorrichtung mit einer KS-Probe zu erkennen.

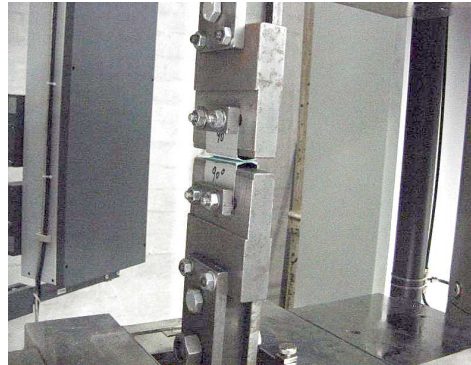


Abbildung 5.6: Versuchsaufbau KS-Probe

5.4 Versuchsergebnisse

5.4.1 Bruchlasten und Streuung

Es wurden 282 Versuche durchgeführt und ausgewertet, gegliedert nach 3 verschiedenen Probenformen (DB-, T- und KS-Proben) mit insgesamt 49 verschiedenen Parametersätzen.

Je Parametersatz wurden im meistens 6, mindestens jedoch 5 Einzelversuche durchgeführt.

Die Minimal- bzw. Maximalwerte der Mittelwerte der Bruchlasten je Satz liegen für die drei Probengeometrien zwischen

- 14,4 und 57,9 kN (DB-Proben),
- 1,1 und 5,3 kN (T-Proben) und
- 10,6 und 31,7 kN (KS-Proben).

Dies entspricht Klebfestigkeiten in Form von Nennspannungen von

- 28,8 bzw. 40,2 MPa (DB-Proben),
- 3,3 bzw. 15,1 MPa (T-Proben) und
- 10,6 bzw. 22,7 MPa (KS-Proben).

Die Streuungen, ausgedrückt als Variationskoeffizienten,³ innerhalb eines Parametersatzes mit gleichen Randbedingungen liegen zwischen minimal 0,02 bei den DB-Proben und maximal 0,15 bei den KS-Proben. Die durchschnittlichen Variationskoeffizienten der einzelnen Probenformen haben folgende Werte:

<i>Probenform</i>	<i>Mittelwerte der Variationskoeffizienten</i>
DB-Proben	0,06
T-Proben	0,11
KS-Proben	0,10

Auf den folgenden Seiten sind die Ergebnisse in Form von Tabellen und Diagrammen zusammengestellt.

In Tabelle 5.8, S. 49, Tabelle 5.10, S. 50 und Tabelle 5.12, S. 51 sind für die einzelnen Versuchsteile die Mittelwerte der Bruchlasten \bar{F}_b , sowie Standardabweichungen \hat{s} und Variationskoeffizienten \hat{v} als Maß für die Streuung zusammengefasst.

In Abb. 5.7, S. 52 sind die Mittelwerte und in Abb. 5.8, S. 52 die Variationskoeffizienten der Bruchlasten für die verschiedenen Parametersätze dargestellt.

³Der Variationskoeffizient \hat{v} eignet sich zum Vergleich der unterschiedlichen Sätze untereinander. Er ist definiert als die jeweilige auf den Mittelwert des Parametersatzes normierte Standardabweichung und berechnet sich zu $\hat{v} = \hat{s}/\bar{F}_b$.

Tabelle 5.8: Ergebnisse DB-Proben: Mittelwerte und Streuung der Bruchlasten (zur Definition der geometrischen Größen siehe Abb. 5.1, S. 36)

<i>Satz</i>	<i>d</i>	<i>t</i>	<i>u</i>	<i>b</i>	<i>n</i>	\bar{F}_b	\hat{s}	\hat{v}
1/1	0,5	2,0	15	25	5	27358	1687	0,06
2.1/2	0,2	2,0	15	25	6	34563	4646	0,13
2.2/3	1,0	2,0	15	25	6	26247	1654	0,06
3.1/4	0,5	1,5	15	25	6	27120	2083	0,08
3.2/5	0,5	0,8	15	25	6	21927	1390	0,06
4.1/6	0,5	2,0	10	25	6	18688	2139	0,11
4.2/7	0,5	2,0	30	25	6	54599	2180	0,04
6.1/8	0,5	1,5	10	25	6	19068	1189	0,06
6.2/9	0,5	0,8	10	25	6	17198	461	0,03
5/10	0,5	2,0	15	48	6	57893	3748	0,06
7.1/11	0,2	1,5	15	25	6	30939	1355	0,04
7.2/12	0,2	0,8	15	25	6	23245	621	0,03
7.3/13	1,0	1,5	15	25	6	24594	2187	0,09
7.4/14	1,0	0,8	15	25	6	21818	762	0,03
8.1/15	0,2	1,5	10	25	6	20462	451	0,02
8.2/16	0,2	0,8	10	25	6	18035	1284	0,07
8.3/17	1,0	1,5	10	25	6	16909	1077	0,06
8.4/18	1,0	0,8	10	25	6	14417	1417	0,10
6.6/19	0,5	1,5	30	25	6	52514	972	0,02

<i>d</i>	Klebschichtdicke	[mm]
<i>t</i>	Blechdicke	[mm]
<i>u</i>	Überlappungslänge	[mm]
<i>b</i>	Probenbreite	[mm]
<i>n</i>	Anzahl Versuche	[-]
\bar{F}_b	Mittelwert der Bruchlast	[N]
\hat{s}	Standardabweichung	[N]
\hat{v}	Variationskoeffizient	[-]

Tabelle 5.10: Ergebnisse T-Proben: Mittelwerte und Streuung der Bruchlasten (zur Definition der geometrischen Größen siehe Abb. 5.2, S. 36)

Satz	f	t	b	d	$R_{p0.2}$	v	n	\bar{F}_b	\hat{s}	\hat{v}	
1/20	0	0,8	25	0,5	450	10	5	1776	160	0,09	
2.1/21	0,3	0,8	25	0,5	450	10	6	1859	172	0,09	
2.2/22	0,8	0,8	25	0,5	450	10	6	2838	381	0,13	
3.2/23	0	2,0	25	0,5	680	10	6	3730	334	0,09	
4.1/24	0	0,8	25	0,2	450	10	6	1522	115	0,08	
5/25	0	0,8	25	0,5	200	10	6	1141	143	0,13	
6/26	0	0,8	25	0,5	450	100	6	1717	247	0,14	
7/27	0	0,8	48	0,5	450	10	6	3923	263	0,07	
8.1/28	0,3	1,5	25	0,5	680	10	6	3637	314	0,09	
8.2/29	0,8	1,5	25	0,5	680	10	6	5290	760	0,14	
8.3/30	0,3	2,0	25	0,5	680	10	6	3661	306	0,08	
9.1/31	0	1,5	25	1,0	680	10	6	3190	427	0,13	
f	Fugenfüllungsgrad								[mm]		
t	Blechdicke								[mm]		
b	Probenbreite								[mm]		
d	Klebschichtdicke								[mm]		
$R_{p0.2}$	Fließgrenze Blech								[MPa]		
v	Belastungsgeschwindigkeit								[mm/min]		
n	Anzahl Versuche								[-]		
\bar{F}_b	Mittelwert der Bruchlast								[N]		
\hat{s}	Standardabweichung								[F]		
\hat{v}	Variationskoeffizient								[-]		

Tabelle 5.12: Ergebnisse KS-Proben: Mittelwerte und Streuung der Bruchlasten (zur Definition der geometrischen Größen siehe Abb. 5.3, S. 36)

<i>Satz</i>	<i>u</i>	<i>t</i>	<i>d</i>	α	<i>n</i>	\bar{F}_b	\hat{s}	\hat{v}	
1.0.3/32	50	1,5	0,5	45,0	5	15836	2324	0,15	
1.0.4/33	50	1,5	0,5	22,5	5	11804	1194	0,10	
1.0.5/34	50	1,5	0,5	0,0	6	16094	608	0,04	
2.1.1/35	50	1,5	0,2	90,0	5	13960	879	0,06	
2.1.3/36	50	1,5	0,2	45,0	5	13866	1165	0,08	
2.1.4/37	50	1,5	0,2	22,5	5	13124	1768	0,13	
2.1.5/38	50	1,5	0,2	0,0	5	16692	1436	0,09	
2.2.1/39	50	1,5	1,0	90,0	5	13187	1745	0,13	
2.2.2/40	50	1,5	1,0	67,5	5	14904	2203	0,15	
2.2.4/41	50	1,5	1,0	22,5	6	10624	1143	0,11	
2.2.5/42	50	1,5	1,0	0,0	6	14940	2144	0,14	
3.1.4/43	50	0,8	0,5	22,5	5	12410	1004	0,08	
3.1.5/44	50	0,8	0,5	0,0	6	14714	785	0,05	
3.2.4/45	50	2,0	0,5	22,5	6	25426	2418	0,10	
3.2.5/46	50	2,0	0,5	0,0	6	23225	1556	0,07	
4.0.1/47	70	2,0	0,5	90,0	6	23034	2199	0,10	
4.0.2/48	70	2,0	0,5	67,5	5	19847	1695	0,09	
4.0.5/49	70	2,0	0,5	0,0	6	31738	2344	0,07	
<i>u</i>	Überlappungslänge						[mm]		
<i>d</i>	Klebschichtdicke						[mm]		
α	Lastrichtungswinkel						[°]		
<i>n</i>	Anzahl Versuche						[-]		
\bar{F}_B	Mittelwert der Bruchlast						[N]		
\hat{s}	Standardabweichung						[N]		
\hat{v}	Variationskoeffizient						[-]		

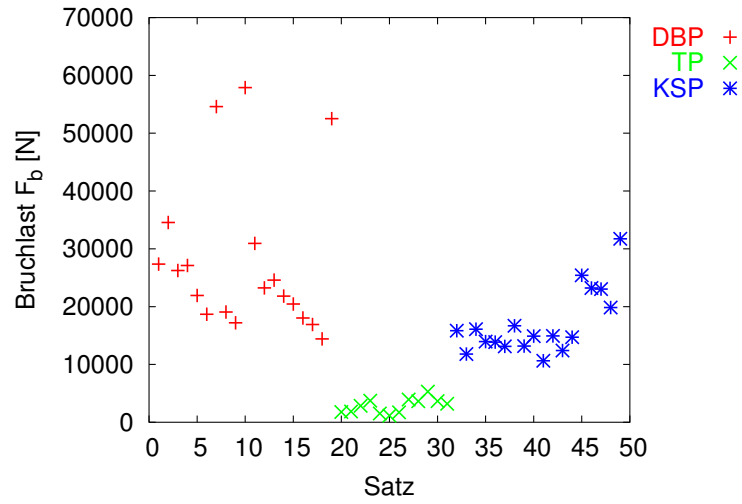


Abbildung 5.7: Mittelwerte \bar{F}_b der Bruchlasten

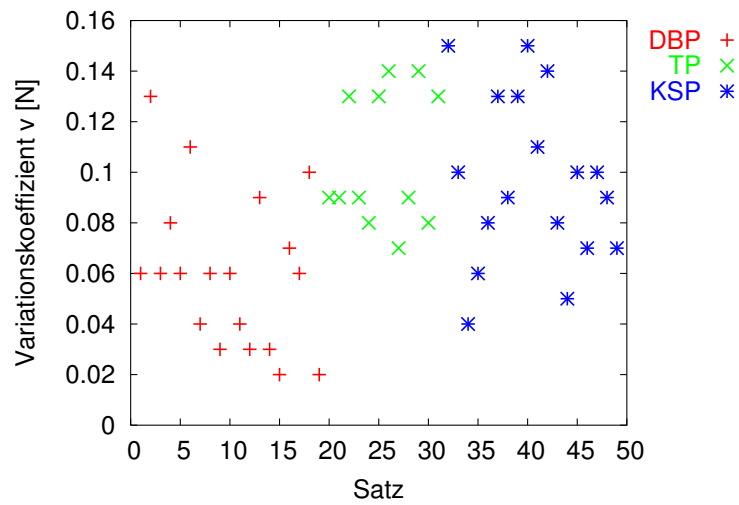


Abbildung 5.8: Variationskoeffizienten \hat{v} der Bruchlasten

5.4.2 Auswertung nach Einflussgrößen

Fügeteildicke

Es wurden die Fügeteildicken 0,8, 1,5 und 2,0 mm untersucht. In Abb. 5.9, S. 59 erkennt man für die **DB-Proben**, dass die erreichten Bruchlasten mit zunehmender Blechdicke steigen. Dieser Effekt ist stärker ausgeprägt, wenn zusätzlich dünne Klebschichten verwendet werden.

Die Klebfestigkeitszunahme bei den 2,0 mm dicken Blechen ist unterproportional zur Anfangssteigung. Bei einer weiteren Steigerung der Blechdicke würde die Kurve gegen eine horizontale Asymptote laufen. Die Steifigkeitszunahme der Fügeteile wird dann in Bezug auf die Klebschicht unerheblich.

In Abb. 5.10, S. 59 sind die Bruchlasten für die **T-Proben** zusammengestellt.

Auch hier zeigt sich der gleiche Zusammenhang zwischen Fügeteildicke und ertragbarer Bruchlast. Der Klebfestigkeitszuwachs ist sogar noch ausgeprägter als bei den DB-Probe. Allerdings ist eine klare Gesetzmäßigkeit aufgrund des schwächer besetzten Parameterfeldes und der deutlich größeren Streuung schwer zu erkennen.

Für die **KS-Proben** gibt es zu wenige Versuchswerte mit unterschiedlichen Fügeteildicken, um diesen Zusammenhang auszuwerten.

Klebschichtdicke

Es wurden drei verschiedene Klebschichtdicken untersucht: 0,2 mm, 0,5 mm und 1,0 mm.

Bei den **DB-Proben** (s. Abb. 5.11, S. 60) ist ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen Klebschichtdicke und ertragbarer Bruchlast erkennbar. Je dünner die Klebschicht ist, umso höher ist die Bruchlast. Der Festigkeitszuwachs auf Grund einer dünneren Klebschichtdicke macht sich bei dicken Blechen stärker bemerkbar als bei dünnen.

Die **T-Proben** (s. Abb. 5.12, S. 60) verhalten sich bei 0,2 und 0,5 mm dicken Klebschichten umgekehrt. Dünnere Klebschichtdicken führen zu geringeren Bruchlasten. Ein Gesetzmäßigkeit lässt sich aus den beiden Datenpunkten noch nicht ableiten. Dafür müssten noch mehr Versuche mit unterschiedlichen Klebschichtdicken bei verschiedenen Fügeteildicken gemacht werden.

Der Belastungszustand der **KS-Proben**, (s. Abb. 5.13, S. 61) ähnelt bei der Lastrichtung 0° den schubspannungsdominierten DB-Proben, bei der Lastrichtung 90° den normalspannungsdominierten T-Proben. Die Lastwinkel von $22,5$ bis $67,5^\circ$ entsprechen Kombinationen aus den beiden Zuständen. Für den Klebschichtdickeneinfluss ergibt sich eine entsprechende Abhängigkeit: Während bei 0 und $22,5^\circ$ die Bruchlast mit dickeren Klebschichten abnimmt, steigt sie zwischen $0,2$ mm und $0,5$ mm für die Lastrichtungen 45° deutlich an. Bei 90° liegen die Bruchlasten für $0,2$ und $1,0$ mm auf gleichem Niveau.

Überlappungslänge

Für die **DB-Proben** (s. Abb. 5.14, S. 61) wurden drei verschiedene Überlappungslängen untersucht: 10 , 15 und 30 mm. In diesem Bereich verhält sich die Bruchlast proportional zur Überlappungslänge.

Bei den **T-Proben** wurde die Überlappungslänge nicht explizit untersucht, da der Parameter für die maximal ertragbare Bruchlast praktisch ohne Bedeutung ist. Die Lastübertragung findet in einem sehr kleinen Bereich in der Wurzel der Klebung statt. Beginnt hier der Riss, so kommt es zum schlagartigen Abfall der Last und die Probe schält auf einem deutlich niedrigeren Lastniveau über die restliche Überlappungslänge ab. Abb. 5.21, S. 65 stellt das Kraft-Weg-Diagramm einer T-Probe dar. Eine Variation der Überlapplänge würde zwar den flach abfallenden rechten Ast der Kurve in Richtung eines größeren maximalen Weges verlängern, nicht jedoch das Lastmaximum weiter nach oben verschieben.

Fugenfüllungsgrad

Der Fugenfüllungsgrad wurde nur bei den **T-Proben** variiert. Die Werte lagen bei 0 , $0,3$ und $0,8$. Sie sind als Anhaltswerte zu verstehen, da eine exakt definierte Fugenfüllung bei Klebschichtdicken zwischen $0,2$ und $1,0$ mm nur äußerst schwer herzustellen ist. Die Zahlenwerte sind im Sinne von „Kehle nicht gefüllt“, „Kehle etwas gefüllt“ und „Kehle nahezu ganz gefüllt“ zu verstehen. Abb. 5.15, S. 62 zeigt den Einfluss dieses Parameters auf die Bruchlasten. Bei stärkerer Füllung der Klebschichtkehle nehmen die Bruchlasten deutlich zu.

Fließgrenze der Fügeiteile

Die Variation der Fließgrenze der Fügeiteile für *einen* Satz bei den **T-Proben** ist als Tastversuch zu werten. Er bestätigte die Vermutung, dass durch ein frühzeitiges Plastifizieren der Fügeiteile bei reduzierter Fließgrenze die Lastübertragung beim Schälzug lokal noch konzentrierter stattfindet und damit die Bruchlast weiter gesenkt wird.⁴ (s. Abb. 5.16, S. 62) Die Fließgrenze betrug 200 und 450 MPa.

Belastungsgeschwindigkeit

Auch bei der Belastungsgeschwindigkeit wurde für *einen* Satz der **T-Proben** ein Tastversuch unternommen, um einen Hinweis auf den Einfluss dieses Parameters für 10 und 100 mm/min zu erhalten. Der Einfluss ist sehr gering und kann im gewählten Geschwindigkeitsbereich als vernachlässigbar angesehen werden (s. Abb. 5.17, S. 63). D.h. eine Prüfung der Proben in der Praxis mit Traversenvorschubgeschwindigkeiten zwischen 10 und 100 mm/min ist in Bezug auf die Ermittlung von quasi-statischen Bruchlasten als unkritisch anzusehen.⁵

Probenbreite

Die Variation der Probenbreite diente als Kontrollversuch. Die **DB-Proben** und die **T-Proben** verursachen in erster Näherung einen zweidimensionalen Spannungszustand in der Klebschicht. Doppelt so breite Proben lieferten, wie erwartet, doppelt so hohe Bruchlasten. Wegen der leichteren Verklebbarkeit der Bleche in schon vorhandenen Haltevorrichtungen wurden allerdings die Breitenmaße 25 und 48 mm gewählt. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 5.18, S. 63 und 5.19, S. 64 zusammengefasst.

⁴Dieser Effekt entsteht durch die plastischen Fügeiteilverformungen. Die elastischen Fügeiteilverformungen unter Last, also die Steifigkeit der Bleche, hat ebenso einen großen Einfluss, wie die Variation der Fügeiteildicke zeigt. Eine Variation des E-Moduls durch die Verwendung von z.B. Aluminium-Blechen wurde nicht explizit untersucht, würde die Klebflanschfestigkeit aber ebenfalls reduzieren, da die Steifigkeit der Fügeiteile abfiel.

⁵Es ist allerdings kein Rückschluss auf deutlich höhere Belastungsgeschwindigkeiten im Bereich von mehreren Metern pro Sekunde zulässig, wie sie im Crashfall in Fahrzeugstrukturen auftreten. Hier zeigen die Klebstoffe sehr wohl eine Geschwindigkeitsabhängigkeit.

Belastungsrichtung

An den **KS-Proben** konnte der Einfluss der Belastungsrichtung untersucht werden. Es wurden die Werte 0° , $22,5^\circ$, 45° , $67,5^\circ$ und 90° geprüft. In Abb. 5.20, S. 64 sind die Ergebnisse aufgetragen. Die Bruchlasten des jeweiligen Probensatzes liegen für die verschiedenen Lastrichtungen auf ähnlichem Niveau. Bei 45° zeigt sich die maximale Bruchlast, bei den Zwischenwinkeln $22,5^\circ$ und $67,5^\circ$ wird die Bruchlast minimal.

5.4.3 Kernaussagen

Folgende allgemeine Kernaussagen können zusammenfassend getroffen werden:

1. Mit zunehmender **Fügeteildicke** nimmt die Klebfestigkeit zu. Für die normalspannungsdominierten Probengeometrien ist der Effekt deutlich stärker ausgeprägt als für die schubspannungsdominierten. Eine Blechdickenerhöhung von 0,8 auf 1,5 mm führt bei den T-Proben zu einem Klebfestigkeitszuwachs von ca. 50 %, bei den KS-Proben von ca. 30 % und bei den DB-Proben von ca. 10 %. Eine Erhöhung der Blechdicke über 1,5 mm bringt keinen weiteren Zuwachs für die Klebfestigkeit.
2. Der Einfluss der **Klebschichtdicke** ist uneinheitlich. Nur bei den schubspannungsdominierten Probengeometrien verringert sich die Klebfestigkeit mit zunehmender Klebschichtdicke, für Dicken zwischen 0,2 und 1,0 mm um ca. 25 %.
3. Der **Fugenfüllungsgrad** bei den Schälproben hat einen großen Einfluss auf die Klebflanschfestigkeit. Für die 0,8 mm dicken Bleche ist der Zuwachs maximal. Die Klebflanschfestigkeit nimmt von der nicht gefüllten Kehle zur ganz gefüllten Kehle um 60 % zu.
4. Die **Fließgrenze der Fügeteile** hat nur insofern einen Einfluss, als sie bestimmt, wann es in den Fügeteilen zu plastischen Verformungen kommt. Ist dies der Fall, nimmt die Klebfestigkeit deutlich ab.
5. Die **Belastungsgeschwindigkeit** im untersuchten quasi-statischen Bereich (10 und 100 mm/min) hat keinen Einfluss auf die Klebfestigkeit.

6. Die **Probenbreite** hat bei den untersuchten zweidimensionalen Belastungszuständen wie erwartet auf die Klebfestigkeit keinen Einfluss.

5.5 Diskussion der Ergebnisse

In den vorangegangenen Abschnitten wurde das Versuchsprogramm dokumentiert, angefangen mit der Nennung der Werkstoffe, über die Beschreibung der Probenherstellung und der Versuchsbedingungen, bis zur Darstellung der Versuchsergebnisse in Form von Tabellen und Diagrammen.

Hier folgt nun eine Interpretation der Ergebnisse. Dafür werden die Kernaussagen aus Abschnitt 5.4.3 aufgegriffen.

1. Fügeteildicke

Bei den DB-Proben dehnen sich die Fügeteile entlang ihrer Längsachse und prägen der Klebschicht eine umso größere Verformung auf, je geringer ihrer Steifigkeit und damit ihre Verformung unter Zugbelastung ist. Die dünnen verklebten DB-Proben führen also zu geringeren Bruchlasten als die dickeren. Der gleiche Effekt würde sich bei einer Verringerung der Steifigkeit durch einen kleineren E-Modul ergeben, wenn die verklebten Blech z.B. aus Aluminium wären.

Bei den T-Proben und den KS-Proben wirkt sich eine geringere Fügeteildicke und damit Steifigkeit nicht nur auf die Dehnungen unter Zug aus, sondern auch die Biegeverformungen werden größer. Sie führen im Klebschichtbereich zu Normalspannungsspitzen und damit zu einem Absinken der übertragbaren Lasten. Der Dickeneinfluss ist hier noch stärker, da die Dicke in das Querschnittsträgheitsmoment mit der dritten Potenz eingeht.

2. Klebschichtdicke

Diese Beobachtung an den Dreiblechproben deckt sich mit zahlreichen Versuchen in der Literatur (zusammenfassend siehe [Hab97], S. 405f.). Für den Abfall der Klebfestigkeit für Klebschichtdicken größer als 0,2 mm werden die verringerte Querkontraktionsbehinderung und die erhöhten Eigenspannungen innerhalb der Klebschicht durch Schwindung angeführt. Es wird zunehmend die Eigenfestigkeit der Klebschicht, die auf reinen Kohäsionskräften beruht und im randfernen Bereich wirkt, maßgebend.

Bei den normalspannungsdominierten Proben zeigt sich ein Anstieg der Festigkeit zwischen 0,2 und 0,5 mm. Dafür könnte die Fähigkeit eines größeren Klebstoffvolumens, Spannungsspitzen durch Plastifizierung abzubauen, verantwortlich sein.

3. Fugenfüllungsgrad

Gering gefüllte Fugen haben zur Folge, dass die Füge­teile sich aufgrund der unverbundenen freien Länge biege­verformen. Die Normal­spannungen in der Klebschicht konzentrieren sich stärker im Klebwurzelbereich. Zusätzlich wirkt sich bei einem hohen Fugenfüllungsgrad die Steifigkeitsverteilung der Klebschicht auf die Bruchlast positiv aus. In der sich trichterförmig öffnende Klebfuge nimmt nämlich die Klebschichtdicke zu und damit ihre Steifigkeit in Normalenrichtung ab. Durch Lastumverteilung in den geringer belasteten weiter von der Klebwurzel entfernten Bereich werden die Spannungsspitzen abgemindert und die Klebung erträgt insgesamt höhere Lasten.

4. Fließgrenze der Füge­teile

Diese Beobachtung lässt sich durch eine Erweiterung des Füge­teil­Steifigkeitsbegriffes in den plastischen Bereich erklären. Bei Überschreitung der Fließgrenze im Füge­teil bildet sich eine Art Fließgelenk aus. Das durch den Querschnitt übertragbare Biegemoment steigt mit zunehmender Last nicht weiter an und die lastverteilende Steifigkeit des Füge­teiles geht verloren. Die übertragenen Lasten konzentrieren sich in der Klebschicht auf eine kleinere Fläche, wodurch die Spannungsspitzen steigen.

5. Belastungsgeschwindigkeit

Grundsätzlich zeigen Kunststoffe ein dehnratenabhängiges Verhalten. Die untersuchten Geschwindigkeiten führen allerdings zu so geringen Unterschieden, dass ein Einfluss auf die Klebfestigkeit nicht signifikant war.

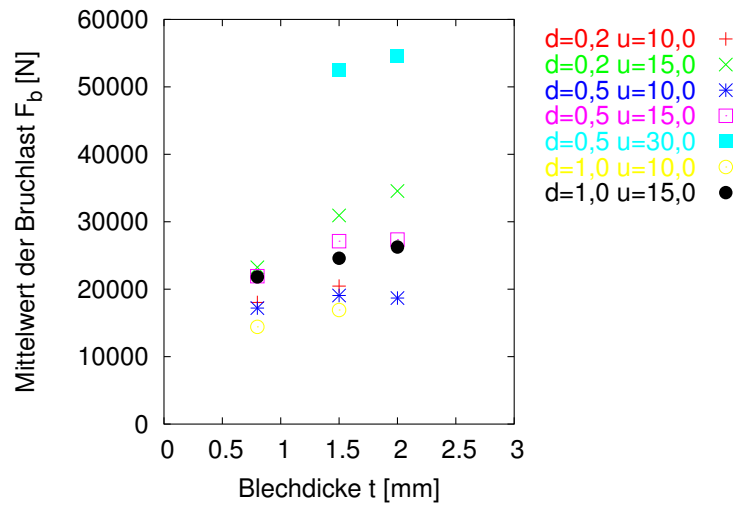


Abbildung 5.9: Zusammenhang zwischen Blechdicke und Bruchlast bei den DB-Proben

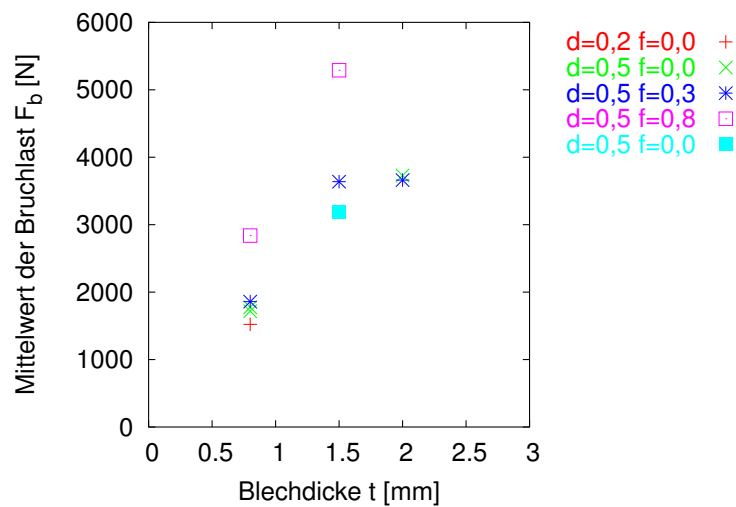


Abbildung 5.10: Zusammenhang zwischen Blechdicke und Bruchlast bei den T-Proben

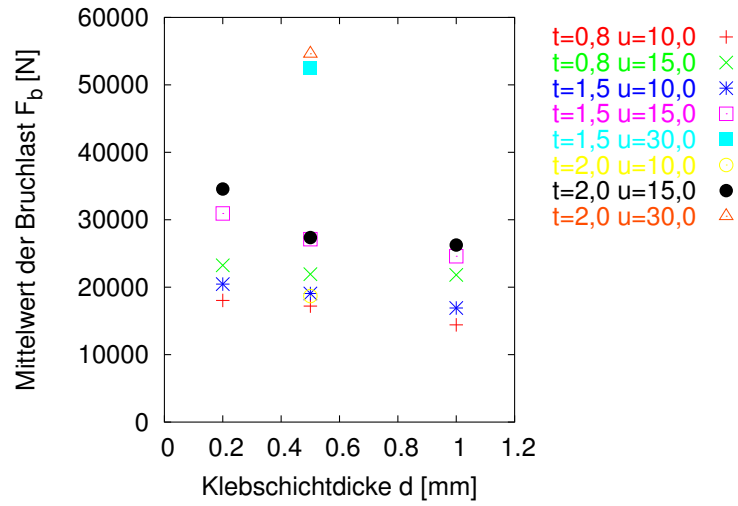


Abbildung 5.11: Zusammenhang zwischen Klebschichtdicke und Bruchlast bei den DB-Proben

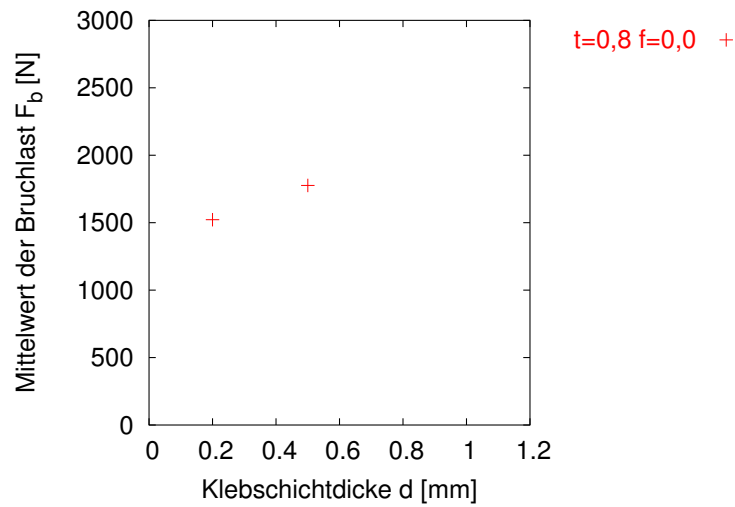


Abbildung 5.12: Zusammenhang zwischen Klebschichtdicke und Bruchlast bei den T-Proben

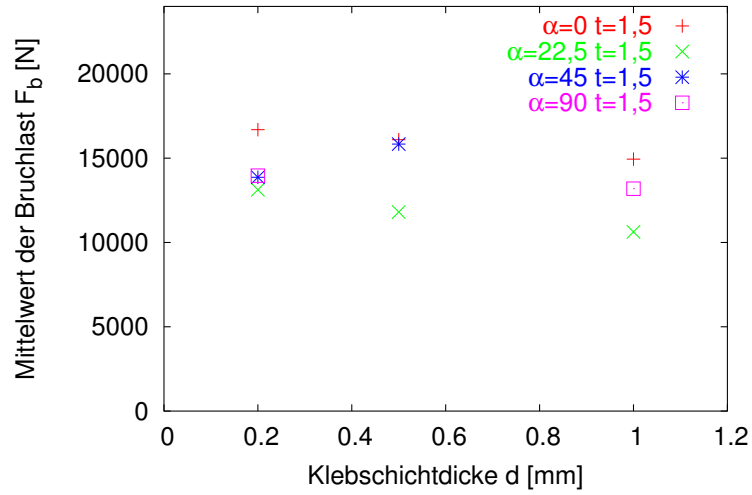


Abbildung 5.13: Zusammenhang zwischen Klebschichtdicke und Bruchlast bei den KS-Proben

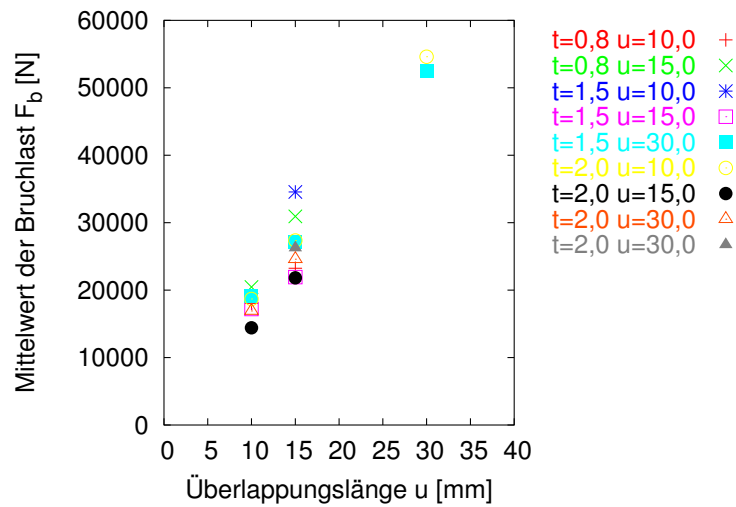


Abbildung 5.14: Zusammenhang zwischen Überlappungslänge und Bruchlast bei den DB-Proben

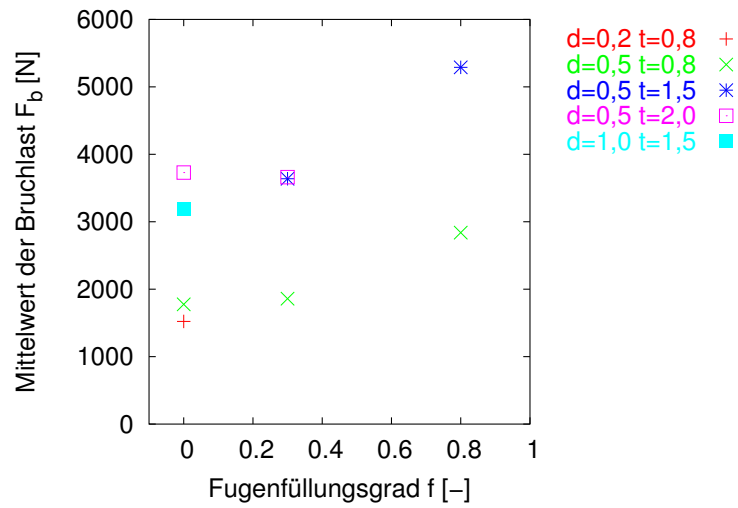


Abbildung 5.15: Zusammenhang zwischen Fugenfüllungsgrad und Bruchlast bei den T-Proben

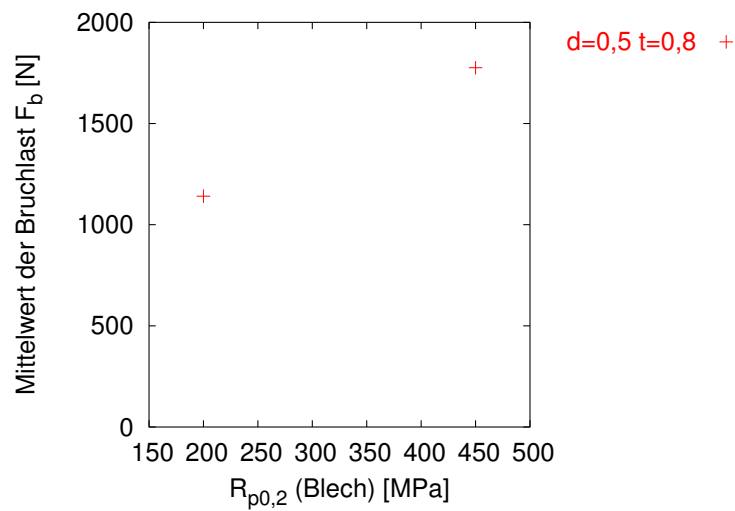


Abbildung 5.16: Zusammenhang zwischen Fließgrenze der Fügeteile und Bruchlast bei den T-Proben

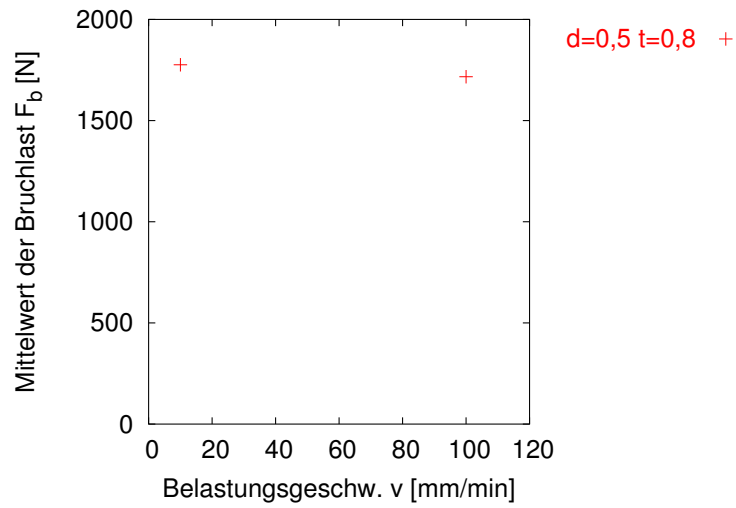


Abbildung 5.17: Zusammenhang zwischen Belastungsgeschwindigkeit und Bruchlast bei den T-Proben

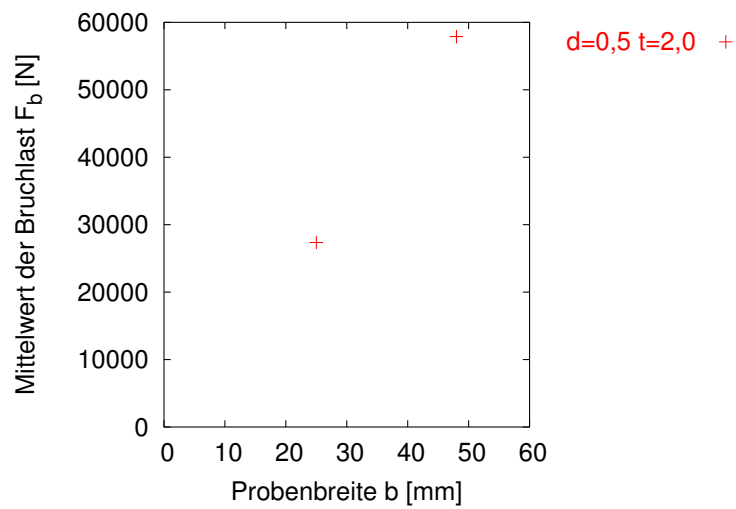


Abbildung 5.18: Zusammenhang zwischen Probenbreite und Bruchlast bei den DB-Proben

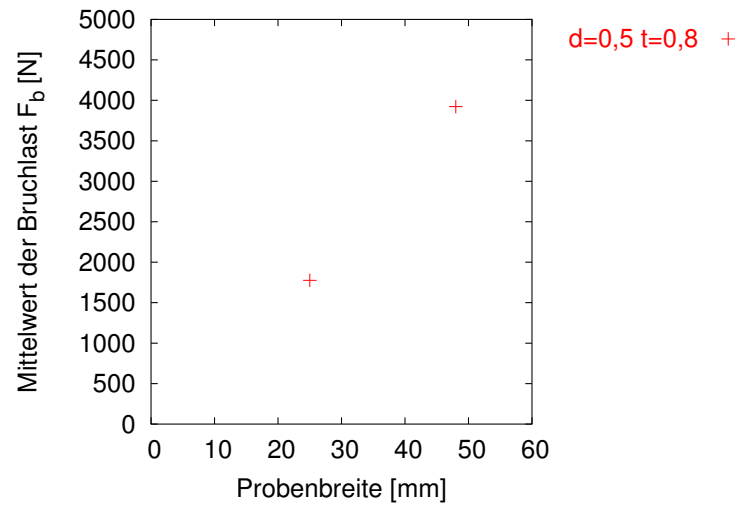


Abbildung 5.19: Zusammenhang zwischen Probenbreite und Bruchlast bei den T-Proben

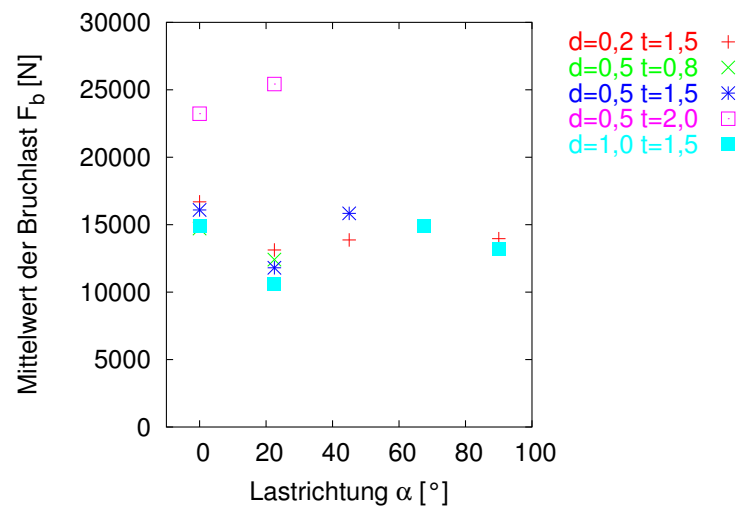


Abbildung 5.20: Zusammenhang zwischen Lastrichtung und Bruchlast bei den KS-Proben

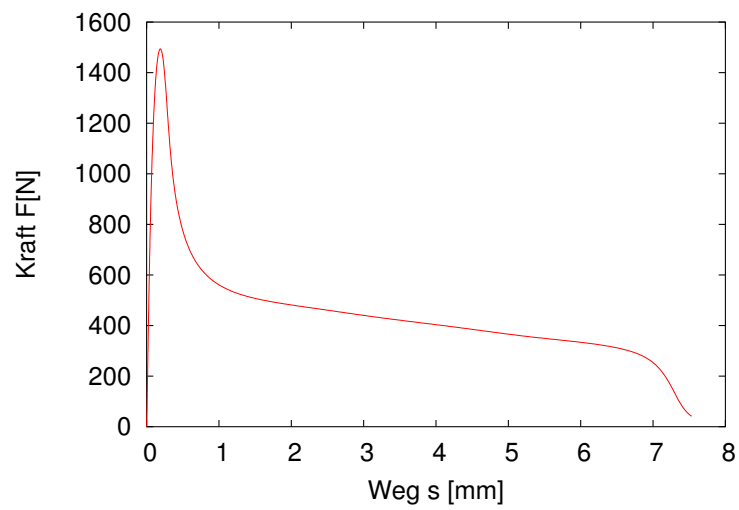


Abbildung 5.21: Kraft-Weg-Diagramm einer T-Probe

6 Klebflanschfestigkeit

6.1 Modellbildung

Die folgenden Punkte zeigen das Vorgehen bei der Ableitung des **Berechnungskonzeptes zur Klebflanschfestigkeit**

- Ermittlung der Bruchlasten für die beiden charakteristischen Flanschformen an Hand von Schubspannungs-Proben (DB-Proben) und Normalspannungs-Proben (T-Proben)
 - Mindestens 5 gleiche Versuche
 - Variation der Parameter Klebschichtdicke, Blechdicke, Überlappungslänge, Probenbreite, Fließgrenze der Fügeteile, Belastungsgeschwindigkeit und Fugenfüllungsgrad
- Auswahl der relevanten Parameter, die einen starken Einfluss auf die Klebflanschfestigkeit haben
- Umrechnung der Nennnormalspannung in die effektive Normalspannung mithilfe eines empirisch ermittelten Spannungsüberhöhungsfaktors, der die relevanten Parameter berücksichtigt
- Umrechnung der Nennschubspannung in die effektive Schubspannung mithilfe eines empirisch ermittelten Spannungsüberhöhungsfaktors, der die relevanten Parameter berücksichtigt
- Kombination der effektiven Schub- und Normalspannungen durch Ansatz einer quadratischen Interaktionsbeziehung
- Vorstellung der benutzten Klebschichtmodellierung und ihrer Randbedingungen (inkompatible Netze) für die Ermittlung der Nennspannungen in Gesamtkarosserie-Modellen

- Validierung mithilfe der unabhängigen KS-Proben-Versuche für kombinierte Belastungen

6.2 Parameter des Berechnungskonzeptes

In Kapitel 5 wurde eine Vielzahl von Parametern untersucht. Bei der nun folgenden Entwicklung des Berechnungskonzeptes kommt es darauf an, nur die festigkeitsrelevanten Eigenschaften mit einem signifikanten Einfluss auf reale Klebflansche in Fahrzeugkarosserien abzubilden, um durch diese Vereinfachung zu einem berechenbaren Modell zu kommen. Diese relevanten Parameter finden auf zweierlei Art Eingang in das Versagensmodell: Die Größen, die zum Zeitpunkt der Berechnung bekannt sind, können explizit in die Berechnung einfließen. Für die zum Zeitpunkt der Berechnung unbekanntes Größen müssen Werte angenommen werden, die zu einem auf der sicheren Seite liegenden Ergebnis führen.

- Die **Fügeteildicke** ist im Finite-Elemente-Modell der Karosserie als Eigenschaft der verwendeten Schalenelemente hinterlegt und kann von dort abgegriffen werden. Insbesondere bei Schälbeanspruchung hat sie einen großen Einfluss auf die Festigkeit eines Klebflansches. Es werden für den Normalspannungs- und Schubspannungszustand Spannungsüberhöhungsfaktoren hergeleitet, die eine Funktion der Blechdicke sind.
- Die **Überlappungslänge** ist ebenfalls bereits im FE-Modell durch die entsprechende Elementlänge der Klebschichtelemente abgebildet.
- Der **Spannungszustand** an der lokalen Flanschgeometrie ergibt sich aufgrund der äußeren Belastung, die entsprechend der globalen Steifigkeit die Struktur beansprucht. Der aus Schub- und Normalspannungsanteilen bestehende Beanspruchungszustand wird somit durch das FE-Modell bereitgestellt.
- Die **Klebschichtdicke** wird beim Schubspannungszustand mit drei unterschiedlichen Kurven für den Schubspannungsüberhöhungsfaktor berücksichtigt, die für die Klebschichtdicken 0,2 mm, 0,5 mm und 1,0 mm ermittelt wurden. In der Praxis wird man die tatsächliche

Klebschichtdicke im Klebflansch nicht kennen und auf der sicheren Seite die 1,0 mm-Kurve benutzen. Beim Normalspannungszustand wurde nur die Klebschichtdicke 0,5 mm berücksichtigt, da nicht genügend Versuchsergebnisse für die anderen Klebschichtdicken vorlagen, um eine Gesetzmäßigkeit abzuleiten. Hier sollten noch einige Versuche mit 0,2 und 1,0 mm dicken Klebschichten durchgeführt werden. Im ungünstigsten Fall bei reiner Normalspannung und 0,8 mm dicken Blechen liegen die berechneten Ergebnisse ca. 15 % auf der unsicheren Seite. (Die Probe versagt in der Realität also bereits bei 85 % der rechnerischen Bruchlast.)

- Der **Fugenfüllungsgrad** hat für die Festigkeit unter Normalspannung einen großen Einfluss. Es wurden daher drei Kurven für den Normalspannungsüberhöhungsfaktor für die Fugenfüllungsgrade von 0, 0,3 und 0,8 ermittelt. Ähnlich wie bei der Klebschichtdicke, wird man in der Praxis die sichere Kurve für $f = 0$ verwenden.
- Die **Fließgrenze der Fügeteile** wird im Berechnungskonzept nicht explizit berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass die Fließgrenze der Stahlbleche in den berechneten Klebverbindungen mindestens 450 MPa beträgt.¹

6.3 Effektive Normalspannung

In Abb. 6.1, S. 69 erkennt man den typischen Normalspannungsverlauf einer T-Probe bei Zugbelastung. Für die übertragene Kraft F ergibt sich

$$F = b \int_0^u \sigma dx \quad (6.1)$$

¹Für die Versuche wurden bewusst höherfeste Stahlbleche verwendet, um die plastischen Verformungen der Fügeteile gering zu halten. Bei einem beschränkten Versuchsumfang sollte dieser Einfluss als ein weiterer Parameter vermieden werden. Es handelt sich aus Sicht der Anwendbarkeit der Methode aber auch um typische Klebungen. Denn gerade in Bereichen hoher Beanspruchungen werden insbesondere bei den dünnen Blechen fast ausschließlich höherfeste und hochfeste Materialgüten eingesetzt.

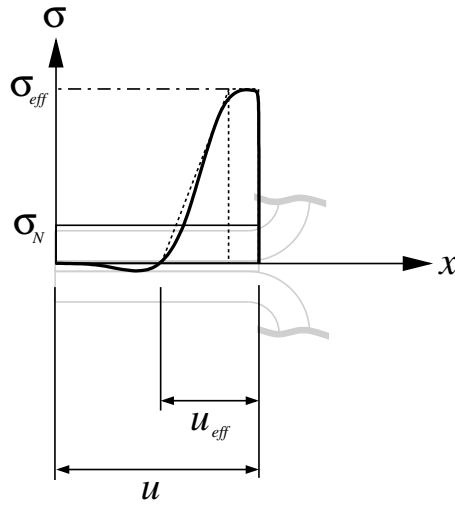


Abbildung 6.1: Vergleich der Nennnormalspannung und der effektiven Normalspannung

mit b als Probenbreite und u als Überlappungslänge. Im Bruchzustand wird die maximale Kraft

$$F_b = b \int_0^u \sigma dx \quad (6.2)$$

übertragen. Zu diesem Zeitpunkt kommt es in der Klebschicht bereits zu deutlichen Plastifizierungen. Dieser Zustand ist durch den abgeflachten Bereich der Spannungskurve am Ende der Klebschicht angedeutet. Bei Vernachlässigung der Druckspannungen und Ansatz eines aus einem linear-elastischen und einem ideal-plastischen Anteil zusammengesetzten Spannungsverlaufes lässt sich das Integral in (6.2) in erster Näherung schreiben als

$$F = b \frac{2}{3} u_{eff} \sigma_{eff} \quad (6.3)$$

bzw. im Bruchzustand für $\sigma_{eff} = \sigma_{krit}$ als

$$F_b = b \frac{2}{3} u_{eff} \sigma_{krit}. \quad (6.4)$$

Der Quotient $\frac{2}{3}$ ist der Formfaktor des Flächenintegrals, das sich aus einem Dreieck und einem Viereck zusammensetzt. σ_{krit} ist die kritische, also maximal ertragbare Normalspannung einer Klebschicht unter reiner Zugbelastung. Aus [SHH02] wird der Wert $\sigma_{krit}=38$ MPa angesetzt. Auflösen nach der effektiven Überlappungslänge u_{eff} liefert

$$u_{eff} = \frac{3}{2} \frac{F_b}{\sigma_{krit} b}. \quad (6.5)$$

u_{eff} ist der Bereich der Klebschicht, der tatsächlich zur Lastüberleitung beiträgt. In Abb. 6.2, S. 70 sind die effektiven Überlappungslängen der T-Proben über der Blechdicke aufgetragen. Es zeigt sich der erwartete Zusammenhang, dass mit dicker werdenden Fügeteilen die effektive Überlappungslänge zunimmt. Bei unendlich dicken und damit starren Fügeteilen geht die effektive Überlappungslänge gegen die tatsächliche. Für die prakti-

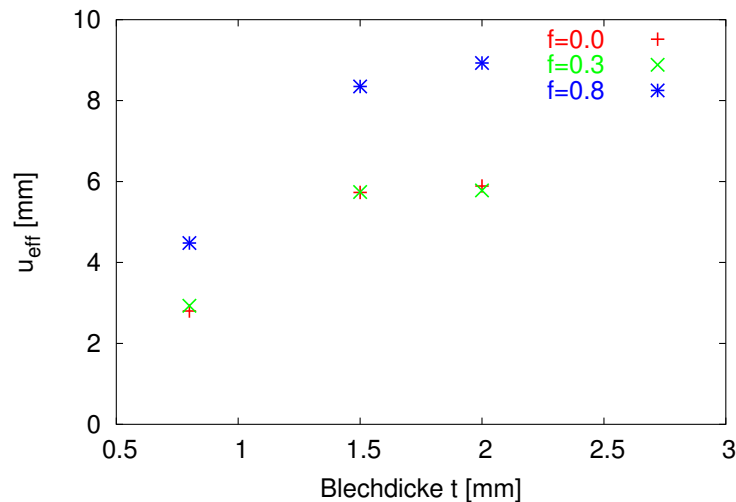


Abbildung 6.2: Effektive Überlappungslänge in Abhängigkeit von der Blechdicke

sche Anwendung ist jedoch eine spannungsorientierte Formulierung besser geeignet. Analog zur Umrechnung der nominalen Überlappungslänge u in die effektive Überlappungslänge u_{eff} lässt sich die Nennnormalspannung σ_N

in die effektive Normalspannung σ_{eff} umrechnen. Die Nennspannung muss also mit einem Spannungsüberhöhungsfaktor k_σ multipliziert werden:

$$\sigma_{eff} = k_\sigma \sigma_N \quad (6.6)$$

Für den Bruchzustand gilt

$$\sigma_{eff} = \sigma_{krit} \quad (6.7)$$

Einsetzen in 6.3 und Auflösen nach k_σ liefert

$$k_\sigma = \frac{3}{2} \frac{u}{u_{eff}}. \quad (6.8)$$

k_σ wird nun wieder über der Blechdicke aufgetragen (siehe Abb. 6.3, S. 72). Das Diagramm enthält die Punkte für die drei unterschiedlichen Fugenfüllungsgrade. Um den Zusammenhang formelmäßig zu erfassen, wird für die Ausgleichskurve die folgende Hyperbelcotangensfunktion mit den Freiwerten C_1 und C_2 angesetzt:

$$k_\sigma = \frac{3}{2} \frac{u}{u_0} \coth(C_1 t^{C_2}) \quad (6.9)$$

u ist die nominale Überlappungslänge des zu berechnenden Klebflansches, u_0 ist die Überlappungslänge von 14 mm, die bei den Versuchen an den T-Proben verwendet wurde.

Der Levenberg-Marquardt-Algorithmus (z.B. in [PTVF92]) liefert nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate für die Freiwerte

Fugenfüllungsgrad f	C_1	C_2
0,0	0,17	0,96
0,3	0,17	0,89
0,8	0,27	0,91

In Abb. 6.3, S. 72 sind die Kurven und die Stützstellen für $u/u_0 = 1$ aufgetragen.

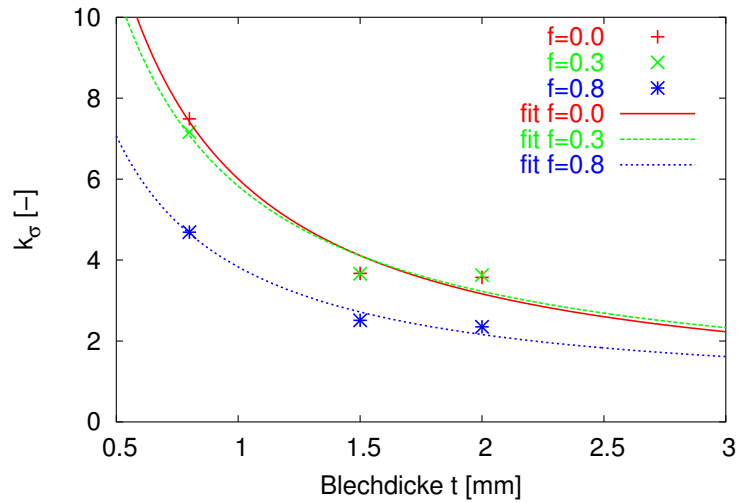


Abbildung 6.3: Normalspannungsüberhöhungsfaktor k_σ in Abhängigkeit von der Blechdicke

6.4 Effektive Schubspannung

Anhand der Ergebnisse der DB-Proben lässt sich für die Schubspannung analog ein Spannungsüberhöhungsfaktor k_τ ableiten, so dass gilt:

$$\tau_{eff} = k_\tau \tau_N \quad (6.10)$$

bzw. für den Bruchzustand

$$\tau_{eff} = \tau_{krit} \quad (6.11)$$

In Abb. 6.4, S. 73 sind die Stützpunkte für k_τ über der Blechdicke t für die drei verschiedenen Klebschichtdicken und $\tau_{krit} = 50 \text{ MPa}$ aufgetragen. Mit dem Ansatz

$$k_\tau = \cothh(C_1 t^{C_2}) \quad (6.12)$$

ergeben sich für die Ausgleichskurve die Freiwerte:

Klebschichtdicke d	C_1	C_2
0,2	0,87	0,82
0,5	0,74	0,40
1,0	0,71	0,28

In Abb. 6.4, S. 73 sind die Stützpunkte und die Ausgleichskurven aufgetragen.

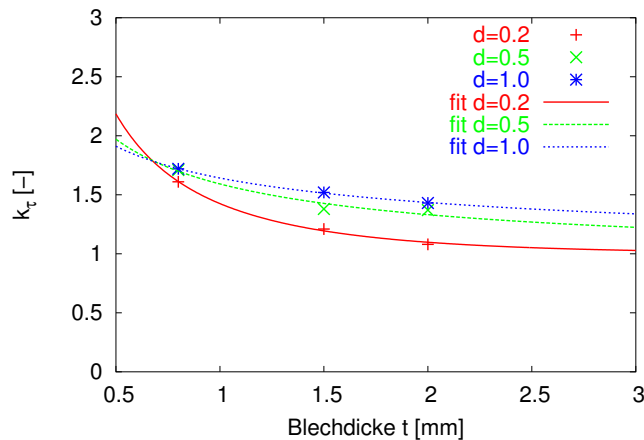


Abbildung 6.4: Schubspannungsüberhöhungsfaktor k_τ in Abhängigkeit von der Blechdicke

6.5 Klebschichtmodell und Spannungsanalyse

Das vorgestellte Berechnungskonzept zur Klebflanschfestigkeit basiert auf der Umrechnung von Nennspannungen in effektive (Maximal-)Spannungen. Deshalb ist es prinzipiell *modellunabhängig*. Als Eingangsparameter werden lediglich die zwischen den Flanschen übertragenen Kräfte bzw. Nennspannungen² benötigt.

²Die Nennspannung ist bei Kenntnis der Klebschichtfläche mit $\sigma_N = F/A$ direkt aus der übertragenen Kraft berechenbar.

Die im Folgenden beschriebene Modellierung wird zur vollautomatischen Erzeugung der Verbindungselemente von inkompatibel³ vernetzten Bauteilen in Gesamtkarosseriemodellen für Steifigkeitssimulationen benutzt. Sie kann als Standardmethode bezeichnet werden, die bei zahlreichen Automobilherstellern in ähnlicher Art und Weise verwendet wird.⁴ Ein Berechnungskonzept für Festigkeitsaussagen an Klebverbindungen, das auf diese Art der Modellierung zurückgreift, macht eine äußerst aufwendige Neuvernetzung für den Einbau der Klebschichtelemente in einer Gesamtkarosserie überflüssig. Dies hat letztlich eine deutliche Kosteneinsparung bei der Modellerstellung zur Folge.

Bei der betrachteten Modellierung im Gesamtkarosseriemodell erfolgt die Ermittlung der Nennspannungen anhand von Hexaeder-Elementen, die durch gewichtete Interpolationselemente mit den durch Schalenelemente abgebildeten Fügeteilen verbunden sind. Die Hexaeder sind an jeweils vier Knoten miteinander verbunden und somit in Flanschlängsrichtung als zusammenhängende Elementkette angeordnet. Entlang des Flansches sollte die Elementkantenlänge 8 bis 10 mm betragen. Über der Flanschbreite, die der Überlappungslänge der Klebung entspricht, und der Klebschichtdicke, die mit einem Millimeter konstant gehalten wird,⁵ wird die Klebschicht mit nur einem Element abgebildet, so dass sich folgende Dimensionen für einen **Klebschicht-Hexaeder** ergeben:

Hexaederbreite	b	8–10	mm
Hexaederlänge	u	12–25	mm
Hexaederdicke	h	1,0	mm

In Abb. 6.5, S. 75 ist eine Klebschichtelementreihe schematisch dargestellt. Die Klebschicht soll bewusst nicht mit mehreren Elementen über die Flanschbreite oder die Klebschichtdicke abgebildet werden, da durch das eine Hexaederelement die **Nennspannung** berechnet werden soll, die

³Vgl. zum Begriff *inkompatibel* die Fußnote 1 auf S. 3.

⁴Dabei unterscheidet sich evtl. die Software zur Erzeugung der Elemente. Die grundsätzliche Abbildung der Verbindungsmittel als Hexaederelemente und die Anbindung an die Blechstruktur über Koppelgleichungen ist aber identisch.

⁵Die Berücksichtigung der tatsächlichen Klebschichtdicke ist über den Spannungsüberhöhungsfaktor möglich. Der Einfluss der Elementdicke auf die Mittelpunktsspannungen des Klebschichthexaders ergab sich in einer Voruntersuchung als vernachlässigbar.

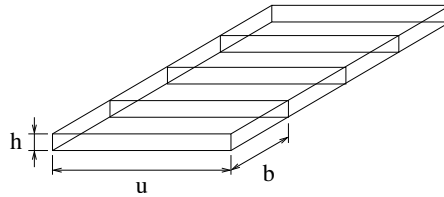


Abbildung 6.5: Bezeichnungen an einer Klebschichtelementreihe

dann anschließend durch die oben abgeleiteten Formeln erst in effektive Spannungen umgerechnet wird.

Die grundsätzliche Art der FE-Modellierung wurde für die Berücksichtigung von Klebflanschen bei der Steifigkeitsberechnung entwickelt ([Tok00, DCS99]). Ihr großer Vorteil ist die Fähigkeit, inkompatibel vernetzte Füge­teile verbinden zu können, indem die Verschiebungen der Hexaederknoten der Klebschichtelemente mithilfe der Interpolationselemente mit den Verschiebungen der entsprechenden Stellen im darüberliegenden Schalenelement des Füge­teiles gekoppelt werden. Um allerdings Festigkeitsaussagen treffen zu können, ist im Vergleich zu Steifigkeitsmodellen eine relativ feine Vernetzung auch der Füge­teile nötig. Bei **Schalenelementkantenlängen von ca. 5–6 mm** ist die Abhängigkeit der im Klebschichthexaeder bestimmten Mittelpunktspannungen von der Vernetzung der Füge­teile äußerst gering. Die Abweichungen liegen unter 5%.⁶

6.6 Überlagerung und Ausnutzungsgrad

Die Ableitung der bisherigen effektiven Spannungen aus den Nennspannungen erfolgte getrennt für den Normal- und den Schubspannungszustand. Die Beanspruchung eines Klebflansches lässt sich normiert auf die jeweilige ertragbare Spannung schreiben als $\sigma_{eff}/\sigma_{krit}$ unter Normalspannung bzw. τ_{eff}/τ_{krit} unter Schubspannung. Der Quotient entspricht dem Ausnutzungsgrad, d. h. erreicht er den Wert 1, versagt die Klebschicht.

⁶Diese Werte erarbeitete der Autor im Rahmen einer Untersuchung zur Netzabhängigkeit inkompatibler Schweißpunkt-Modelle für die Prozessoptimierung der virtuellen Betriebsfestigkeits-Auslegung von Gesamtkarosserien.

In der Realität treten beliebige Kombinationen aus Normal- und Schubspannung in der Klebschicht auf. Für die Berechnung des **Ausnutzungsgrades** β unter kombinierter Beanspruchung wird hier zunächst die folgende Interaktionsbeziehung

$$\beta = \sqrt{(\sigma_{\text{eff}}/\sigma_{\text{krit}})^2 + (\tau_{\text{eff}}/\tau_{\text{krit}})^2} \quad (6.13)$$

angesetzt und dann bei der Nachrechnung der KS-Proben-Versuche überprüft.

Für ausreichende Klebflanschfestigkeit muss also mindestens die Bedingung

$$\beta \leq 1 \quad (6.14)$$

erfüllt sein. Inwieweit für die Praxisanwendung noch weitere Sicherheitsfaktoren zu berücksichtigen sind, soll an dieser Stelle für einen Vergleich mit den Versuchswerten außer Acht gelassen werden.

6.7 Validierung mithilfe der KS-Proben

Für die Validierung des Berechnungskonzeptes wurde der Versuchsteil 3 herangezogen, der bei der bisherigen Ableitung des Berechnungskonzeptes noch nicht benutzt wurde.

Die Bleche der KS-Proben wurden mit den in Abschnitt 6.5 vorgestellten Elementkantenlängen für die Schalenelemente vernetzt. Die Biegeradien der Flansche sind vereinfacht als rechte Winkel abgebildet, so wie dies in FE-Modellen von Gesamtkarosserien üblich ist. Die Klebschicht wurde mithilfe der oben beschriebenen Verbindungsmethode für inkompatible Netze erzeugt. Die Modelle wurden mit den im Versuch bestimmten mittleren Bruchlasten in der Simulation belastet. Anschließend wurden die Mittelpunktsspannungen der Klebschichthexaeder ausgelesen und als Eingangswerte der Nennspannungen für die Umrechnung in die effektiven Spannungen gemäß der Vorgehensweise aus den Abschnitten 6.3 und 6.4 eingesetzt. Nach Abschnitt 6.6 wurde dann für jedes Element der Ausnutzungsgrad β unter der jeweiligen kombinierten Belastung berechnet. Ausschlaggebend ist jeweils das Element mit dem größten Ausnutzungsgrad. Bei völliger Übereinstimmung zwischen Berechnung und Versuch müsste sich folglich

der Wert 1,0 ergeben. Ausnutzungsgrade größer 1 bedeuten, dass die Berechnung zu konservativ ist, Werte kleiner 1, dass die Berechnung auf der unsicheren Seite liegt.

Abb. 6.6, S. 77 zeigt das FE-Modell einer KS-Probe.

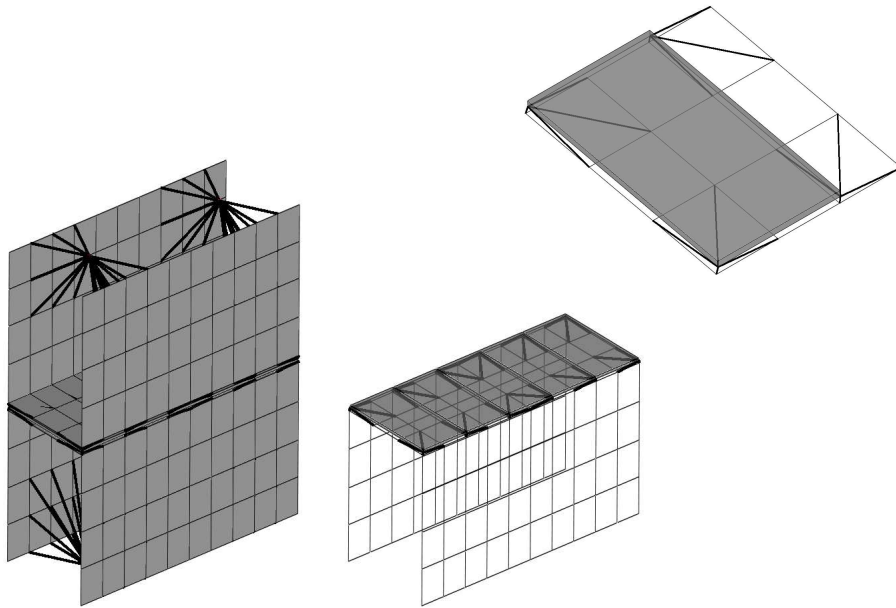
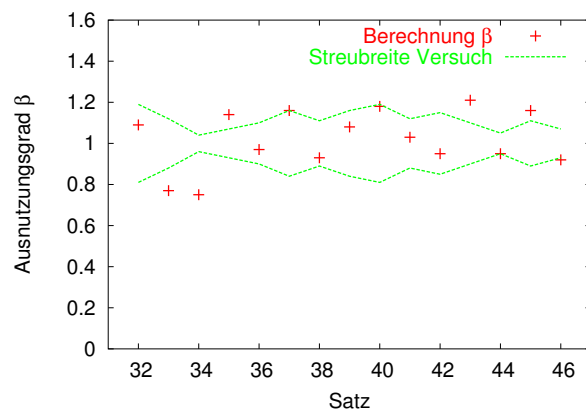


Abbildung 6.6: FE-Modell der KS-Probe

In Abb. 6.7, S. 78 sind die für die KS-Proben berechneten Ausnutzungsgrade zusammen mit der Streuung der Versuche aufgetragen. Die berechneten Werte liegen für die meisten Versuche innerhalb des Streubandes. Lediglich bei sechs Sätzen ergeben sich Ausnutzungsgrade, die außerhalb der Versuchsstreuung liegen. Die durchschnittliche Abweichung zwischen Berechnung und Versuchsmittelwert liegt bei 12 %, die maximale Abweichung beträgt 25 %, die maximale Versuchsstreuung 19 %.

Tabelle 6.4: Berechneter Ausnutzungsgrad β

<i>Satz</i>	<i>t</i> [mm]	<i>d</i> [mm]	<i>f</i> [°]	α [-]	β [-]
1.0.3/32	1,5	0,5	0,8	45,0	1,09
1.0.4/33	1,5	0,5	0,8	22,5	0,77
1.0.5/34	1,5	0,5	0,8	0,0	0,75
2.1.1/35	1,5	0,2	0,8	90,0	1,14
2.1.3/36	1,5	0,2	0,8	45,0	0,97
2.1.4/37	1,5	0,2	0,3	22,5	1,16
2.1.5/38	1,5	0,2	0,3	0,0	0,93
2.2.1/39	1,5	1,0	0,8	90,0	1,08
2.2.2/40	1,5	1,0	0,8	67,5	1,18
2.2.4/41	1,5	1,0	0,3	22,5	1,03
2.2.5/42	1,5	1,0	0,3	0,0	0,95
3.1.4/43	0,8	0,5	0,8	22,5	1,21
3.1.5/44	0,8	0,5	0,8	0,0	0,95
3.2.4/45	2,0	0,5	0,8	22,5	1,16
3.2.5/46	2,0	0,5	0,8	0,0	0,92

Abbildung 6.7: KS-Proben: Berechneter Ausnutzungsgrad β und Streubreite der Versuche (95 %-Konfidenz-Intervall)

7 Zusammenfassung und Ausblick

Klebverbindungen wurden im Laufe der vergangenen Jahre zu einem **festen Bestandteil der Verbindungstechnik** im Karosseriebau. Gerade durch den Einsatz neuer Werkstoffe und der damit verbundenen **Mischbauweisen** gewinnen Klebverbindungen an Bedeutung, aber auch die Flansche reiner Stahlkarosserien werden bereits zu einem beträchtlichen Teil geklebt. Aufgrund der mangelnden Langzeiterfahrungen mit Klebverbindungen findet zur Zeit zwar noch eine redundante Auslegung in Verbindung mit Schweißpunkten oder Nieten statt, d. h. sicherheitsrelevante Bauteilverbindungen wären auch ohne den verbauten Klebstoff ausreichend dimensioniert, aber schon heute leisten Klebverbindungen einen wichtigen Beitrag zur statischen und dynamischen Steifigkeit und Festigkeit.

Um das volle Potenzial der Klebverbindungen auszunutzen und dadurch erhebliche Kosten einzusparen, werden in der Zukunft die redundant eingesetzten punktförmigen Verbindungsmittel immer weiter eingespart werden.

Dies unterstreicht für die **virtuelle Auslegung der Karosserie** die Notwendigkeit, für Klebverbindungen die gleiche **Prognosesicherheit** wie für die anderen Verbindungsmittel zu erzielen. Hinsichtlich der **statischen Festigkeit** gibt es in der Literatur zahlreiche Ansätze, die entweder kontinuumsmechanische Grenzwert- oder Bruchmechanik-Ansätze vorschlagen. Alle Konzepte verlangen jedoch **detaillierte FE-Netze** der Klebschicht, die für den Einsatz in Gesamtkarosseriemodellen mit einem **unvertretbar hohen Aufwand** verbunden wären.

Für den industriellen Einsatz ist die Frage der **Handhabbarkeit der Berechnungsmodelle** von überaus großer Bedeutung, da sich die Geometrie der einzelnen Bauteile in der Entwicklungsphase ständig ändert, so dass **zahlreiche Varianten der Gesamtkarosserie innerhalb kurzer Zeit** rechnerisch bewertet werden müssen. Der Simulationsprozess hat sich auf die geforderten kurzen Antwortzeiten durch **starke Parallelisierung der FE-Modellerstellung** eingestellt. D. h. die geänderten

Bauteile werden unabhängig voneinander vernetzt und im anschließenden Assembly-Prozess, dem Positionieren und Zusammenbauen, **automatisch verschweißt und verklebt**. Für die Steifigkeitsmodelle wurde dabei eine Klebschichtabbildung entwickelt, die die Klebschicht durch eine Hexaederelementreihe in Flanschlängsrichtung abbildet. Die einzelnen Elemente werden über Koppellemente mit den Schalenelementen der Blechflansche verbunden.

Das Berechnungskonzept, das in dieser Arbeit entwickelt wurde, soll die Lücke der **Festigkeitsberechnung von Klebverbindungen im CAE-Auslegungsprozess** schließen, indem auf die vorhandene **Steifigkeitsmodellierung für Klebschichten** aufgesetzt wird. Die Methode verwendet die Normal- und Schubspannungen der Klebschichtelemente im Sinne von **Nennspannungen als Eingangsgrößen**, für die jeweils Spannungsüberhöhungsfaktoren angegeben werden, die die entscheidenden Einflussgrößen für die Klebflanschfestigkeit berücksichtigen, so dass die **effektiven Normal- und Schubspannungen** berechnet werden können. Diese werden durch Normierung auf die maximal ertragbaren Spannungen unter Zug bzw. Schub in Ausnutzungsgrade umgerechnet und mithilfe einer **quadratischen Interaktionsbeziehung** in einen **richtungsunabhängigen Ausnutzungsgrad** umgerechnet.

Für die Ableitung der **Spannungsüberhöhungsfaktoren k_σ und k_τ** wurden Versuche an zwei für den jeweiligen Beanspruchungszustand **typischen Flanschgeometrien** durchgeführt und ausgewertet. Dabei repräsentieren die **T-Proben** den Normalspannungszustand in der kritischsten Form des **schälbeanspruchten Flansches**. Als **Haupteinflussgrößen** auf die Festigkeit wurden die **Blechdicke** und der **Fugenfüllungsgrad** identifiziert. Die **DB-Proben** spiegeln den Schubspannungszustand wider. Die Haupteinflussgrößen sind **Blechdicke** und **Klebschichtdicke**.

Die **Übertragbarkeit des Berechnungskonzeptes** wurde an einer dritten unabhängigen Versuchsreihe, den **KS-Proben**, getestet. Diese Probenform ermöglicht es, die Klebschicht mit unterschiedlich **kombinierten Beanspruchungszuständen** zu belasten. Die durchschnittliche **Abweichung zwischen den berechneten und den tatsächlichen Bruchlasten** lag bei **12 %**. Untersucht wurden verschiedene Blechdicken, Lastrichtungen und Klebschichtdicken innerhalb der im Karosseriebau üblichen Spannen.

Das Ziel der **Identifizierung der kritischen Klebungen** in der Karosserie und die **Berechnung ihrer Ausnutzungsgrade** ist mit dem gezeigten **semi-empirischen Vorgehen** also möglich. Zusätzlicher Aufwand bei der Modellierung der Klebschicht ist durch die **Übernahme der Klebschichtabbildung aus der Steifigkeitsberechnung** nicht nötig, so dass auch die Anforderung der Verwendbarkeit der Methode für **Gesamtkarosseriemodelle mit inkompatibel vernetzten Bauteilen** gegeben ist.

Für die Erweiterung der Methode in der CAE-Auslegung von Karosserien müssen zukünftig noch weitere wichtige Meilensteine erreicht werden:

- Der nächste Schritt für eine breitere Anwendung des Konzeptes der Klebflanschfestigkeit sollte die **Erweiterung der Methode für andere Fügeartikelwerkstoffe**, insbesondere Aluminium und CFK sein. Bei Einhaltung der Voraussetzung kohäsiven Versagens ist eine Übertragung relativ einfach möglich, da es für die Beanspruchung der Klebschicht auf die Fügeartikelverformungen unter Last, also die Fügeartikelsteifigkeit, ankommt. Allerdings plastifizieren besonders die Stahlbleche der dünnen T-Proben in der Zone der größten Biegebeanspruchung schon unterhalb der Bruchlast, so dass hier die direkte Ermittlung über äquivalente lineare Steifigkeiten wieder eingeschränkt werden muss. Ein viel versprechender Lösungsansatz könnte die Anwendung eines Grenzwertkriteriums¹ auf sehr detailliert vernetzte zweidimensionale Feinmodelle der Probekörper zur Bestimmung der Bruchlasten mit einer daran anschließenden Bestimmung der Spannungsüberhöhungsfaktoren sein, die dann im Grobmodell Anwendung finden.
- Eine **Erweiterung hinsichtlich höheren und niedrigeren Temperaturen**, möglichst über den gesamten Anwendungsbereich im Fahrzeug, also zwischen -30 und +85 °C, muss in Angriff genommen werden. Wie die Abb. 3.4 auf S. 10 zeigt, ändern sich die mechanischen Eigenschaften des untersuchten Klebstoffes stark mit der Temperatur. Hier sei aber auch darauf hingewiesen, dass bei höheren Temperaturen nicht automatisch mit einer Verschlechterung der Klebflanschfestigkeit gerechnet werden muss — auch wenn dies die

¹z.B. das z. Zt. im AiF-Projekt P593, *Methodenentwicklung zur Berechnung und Auslegung geklebter Stahlbauteile für den Fahrzeugbau* erarbeitete

Spannungs-Dehnungskurve auf den ersten Blick vermuten lässt. Im warmen Zustand wird die Klebschicht weicher und kann dadurch lokale Spannungsspitzen durch Lastverteilung besser abbauen, so dass in Folge des homogeneren Spannungszustandes eine größere Klebschichtfläche an der Lastüberleitung beteiligt ist, was letztendlich auch in höheren Klebflanschfestigkeiten resultieren kann. Hier sind zum einen für eine Implementierung in das Berechnungskonzept weitere Versuche unter verschiedenen Temperaturen nötig.

- Neben den Effekten, die die Klebschicht an sich betreffen, wirft die **Kombination mit den punktförmigen Fügeelementen** weitere Fragen auf: Beim Punktschweißen wird ein Teil des Klebstoffes in unmittelbarer Nähe des Schweißpunktes abgebrannt. Die Größe der Abbrandzone ließe sich durch zerstörendes Öffnen punktschweißgeklebter Proben feststellen. Schwieriger ist allerdings die kombinierte Lastübertragung im Berechnungsmodell zu berücksichtigen. Die Lastverteilung auf Schweißpunkt und Klebschicht ist dabei stark lastrichtungsabhängig. Bei Schälzug trägt zunächst nur die Klebschicht im Wurzelbereich, bei Schub wirken Schweißpunkt und Klebschicht parallel. Für eine Vorauslegung mit Grobmodellen, die diese lokalen Effekte nicht abbilden können, sollten deshalb für die Beurteilung der Klebschichtausnutzung die Schweißpunkte aus dem Berechnungsmodell entfernt werden. Die Klebschicht würde sonst im Rechenmodell unrealistisch stark entlastet werden. Die Spannungen dort wären also zu niedrig und die Ergebnisse lägen auf der unsicheren Seite.
- Um die Lücke zwischen den grundlegenden Formulierungen von Werkstoffgesetzen, die die physikalischen Gesetze einer Klebung allgemeiner widerspiegeln können, aber aufgrund der benötigten hochfeinen Auflösung des FE-Modelles für die praktische Anwendung nicht geeignet sind, und den in FE-Modellen von Karosseriestrukturen verwendeten Grobmodellen zu schließen, sollten **Regeln für die Anwendung von Grenzwertkriterien auf gröbere FE-Modelle** abgeleitet werden. Hier seien empirisch bestimmte Mittelungslängen genannt, die in der Größe der verwendeten Elementgrößen des Grobmodelles liegen könnten, ohne die Ergebnisgenauigkeit im Vergleich mit dem Feinmodell zu stark zu vermindern. Ein

anderer Ansatz wäre die Verknüpfung von an Feinmodellen berechneten Materialparametern und Eingangsgrößen für das Grobmodell. Dieser Weg müsste eingeschlagen werden, wenn man erkennt, dass bestimmte physikalische Effekte mit der gegenwärtigen Netzgröße im Grobmodell nicht darstellbar sind.

Literaturverzeichnis

- [CP86] P. Czarnocki und K. Piekarski. Non-linear numerical stress analysis of a symmetric adhesive-bonded lap joint. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 6(3):157–160, 1986.
- [Cro89] A.D. Crocombe. Global yielding as a failure criterion for bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 9(3):145–153, 1989.
- [CSD98] B. Chang, Y. Shi und S. Dong. Numerical studies on the stress distribution in weldbonded joints with different adhesives. *China Welding*, 7(2):117–124, 1998.
- [CSD99] B. Chang, Y. Shi und S. Dong. Comparative studies on stresses in weld-bonded, spot-welded and adhesive-bonded joints. *Journal of Materials Processing Technology*, 87:230–236, 1999.
- [DCS99] Heiserer D., M. Chargin und J. Sielaf. High performance, process oriented, weld spot approach. In *MSC 1st Worldwide automotive conference, München*. 1999.
- [DS93] L. Dorn und N. Salem. FEM-Berechnung von Kunststoff-Metall-Klebverbindungen. *kleben und dichten*, 37(3):34–38, 1993.
- [DS95] L. Dorn und N. Salem. FEM-Berechnung an Kunststoff-Metall-Klebverbindungen (Teil 1). *kleben und dichten*, 39(10):30–36, 1995.
- [Hab97] G. Habenicht. *Kleben: Grundlagen, Technologie, Anwendungen*. Springer Verlag, dritte Auflage, 1997.

-
- [Hes00] O. Hesebeck. *Zur Modellierung von Schädigungsprozessen in elastoplastischen Materialien*. Dissertation, Universität Karlsruhe, 2000.
- [HHD02] Hahn, Hennemann und Dilger. Abschlussbericht des Projektes P477: Untersuchungen zum Crashverhalten geklebter und hybridgefügter Stahlblechverbindungen. Technischer Bericht, LWF Paderborn, 2002.
- [HOL82] O. Hahn, G. Otto und F. Lange. Spannungsanalyse von Metallklebeverbindungen mit der Finite-Elemente-Methode. *Schweißen und Schneiden*, 34(4):189–192, 1982.
- [HW84] O. Hahn und B. Wender. Beanspruchungsanalyse von geometrisch und werkstoffmechanisch „unsymmetrischen“ Metallklebeverbindungen mit der Finite-Elemente-Methode. Technischer Bericht, Land Nordrhein-Westfalen, Nr. 3187, 1984.
- [HW85] O. Hahn und H. Wender. Beanspruchungsanalyse von geometrisch und werkstoffmechanisch „unsymmetrischen“ Metallklebeverbindungen mit der Finite-Elemente-Methode. *Schweißen und Schneiden*, 37(2), 1985.
- [Kö84] G. Kötting. *Untersuchung der Klebschichtmorphologie und der beanspruchungsabhängigen Deformations- und Versagensmechanismen in der Klebfuge von Metallklebeverbindungen*. Dissertation, Univ. Ges. Hochsch. Paderborn, 1984.
- [LLST99] G. Li, P. Lee-Sullivan und R. Thring. Nonlinear finite element analysis of stress and strain distributions across the adhesive thickness in composite single-lap joints. *Composite Structures*, 46:395–403, 1999.
- [McC99] J.C. McCarthy. Failure criteria for adhesive joints, an industry briefing. *Materials Metrology dti*, 1999.
- [Ott78] G. Otto. *Untersuchung der Spannungen, Verformungen und Beanspruchungsgrenzen von Kunststoffschicht und Füge teil bei einschnittig überlappten Metallklebeverbindungen*. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 1978.

- [PSS99] P. Pandey, H. Shankaragouda und A. Singh. Nonlinear analysis of adhesively bonded lap joints considering viscoplasticity in adhesives. *Computers and Structures*, 70:387–413, 1999.
- [PTVF92] W.H. Press, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling und B.P. Flannery (Herausgeber). *Numerical Recipes in FORTRAN - The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press, zweite Auflage, 1992.
- [RCY73] R.S. Raghava, R.M. Cadell und G.S.Y. Yeh. The macroscopic yield behaviour of polymers. *Journal of Materials Science*, 8:225–232, 1973.
- [Rom99] G. Romanos. Strength evaluation of axisymmetric bonded joints using anaerobic adhesives. *Int. J. of Materials and Technology*, 14(5 and 6):430–443, 1999.
- [RS95] K. Reiling und M. Schlimmer. Der Zugscherversuch zur Ermittlung von Klebstoffkennwerten. *Werkstoffprüfung*, Seiten 109–118, 1995.
- [Sch82] M. Schlimmer. Anstrengungshypothese für Metallklebverbindungen. *Zeitschrift für Werkstofftechnik*, 13:215–221, 1982.
- [Sch03] M. Schlimmer. Grundlagen zur Berechnung des mechanischen Verhaltens von strukturellen Klebverbindungen des Fahrzeugbaus. In *10. Paderborner Symposium Fügetechnik, Mechanisches Fügen und Kleben*, Seiten 107–133. 2003.
- [SHH02] Schlimmer, Hahn und Hennemann. Methodenentwicklung zur Berechnung und Auslegung geklebter Stahlbauteile für den Fahrzeugbau. Technischer Bericht, AiF-Projekt P 593/07/2002, 2002.
- [SKT98] A. Sheppard, D. Kelly und L. Tong. A damage zone model for the failure analysis of adhesively bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 18:385–400, 1998.
- [SRK99] M. Schlimmer, K. Reiling und O. Klapp. Weiterentwicklung des Zugscherversuchs nach DIN 54 451 zur Ermittlung

der Tau-Gamma-Funktion von Klebschichten in einer einfach überlappten Klebung; Forschungsbericht 1-1999 des AiF-Forschungsvorhabens Nr.10.975 N. Technischer Bericht, Institut für Werkstofftechnik, Universität Gh Kassel, 1999.

- [Tok00] G. Tokar. Punktschweißkleber - Eigenschaften und Berechnungsmethode für lineare Karosseriesteifigkeiten. In *VDI Berichte Nr. 1559*, Seiten 549–575. 2000.
- [Vol38] O. Volkersen. Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten. *Luftfahrtforschung*, 15:41–47, 1938.
- [Vol53] O. Volkersen. Die Schubkraftverteilung in Leim-, Niet- und Bolzenverbindungen. *Energie u. Tech.*, Seiten 68–71, 103–108 u. 150–154, 1953.
- [vS01] I. van Straalen. *Development of Design Rules for Structural Adhesive Bonded Joints*. Dissertation, Technische Universiteit Delft, 2001.