

Virtuelle Auslegung der Karosseriestruktur für Betriebsbeanspruchungen

Entwicklung eines durchgängigen
Auslegungsprozesses unter Berücksichtigung von
Prozeßeinflüssen aus der Fertigung

Dipl.-Ing. (Univ.) Hans Peter Gössing

Technische Universität München
Institut für Tragwerksbau
Lehrstuhl für Stahlbau

**Virtuelle Auslegung der Karosseriestruktur
für Betriebsbeanspruchungen**

**Entwicklung eines durchgängigen
Auslegungsprozesses unter Berücksichtigung von
Prozeßeinflüssen aus der Fertigung**

Dipl.-Ing. (Univ.) Hans Peter Gössing

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. Karl Schikora

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr. Ing., Dr.-Ing. habil. Dimitris Kosteas
2. Univ.-Prof. Dr. rer. pol., Dr. rer. pol. habil. Horst Wildemann

Die Dissertation wurde am 18.12.2000 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieurwesen und Vermessungswesen am 29.06.2001 angenommen.

Vorwort

Diese Dissertation entstand während meiner Tätigkeit bei der BMW AG. Die Arbeit setzt thematisch auf den Untersuchungen meiner Diplomarbeit auf und ist eine Fortführung meiner Tätigkeit bei der BMW AG.

Durch die Wahl eines Themas aus der Automobilindustrie eröffnete sich mir die Möglichkeit, unbefangen an eine für mich neue und reizvolle Problemstellung heranzugehen. Daher möchte ich mich bei all denen bedanken, die es mir ermöglicht haben, diese Dissertation bei der BMW AG anzufertigen.

Eine solche Arbeit läßt sich natürlich nicht ohne Unterstützung und Betreuung fertigstellen. Daher möchte ich mich an dieser Stelle bei allen bedanken, die mich bei der Realisierung dieser Arbeit maßgeblich unterstützt haben. Besonders möchte ich meinem Betreuer bei BMW Herrn Stamm danken, der mir die Möglichkeit gab, dieses Thema zu bearbeiten, und mich trotz seines vollen Terminplans während der gesamten Bearbeitungszeit jederzeit unterstützte.

Den Mitarbeitern von P+Z Engineering möchte ich für Ihre Hilfe bei meiner Einarbeitung und für die Unterstützung bei den vielen technischen Problemen, die während meiner Arbeit auftauchten, danken.

Herrn Prof. Dr. Kostea danke ich für seine Unterstützung bei meiner Themenwahl und für die Offenheit, die er meinen Ideen und Vorschlägen gegenüber zeigte. Er war mir die ganze Zeit über ein sehr guter Berater. Herrn Prof. Wildemann danke ich für seine Unterstützung als zweiten Prüfer.

Speziell möchte ich mich mit dieser Arbeit bei meinen Eltern und Schwiegereltern bedanken, die mich während der gesamten Zeit unterstützten. Ohne ihren Rückhalt hätte diese Arbeit nicht zustande kommen können.

Meiner Ehefrau danke ich für die vielen Stunden in der sie mich bei dieser Arbeit unterstützte. Auh danke ich ihr dafür, daß sie mir immer wieder zur Seite stand neben dem alltäglichen Druck ihrer beruflichen Tätigkeit.



Virtuelle Auslegung der Karosserie- struktur für Betriebsbeanspruchungen

Entwicklung eines durchgängigen Auslegungsprozesses unter Berücksichtigung von Prozeßeinflüssen aus der Fertigung

1.	Virtuelle Auslegung der Karosseriestruktur für Betriebsbeanspruchungen	
1.1	Einleitung	1
1.1.1	Problemstellung	2
1.1.2	Ziel der Arbeit	2
1.2	Reengineering im Fahrzeugentwicklungsprozeß	3
1.3	Auswirkungen des Reengineerings auf den Entwicklungsprozeß der Karosseriestruktur	5
1.4	Simulationsbasierte Umsetzung des Reengineering	8
1.5	Anforderungen an simulationsbasierte Auslegungsabläufe	9
1.5.1	Effizienzsteigerung	9
1.5.2	Verbesserung der Aussagegüte und Zuverlässigkeit	10
1.6	Einbindung in den Entwicklungsprozeß der Karosseriestruktur	10
1.7	Auslegungsphasen der CAE-Betriebslastauslegung	11
1.8	CAE-Bench Betriebslastauslegung	14
1.8.1	Modellaufbau	15
1.8.2	Analyse- und Auswerteverfahren	16
1.8.3	Auswertung	16
1.9	Berücksichtigung von Prozeßinformationen im virtuellen Auslegungsprozeß	17

2.	Modellaufbau im CAE-Prozeß	
2.1	Entwicklung der Modellgüte im Auslegungsprozeß	20
2.2	Durchgängige Datenzuordnung und -bezeichnung	21
2.3	Modellaufbau im Prozeß der CAE-Betriebslastauslegung	22
2.3.1	CAD-Datenübernahme	22
2.3.2	Bauteilvernetzung	24
2.3.3	Aufbau des Massenmodells	24
2.3.4	Assemblierung des Gesamtfahrzeugmodells	25
2.4	Nutzung von Synergiepotentialen bei der Erstellung von Gesamtfahrzeugmodellen	26
2.5	Benchmark Vernetzungsstrategien	28
2.6	Abbildung von Punktschweißverbindungen bei der Betriebslastauslegung	30
2.6.1	Gegenüberstellung der derzeitigen Schweißpunktabbildungen	32
2.6.2	Schweißpunktabbildung für die Lebensdauersimulation	34
2.6.3	Versuchstechnische Ermittlung von Steifigkeits- und Festigkeitskennwerten von Schweißpunkten	35
2.6.4	Schweißpunktabbildung für die statische Festigkeitssimulation	37
3.	Analyseprozeß und Verfahren zur Ergebnisauswertung	
3.1	Auslegungsprozeß Betriebslasten	42
3.1.1	Rahmenbedingungen für den Simulationsprozeß Betriebslasten	42
3.1.2	Abgleich von Simulationsmethoden und -modellen mit dem praktischen Versuch	45
3.2	Simulation von Teilstrukturen unter Gesamtfahrzeugrahmenbedingungen	47
3.2.1	Die Submodelltechnik	48
3.2.2	Die Superelementtechnik	49
3.2.3	„Dynamisches Submodellverfahren“	50
3.2.4	Vorgaben für die Verwendung des dynamischen Submodellverfahrens	51
3.2.5	Umsetzung in ANSYS	55
3.2.6	FE-PARTCUT	56
3.3	Auslegung von dynamisch beanspruchten Strukturen	58
3.3.1	Ermittlung der dynamischen Reaktion im Versuch	59
3.3.2	Rechnerische Ermittlung der dynamischen Reaktion	59
3.3.3	Berücksichtigung des Resonanzverhaltens bei Strukturauslegung für Betriebslasten	64
3.4	Darstellung von Betriebsbeanspruchung im Zeitbereich	65
3.4.1	Visualisierung der zeitlichen Beanspruchung	66
3.4.2	FE-STRUCT	67

4.	Prozeßsimulation im Umfeld der CAE-Betriebslastauslegung	
4.1	Einfluß des Umformprozesses auf die Beanspruchbarkeit von Blechen	70
4.2	Verfahren der Prozeßsimulation	71
4.2.1	Einschrittverfahren	72
4.2.2	Inkrementelle Simulationsverfahren	73
4.2.3	Simulationsergebnisse der Umformsimulation	74
4.3	Integration der Tiefziehsimulation in den Prozeß Betriebslastauslegung	75
4.3.1	Anforderungen an das Schnittstellenprogramm FE-FORM	76
4.3.2	Rahmenbedingungen der Betriebslastauslegung für die Tiefziehsimulation	77
4.3.3	Modifikation der Fließkurven auf Basis der Ergebnisse der Umformsimulation	79
4.4	Die Tiefziehschnittstelle FE-FORM	81
4.4.1	Vorgehensweise und Datenfluß in FE-FORM	82
4.4.2	Übertragung der Abstreckung	84
4.4.3	Übertragung der Verfestigung	85
4.5	Einfluß des Umformprozesses bei statischen Betriebsbeanspruchungen	87
5.	Zusammenfassung und Ausblick	

Anhang

I.	Mechanische Eigenschaften von Metallen	
I.1	Materialkennwerte für die Betriebslastauslegung	94
I.2	Prüfverfahren für metallische Werkstoffe	96
I.2.1	Der statische Zugversuch	97
I.2.2	Der Dauerschwingversuch	98
I.3	Auswertung des statischen Zugversuchs	101
I.3.1	Bruchdehnung	101
I.3.2	Gleichmaßdehnung	102
I.3.3	Brucheinschnürung	102
I.3.4	Dehngrenze	103
I.3.5	Streckgrenze	103
I.3.6	Zugfestigkeit	104
I.3.7	Elastizitätsmodul	104
I.3.8	Querdehnung	105

I.4	Verfestigungsverhalten von metallischen Werkstoffen	106
I.4.1	Werkstoffgesetze für mehrachsige elasto-plastische Beanspruchungen	106
I.4.2	Fließbedingungen	107
I.4.3	Verfestigungsannahmen für elasto-plastische Werkstoffe	109
I.5	Versuchsauswertung bei großen Dehnungen	111
I.6	Definition eines Prüfprogramms für elasto-plastische Materialkennwerte	115
1.7	Prüfprogramm für zyklische Materialkennwerte	116
II.	Literaturverzeichnis	
III.	ANSYS-Makros	
III.1	SPNEU.MAC	133
III.2	SUB-SYS.MAC	137
III.3	PARTCUT.MAC	138

Abkürzungen

ABAQUS	FE-Simulationsprogramm
ANSYS	FE-Simulationsprogramm
ATZ	Automobiltechnische Zeitschrift
AZT	Crash-Auslegungskriterium
BG	Baugruppe
CA	Computer aided
CAD	Computer aided design
CAE	Computer aided engineering
CAM	Computer aided manufacturing
CATIA	CAD-Software
CFK	Faser-Verbund
CGI	Common Gateway Interface
DB	Datenbank
DIN	Deutsche Industrie Norm
DMS	Dehnmeßstreifen
DMU	Digital Mock-Up (virtueller Konstruktionsprozeß)
Dyko	Dynamische Korosionsprüfung
ECE	Europäische Norm
FALANCS	Lebensdauersimulations-Programm
FE	Finite Elemente
FEM	Finite Elemente Methode
FEMAP	FE-Schnittstellenprogramm
FVA	Full vehicle Assembler
FZG	Fahrzeug
GUI	Graphic user interface
HA	Hinterachse
HAA	Hinterachsaufnahme
HAT	Hinterachsträger
HTML	HyperText Markup Language
iMAN	Produktdatenmanagementsystem der Fa. Unigraphics Solutions
ISO	International Standards Organisation
IT	Informationstechnik
IV	Informationsverarbeitung
MKS	Mehrkörpersimulation
MPP	Massive Paralell Processor
MSC/NASTRAN	FE-Simulationsprogramm
NVH	Noise, Vibration, Harshness
PDM	Product Data Management
PEP	Produktentstehungsprozeß
PRISMA	System zum Verwalten von CATIA-Daten
PSK	Punktschweißkleber
RBE	Interpolationselemente (constraint equations)
SG	Schutzgas
SMB	Standardmassenbelegung
SOP	Start of production
SP	Schweißpunkt
VDA	CAD-Dateiformat
VE	Vorentwicklung
VIP	Verbindungstechnisches Informations- und Produktionssystem
WEZ	Wärmeeinflußzone

Virtuelle Auslegung der Karosserie- struktur für Betriebsbeanspruchungen

1.1 Einleitung

Der Wettbewerbsdruck im Bereich der Automobilindustrie hat zu stark veränderten Anforderungen und Rahmenbedingungen bei der Entwicklung neuer Fahrzeuge geführt. Aus dieser Situation entstanden im Laufe der letzten Jahre verschiedenste technologische Weiterentwicklungen, Verbesserungen und neue Funktionalitäten in Fahrzeugen. Diese haben dazu geführt, daß moderne Fahrzeuge mit ca. 15 – 20.000 Einzelteilen einen sehr hohen Komplexitätsgrad erreicht haben. Das Automobil stellt damit heute das technisch aufwendigste Gebrauchsgut dar, das in Großserie gefertigt wird.

Diese hohe Komplexität muß durch den Entwicklungsprozeß für jede Neuentwicklung gesteuert, abgesichert und organisiert werden. Die Vielzahl einzelner Bauteile und Komponenten und die dadurch zwangsläufig entstehenden Schnittstellen führen gegenüber früheren Fahrzeugentwicklungen zu einem deutlich höheren Abstimmungsaufwand zwischen den einzelnen Fachbereichen der Entwicklungsabteilungen (Karosserie, Antrieb, Fahrwerk, etc.).

Der ständig wachsende Teile- und Funktionsumfang ist jedoch nicht die einzige Problematik, die durch den Entwicklungsprozeß abgedeckt werden muß. Veränderte Gesetzesauflagen und ein verstärktes Sicherheits- und Umweltbewußtsein haben zudem zu erhöhten Anforderungen an die Funktionssicherheit, Umweltverträglichkeit und Dauerhaftigkeit geführt. [1.1]

Um den Markt als Full-Line-Anbieter abzudecken, versuchen viele Hersteller zudem, jede Marktnische mit einem eigenständigen Produkt zu belegen. Die Gesamtzahl der Fahrzeuge und Fahrzeugvarianten hat sich dadurch im Laufe der letzten Jahre vervielfacht.

Erschwerend kommt außerdem hinzu, daß sich aus den erweiterten Anforderungen des Marktes nach neuen Produkten verkürzte Produktzyklen ergeben. Vor diesem Hintergrund müssen die zeitlichen Randbedingungen der bisherigen Entwicklungsabläufe neu definiert werden. Die Entwicklungszeiten für künftige Fahrzeuge müssen daher durch eine deutliche Produktivitätssteigerung der Abläufe verkürzt werden. [1.5]

1.1.1 Problemstellung

Die neuen Rahmenbedingungen in der Automobilindustrie erfordern einen Wandel der Entwicklungsabläufe um eine führende Position am Markt einnehmen bzw. behalten zu können. Insbesondere im Umfeld der Karosserieentwicklung bedeutet dies, daß die Serienentwicklung durch leistungsfähige CAE-Prozesse begleitet und unterstützt werden muß.

Dadurch sollen alle Funktionen und Anforderungen an die Karosseriestruktur, bereits vor dem Aufbau von Prototypen, umfassend abgesichert werden. Der Hardwareversuch dient in diesem neuen Entwicklungsprozeß einzig der abschließenden funktionalen Freigabe.

Dieses Ziel wurde bereits für einige Funktionsanforderungen (Crash, NVH, Steifigkeit) realisiert. Die Inhalte der Festigkeits- und Betriebsfestigkeitsauslegung wurden jedoch bislang noch immer durch Versuche abgesichert. Die späte Verfügbarkeit von seriennaher Hardware und die langen Erprobungszeiten lassen dabei nur wenige Optimierungsschleifen zu. Dies führt dazu, daß Betriebsfestigkeitsprobleme erst relativ spät im Entwicklungsprozeß festgestellt werden und dann nur mit großem Aufwand behoben werden können.

Die wesentliche Ursache hierfür ist, daß die Methoden für die virtuelle Betriebsfestigkeitssimulation erst im Laufe der letzten Jahre eine ausreichende Güte erreicht haben und noch nicht an die Anforderungen der Karosserieentwicklung angepaßt wurden. Ein weiteres Hindernis für den produktiven Einsatz solcher CAE-Methoden war bisher außerdem das Fehlen eines durchgängigen Auslegungsprozesses für Betriebslasten.

Für den Einsatz der rechnerischen Festigkeits- und Betriebsfestigkeitsauslegung bei der Entwicklung der Karosserie ist es zunächst entscheidend, die typischen Schäden, die durch Betriebsbeanspruchungen auftreten, zu identifizieren.

Eine Untersuchung von Schäden, die bei unterschiedlichen Erprobungsfahrten auftraten, zeigt zwei typische Schadensbilder, die auf unterschiedliche Betriebsbeanspruchungen zurückzuführen sind.

Zum einen treten in der Karosserie Schäden im Bereich von Kräfteinleitungsstellen durch statische Einzelergebnisse auf. Diese Schäden sind im wesentlichen plastische (bleibende) Verformungen von Blechbauteilen.

Das zweite Schadensbild, das auftritt, sind Risse durch zyklische Lastergebnisse. Hier zeigte sich, daß die Mehrzahl der Schäden im Umfeld von Bauteilverbindungen (Schweißpunkten) auftritt. Dies läßt sich darauf zurückführen, daß die ungestörte Blechstruktur, im Gegensatz zu Schweißpunkten, nur wenige Kerben aufweist.

Ein CAE-Auslegungsprozeß zur Absicherung von Betriebsbeanspruchungen der Karosseriestruktur muß daher speziell das elasto-plastische Verhalten von Bauteilen und die Ermüdungsfestigkeit von Bauteilverbindungen abdecken.

1.1.2 Ziel der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist es, einen virtuellen Auslegungsprozeß zu entwickeln, um die Karosseriestruktur für Betriebsbeanspruchungen (Betriebslasten) abzusichern. Durch diesen Prozeß müssen alle für die Karosserie relevanten

Belastungen des Betriebs durch entsprechende Simulationsverfahren abgedeckt werden. Dabei müssen zum einen statische Einzelereignisse und zum anderen zyklische Betriebsfestigkeitslasten abgedeckt werden.

Dieser Auslegungsprozeß umfaßt die Erstellung des Rechenmodells, die Simulation und die abschließende Auswertung der Berechnung. Die Modellerstellung wird von zwei Anforderungen dominiert. Das Berechnungsmodell muß zum einen mit möglichst geringem Aufwand erstellt werden und darf nicht zu viele Freiheitsgrade enthalten, um die Simulationszeit so kurz wie möglich zu halten. Zum anderen muß die benötigte Aussagegüte in den betrachteten Strukturbereichen erreicht werden. Dies bedeutet, daß die Diskretisierung der kritischen Strukturbereiche hinreichend genau sein muß, um die geforderte Ergebnisgüte bereitzustellen.

Aus diesem Grund muß im Rahmen dieser Arbeit ein neues Schweißpunktersatzmodell für die Betriebsfestigkeitssimulation der Karosserie entwickelt werden, das zuverlässige Aussagen über die zyklische Festigkeit ermöglicht. Dabei soll auch für statische Beanspruchungen eine verbesserte Abbildung der Kraftüberleitung in einem Schweißpunkt erreicht werden, um zuverlässigere Aussagen bei der nichtlinearen Berechnung zu erreichen.

Für die Inhalte der Betriebslastauslegung sind unterschiedliche Simulationsmethoden und -anwendungen erforderlich. Ziel ist es, mit Hilfe eines einzigen Berechnungsmodells alle Inhalte der Betriebslastauslegung abzudecken um dadurch den Modellerstellungsaufwand zu minimieren. In diesem Modell müssen deshalb alle Anforderungen der statischen Festigkeitsauslegung

und der Betriebsfestigkeitsanalyse vereint werden.

Um die Verfahren der Betriebslastauslegung in Fahrzeugprojekten zum Einsatz zu bringen, ist es zudem entscheidend, daß die Berechnungsabläufe mit den benachbarten Auslegungsdisziplinen (Crash, NVH, Steifigkeit) vernetzt werden.

Durch die Einbindung in die bestehende CAE-Landschaft soll eine Effizienzsteigerung in den CAE-Abläufen erreicht werden, indem Synergien bei der Modellerstellung genutzt werden. Dies bedeutet, daß das Modell der Gesamtstruktur von der bereits etablierten Steifigkeitsauslegung in Teilen übernommen werden soll.

Für die statische Simulation von Krafteinleitungsbereichen müssen nichtlineare Berechnungsverfahren eingesetzt werden. Diese Verfahren sind sehr rechenintensiv und können daher nur an kleineren Teilstrukturen durchgeführt werden. Im Rahmen dieser Arbeit muß daher ein Verfahren entwickelt werden, um kleine Komponentenmodelle unter Berücksichtigung der Randbedingungen des Gesamtfahrzeugs zu bewerten.

Desweiteren soll durch die Berücksichtigung des Fertigungsprozesses (Tiefziehen) der Blechbauteile bei der Betriebslastauslegung eine verbesserte Aussagegüte erreicht werden. Durch die Übertragung der Einflußgrößen des Umformprozesses in die Modelle der statischen Festigkeitsauslegung kann so die Ausnützung der Bauteile verbessert werden.

1.2 Reengineering im Fahrzeugentwicklungsprozeß

Die bestehenden Auslegungsabläufe der Karosseriestruktur müssen unter den veränderten Rahmenbedingungen in der Automobilindustrie neu definiert werden. Dabei ist zu beachten, daß die Auslegung für die funktionalen Anforderungen der Karosserie nicht direkt, sondern nur im Rahmen eines durchgängigen, abgestimmten Prozesses möglich ist. Aus diesem Grund wird hierfür im Rahmen dieser Arbeit der Begriff Auslegungsprozeß verwendet.

Die veränderten Rahmenbedingungen setzen einen Wandel des Auslegungsprozesses voraus. Dieser auch als „Reengineering“ bezeichnete Prozeß ist der bisher umfassendste Veränderungsprozeß in der Geschichte der Automobilindustrie. [1.3] Die damit verbundenen Umstrukturierungen in den Entwicklungsbereichen haben entscheidende Auswirkungen auf zukünftige Produkte und damit auch auf den Erfolg im Markt.

Verbunden mit dem durchgängigen Einsatz von CAE-Methoden kann durch das Reengineering ein erheblicher Produktivitätsschub bei der Entwicklung erreicht werden. Zudem soll durch detailliertere Betrachtung aller Funktionsanforderungen die Qualität des Produkts verbessert werden.

Der Vernetzung der unterschiedlichen Auslegungsdisziplinen (Crash, NVH (noise, vibration, harshness), Festigkeit, Betriebsfestigkeit) kommt hierbei eine entscheidende Bedeutung zu. Um den durch die erhöhte Komplexität der Produkte gestiegenen Abstimmungsaufwand effizienter durchführen zu können, muss die Kommunikation zwischen den einzelnen Funktionen verbessert werden. Erst durch die konse-

quente interdisziplinär abgestimmte Auslegung können die Ziele des Reengineering erreicht werden.

Dabei sind entsprechende zeitliche Randbedingungen für die neuen virtuellen Entwicklungsabläufe vorzugeben. Im Reengineering werden deshalb feste Zeithorizonte für die Entwicklung neuer Fahrzeuge definiert, die an mehreren „Etappenzielen“ abgeprüft werden. Diese Meilensteine (Synchro-Punkte) dienen über alle Funktionen hinweg als verbindliche Kontrollpunkte für die Reife des Fahrzeugs zu einem definierten Zeitpunkt im Entwicklungsprozeß.

Die gesamte Entwicklungszeit bei neuen Fahrzeugprojekten soll dabei gegenüber den bisherigen Zeiten von über 50 Monaten deutlich verkürzt werden. Dieses Ziel wird für die Auslegungsdisziplinen der Crash- und NVH-Auslegung bereits weitgehend erreicht. [1.6] Für die Umfänge der Betriebslastauslegung lassen sich diese Rahmenbedingungen noch nicht erfüllen.

Durch die vollständige virtuelle Abbildung des Fahrzeugs lassen sich fast alle Auslegungsinhalte frühzeitig abprüfen, ohne daß Hardware-Prototypen vorhanden sein müssen. Mit diesem „Digital-car“ ist es zudem jedem Prozeßbeteiligten möglich, den jeweils aktuellen Konstruktionsstand aller Komponenten abzufragen. Dadurch kann die Berechnungsabteilung CAD-Daten (computer aided design) für die Erstellung von Berechnungsmodellen jederzeit abrufen. Das Digital-car ist damit ein wichtiger Schritt in Richtung des virtuellen Auslegungsprozesses.

Ein weiteres Ziel, das durch die Umgestaltung der Entwicklungsbereiche erreicht werden soll, ist die Reduzierung der Aufwände für die Hardwareerprobung. Die Anzahl der Versuche soll

durch den durchgängigen Einsatz von CAE-Werkzeugen auf einen einzigen abschließenden Bestätigungsversuch reduziert werden.

Der Bestätigungsversuch wird für jedes Funktionsziel gegen Ende der Fahrzeugentwicklung durchgeführt. Er dient damit nicht mehr wie bisher auch der Weiterentwicklung, sondern einzig der funktionalen Freigabe des fertigen Endprodukts.

Konstruktionsvarianten und -zwischenstände werden nicht mehr doppelt, d.h. sowohl durch den Versuch als auch durch die Berechnung, abgesichert, sondern allein mit Hilfe der Simulation zur Serienreife weiterentwickelt. Allein durch die Vermeidung dieser Doppelarbeit ergeben sich erhebliche Einsparpotentiale zur Verbesserung der Produktivität und zur Reduzierung der Aufwände.

Die Vorgabe, CAE-Werkzeuge durchgängig während des gesamten Prozesses einzusetzen, ist der einzige Lösungsansatz für die weiteren Zielvorgaben von Entwicklungszeit und Produktivitätssteigerung. Daher ist die Etablierung der CAD- und CAE-Prozesse ein vorrangiges Ziel der Reengineering-Aktivitäten.

Zur Umsetzung dieser veränderten Anforderungen müssen die Simulationsmethoden verbessert und neue Ansätze bei der virtuellen Funktionsbestätigung gefunden werden. Außerdem muß die gesamte Prozeßkette von der Konstruktionsdatenbereitstellung bis zum Berechnungsergebnis optimiert und die Abläufe aufeinander abgestimmt werden.

Durch den verstärkten Einsatz von CAE-Methoden können in Fahrzeugprojekten folgende Vorteile realisiert werden:

- Verkürzung des Produktentwicklungsprozesses
- Reduzierung des Abstimmungsaufwands zwischen den unterschiedlichen Auslegungsdisziplinen
- Verbesserung der Produktreife während aller Auslegungsphasen
- Erreichen des konstruktiven Optimums unter Berücksichtigung aller funktionalen Randbedingungen
- Reduktion der Versuchsträger und Hardwareerprobungen.

Die Berechnungsabteilungen erhalten durch die neuen Anforderungen des Reengineerings ein erheblich größeres Aufgabenfeld, einen größeren Verantwortungsbereich und erhöhte Qualitätsanforderungen gegenüber ihrer bisherigen Rolle im Entwicklungsprozeß.

Der Mehraufwand, der durch den gewachsenen Aufgabenbereich entsteht, sollte aber nur teilweise durch den Aufbau zusätzlicher personeller Kapazität abgefangen werden. Wesentlich wichtiger wird es sein, die bestehenden Prozesse im Hinblick auf Effizienzsteigerung zu durchleuchten und durch verbesserte Abläufe den Gesamtaufwand zu reduzieren.

1.3 Auswirkungen des Reengineerings auf den Entwicklungsprozeß der Karosseriestruktur

Die Rohkarosserie ist als tragende Plattform des Fahrzeugs eine der wichtigsten Komponenten neuer Fahrzeuge. Die Form, Funktionalität und Dauerhaftigkeit der Karosserie entscheidet maßgeblich über den späteren Markterfolg des Fahr-

zeugs. Sie ist zudem die wichtigste Komponente, um sich sichtbar im Markt von anderen Herstellern abzuheben.

Bei vielen neuen Fahrzeugen ist die Karosserie gleichzeitig der einzige Bestandteil, der vollständig neu entwickelt wird. Viele Ausstattungskomponenten, Teile vom Antriebsstrang und Fahrwerk werden häufig von anderen Fahrzeugen übernommen.

Um eine „Kannibalisierung“ der eigenen Produkte zu vermeiden, muss die Differenzierung eines neuen Fahrzeugs über die Karosserie zudem eindeutig sein.

Der Zielkatalog für die Karosserie enthält eine große Zahl von Anforderungen an Funktion und Dauerhaftigkeit, die während der Fahrzeugentwicklung abgesichert werden müssen. Für die virtuelle Absicherung der Crash- und NVH-Anforderungen gibt es bereits seit einigen Jahren etablierte CAE-Auslegungsmethoden und -prozesse. Diese virtuellen Auslegungsdisziplinen sind seit geraumer Zeit fester Bestandteil des Produktentstehungsprozesses.

Die Anforderungen aus dem Umfeld der Betriebslasten wurden bisher jedoch im wesentlichen nur durch Versuche abgedeckt, da es noch keinen abgesicherten und mit den Nachbarfunktionen abgestimmten virtuellen Auslegungsprozeß für die Betriebsbeanspruchungen gab.

Dies führte dazu, daß Probleme oder konstruktive Schwächen bei statischen Lasten oder während der Dauerlaferprobung bisher erst sehr spät im Entwicklungsprozeß festgestellt werden konnten. Durch die späte Identifikation von Schwachstellen entstanden häufig hohe Änderungsaufwände, um Betriebsfestigkeitsprobleme im Nachhinein zu lösen.

Oft sind zudem die Lösungsmöglichkeiten zu diesem späten Zeitpunkt im Entwicklungsprozeß stark eingeschränkt, da die Geometrien der meisten Teile bereits eingefroren sind. Diese Lösungsmöglichkeiten stellen daher häufig nur kompromißbehaftete Reparaturen dar, die mit einem großen Kosten-, Material- und Gewichtseinsatz verbunden sind.

Dieses Problem läßt sich bei vielen Karosserien beobachten. Betrachtet man Strukturbereiche, die durch Betriebsbeanspruchungen hoch belastet sind, findet man häufig Blechaufdoppelungen oder andere Nachbesserungen, die zur Behebung von Festigkeitsproblemen dienen. Dieser zusätzliche Aufwand an Teilen und Schweißnähten führt zu hohen zusätzlichen Kosten in der Fertigung.

Bei einer kontinuierlichen prozeßbegleitenden virtuellen Absicherung der Funktion Betriebsfestigkeit könnten diese Schwachstellen zu einem wesentlich früheren Zeitpunkt aufgezeigt und durch konzeptionelle Umgestaltungen sehr viel wirksamer und einfacher behoben werden.

Die erheblich reduzierten Gewichtsziele der Rohkarosserie bei gleichzeitig verbesserter Funktion stellen für die Karosserieentwicklung, neben den bereits genannten anderen Punkten, derzeit die größte Problematik dar. Durch die Minimierung der Blechdicken und eine dramatische Reduzierung der Anzahl an Schweißpunkten treten häufiger Schäden infolge von Betriebsbeanspruchungen auf. Dies rührt im wesentlichen daher, daß die konstruktiven Reserven moderner Karosseriestrukturen maximal ausgeschöpft sind und damit der Grenzbereich viel früher erreicht wird.

Vor dem Hintergrund neuer Gesetzesanforderungen an Emission und Flottenverbrauch ist das Erreichen des Gewichtsoptimums jedoch nach wie vor eines der Kernziele und entscheidend für den Erfolg am Markt. Es werden daher CAE-Methoden benötigt, mit denen eine Struktur im Hinblick auf Gewicht und Funktion optimiert werden kann.

Eine über das gesamte Funktionspektrum optimierte Konstruktion läßt sich allerdings nur iterativ in Abstimm- und Schleifen finden. Unter diesen Rahmenbedingungen werden die Grenzen der bisherigen versuchsbasierten Absicherung erreicht. Die langen Vorlaufzeiten für den Prototypenbau und die Versuchszeiten der Dauerläuferprobung würden nur wenige konstruktive Schleifen zulassen und den Handlungsspielraum der Konstruktionsabteilungen zu stark einschränken. Außerdem entsteht ein erheblicher Mehraufwand für die Konstrukteure, da sie laufend die Geometrie der Bauteile anpassen müßten, um Daten für den Musterbau der Versuchsträger zu erstellen.

Mit Hilfe virtueller Auslegungsmethoden kann eine höhere Anzahl an Varianten abgearbeitet werden und dadurch die funktionale Reife während aller Projektphasen deutlich verbessert werden. [1.2] Vor diesem Hintergrund wird deutlich, daß die CAE-Methoden weiterentwickelt werden müssen, um eine vollständige Absicherung der Karosserie für alle Funktionen im Rahmen der gesetzten Zeit- und Funktionsziele zu erreichen. Gerade auf dem Gebiet der Betriebslastauslegung fehlt hierfür noch ein durchgängiger, mit den Prozeßpartnern abgestimmter Auslegungsprozeß.

Unter Betriebslasten werden im Rahmen dieser Arbeit alle Auslegungslastfälle und Lastereignisse zusammen-

gefaßt, die während des Betriebs auftreten können; dabei werden in diesem Zusammenhang nur große Kräfte, die zu Festigkeits- bzw. Betriebsfestigkeitsschäden führen können, betrachtet. Nicht in das Auslegungsspektrum der Betriebslastauslegung fallen daher Betriebsereignisse, die keine Bedeutung für die Festigkeit haben, sondern einzig den Komfort beeinflussen. Kleine Kräfte werden bereits seit einigen Jahren durch die NVH-Auslegung (Komfort) abgedeckt. Die Betriebslastauslegung umfaßt sowohl statische Einzelereignisse, als auch Lastzyklen aus dem Betriebsfestigkeitsumfeld, die im wesentlichen über das Fahrwerk und den Antriebsstrang auf die Karosserie übertragen werden.

Die wachsende Bedeutung der virtuellen Betriebslastauslegung gegenüber den bereits etablierten statischen Auslegungsverfahren hat eine weitere praxisbezogene Ursache. Bisherige Auslegungskriterien der Steifigkeitsauslegung, wie zum Beispiel die statische Steifigkeit der Karosserie, werden mit Hilfe von Ersatzlasten abgeprüft, die keinen realen Bezug zu wirklichen Fahrzuständen und -beanspruchungen haben. Es wird dabei über Hilfsgrößen, die nur einen geringen quantitativen Bezug zur Wirklichkeit haben, auf das Strukturverhalten zurückgeschlossen. Es sind dabei nur qualitative Aussagen bezüglich der strukturellen Schwachstellen möglich.

Mit der statischen Auslegung können vielfach nicht alle Schwachstellen einer Struktur identifiziert werden. Bei der CAE-Betriebslastauslegung hingegen wird die Karosserie für real auftretende Beanspruchungen ausgelegt. Es besteht also ein direkter quantitativer Bezug zum Fahrversuch und dem Fahrzustand auf der Straße.

1.4 Simulationsbasierte Umsetzung des Reengineering

Um CAE-Methoden effizient einsetzen zu können, müssen neu entwickelte Auslegungsmethoden für den produktiven Einsatz aufbereitet werden und einem abgestimmten Auslegungsprozeß zufließen. Das bedeutet, daß die neuen Methoden in eine standardisierte Form gebracht werden, damit sie von allen Berechnungsverantwortlichen effizient eingesetzt werden können.

Ein wichtiger Bestandteil dieser Arbeit bestand daher darin, neben der Entwicklung neuer Simulationsmethoden auch die Integration und Vernetzung mit bestehenden CAE-Auslegungsabläufen vorzusehen und mit benachbarten Auslegungsdisziplinen abzustimmen.

Um definierte Schnittstellen zu anderen Prozeßpartnern sicherstellen zu können, mußte zunächst ein Auslegungsprozeß für die Betriebslastauslegung festgelegt und in den bestehenden Produktentwicklungsprozeß (PEP) der Karosserie und des Gesamtfahrzeugs eingebunden werden.

Dieser neue CAE-Auslegungsprozeß wurde unter dem Namen CAE-PEP-Betriebslastauslegung an die bestehende CAE-Landschaft im Crash- und NVH-Umfeld angepaßt. Die CAE-PEP-Betriebslastauslegung stellt den gesamten virtuellen Auslegungsprozeß für Betriebslasten dar.

Alle simulationstechnischen Komponenten dieses Prozesses wurden in einer Art Werkzeugkasten, dem CAE-Bench (Betriebslastauslegung), zusammengefaßt. Das CAE-Bench ermöglicht es dem Berechnungsingenieur, alle für die Auslegung notwendigen Abläufe effizient zu steuern und zu dokumentieren.

Zusätzlich wird das gesamte Wissen zum Thema Betriebslastauslegung durch ein Informationssystem (Best Practice Advisor) im CAE-Bench gesammelt und dem Berechnungsingenieur zugänglich gemacht. Diese Datenbank dient als Wissensspeicher, der das Wissen einzelner Experten effektiv streut.

Eine weitere Anforderung bei der Entwicklung des CAE-Bench ist die betriebssystemunabhängige Einsetzbarkeit. Hierfür eignet sich idealerweise ein webbasiertes System, welches in HTML (hyper text markup language) aufgebaut ist. Alle Interaktionen mit dem CAE-Bench erfolgen daher über einen Internet-Browser.

Bei der Entwicklung aller Systemkomponenten für CAE-Bench-Betriebslastauslegung muß daher die Möglichkeit der Batch-Steuerung (automatische Stapelverarbeitung) vorgesehen werden, da keine direkte Kommunikation mit einzelnen Applikationen über ein HTML-Interface erfolgen sollte. Die Belastung der Netzwerke kann dadurch minimiert werden.

In Fällen, in denen eine Automatisierung möglich ist, wurden daher Makros bzw. Skripte zur automatisierten Steuerung von Abläufen für die entsprechenden Programme geschaffen. Alle wesentlichen Komponenten des CAE-Bench lassen sich damit durch eine interaktiv erzeugte Batch-Steuerdatei auf einem zentralen Server abarbeiten.

Dadurch entfällt die Notwendigkeit, kostspielige Workstation-Arbeitsplätze zu installieren, wie sie derzeit für jeden Berechnungsingenieur vorgesehen werden müssen. Für die interaktive Arbeit mit dem CAE-Bench genügt damit in Zukunft bereits ein normaler PC.

Im CAE-Bench wurden außerdem Schnittstellen zu anderen CAE-Prozes-

sen und Datenbanken vorgesehen. Einige dieser Datenbanken befinden sich jedoch erst im Prototypenstadium und enthalten derzeit nur geringe Datenbestände.

Eine wichtige zukünftige Aufgabe wird es daher sein, die Datenbanken zu befüllen, um die erforderlichen Eingangsgrößen für die Simulationen bereitzustellen. Hier sind im wesentlichen Material- und Lastdatenbanken von Bedeutung. Durch die dokumentierte zentrale Ablage und statistische Bewertung von Daten durch die jeweils verantwortliche Fachabteilung wird ein Höchstmaß an Aktualität bei den Datenbeständen erreicht und der Kommunikationsaufwand zwischen den Prozeßpartnern minimiert.

1.5 Anforderungen an simulationsbasierte Auslegungsabläufe

Durch den durchgängigen Einsatz von CAE-Methoden im Reengineering-Prozeß sollen die Konstruktionsabteilungen stärker unterstützt werden. Diese Vorgabe setzt jedoch einen Wandel der Auslegungsmethodik voraus.

Während CAE-Werkzeuge bisher nur punktuell von einigen wenigen Experten angewendet werden, muß die Simulation im Reengineering-Prozeß flächendeckend und parallel zu allen Auslegungsphasen in den Fahrzeugprojekten eingesetzt werden. Dazu muß die Akzeptanz und das Vertrauen in die Simulation verbessert werden.

Mit den neuen Simulationsmethoden muß der Berechnungsingenieur in der Lage sein, alle Fragestellungen, die

bisher durch den Versuch abgedeckt werden, zuverlässig abzusichern. Hierfür ist eine Erweiterung und Verbesserung der bestehenden Methoden und Eingangsgrößen der Berechnung nötig. Es kann jedoch nicht von jedem Berechnungsingenieur erwartet werden, daß ihm alle technischen Inhalte und Randbedingungen für alle Auslegungsinhalte bekannt sind. Vielmehr wird es in Zukunft einige Experten geben, die für einzelne Auslegungsinhalte zuständig sind und die dazu erforderlichen Auslegungsmethoden in ihrem Bereich vertieft weiterentwickeln.

Neu entwickelte Berechnungsmethoden müssen dann in einen abgestimmten und dokumentierten Prozeß einfließen, um sie allen Prozeßbeteiligten zugänglich zu machen. Daher wird der hier vorgestellte Prozeß offen gestaltet, um für zukünftige methodische Erweiterungen vorbereitet zu sein.

Durch den stärkeren Einsatz von CAE-Werkzeugen und die Verbesserung der Simulationsprozesse können im Fahrzeugprojekt eine Reihe von Vorteilen und Verbesserungen gegenüber den bestehenden Abläufen erzielt werden. Diese werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

1.5.1 Effizienzsteigerung

Der zeitliche Abstand zwischen der CAD-Datenbereitstellung und dem Simulationsergebnis ist derzeit sehr lang. Ursache hierfür ist, daß die Erstellung von Simulationsmodellen derzeit noch sehr zeitaufwendig ist. Die Dauer der Berechnung selbst ist dagegen nur gering.

Gerade bei der Modellerstellung lassen sich Vorteile von CAE-getriebe-

nen Auslegungsabläufen gegenüber der bisherigen Hardware-Erprobung realisieren. Der Zeitaufwand, der für den Aufbau eines vollständigen Hardwareprototypen benötigt wird, ist derzeit bis zu fünfmal größer als der für den Aufbau eines Simulationsmodells, das den Anforderungen dieser Arbeit entspricht. Dennoch bestehen weitere Potentiale bei der CAE-Auslegung, um die Gesamtzeit für eine Berechnungsschleife zu minimieren. Diese Potentiale liegen im wesentlichen bei der Modellerstellung.

Um den hier beschriebenen simulationsbasierten Entwicklungsprozeß für die Karosserie zu realisieren, muß außerdem eine effiziente IT-Infrastruktur aufgebaut werden. Durch eine konsistente und dokumentierte Datenverwaltung ist es allen Projektbeteiligten möglich, Zugang zu Simulationsdaten und -methoden zu erhalten. Die verbesserte Informationsverwaltung und -bereitstellung kann den Abstimmungsaufwand zwischen Konstruktion und Berechnung reduzieren und damit eine weitere Effizienzsteigerung ermöglichen.

Dadurch, daß das Wissen einzelner Experten besser in den Auslegungsprozeß einfließt und so dem gesamten Team zugänglich ist, wird die Lernphase bei neuen Auslegungsinhalten und Methoden verkürzt.

Durch den Aufbau dieser CAE-Wissensbasis kann außerdem das Wissen der Berechnungsabteilungen gebündelt und allen im Konzern laufenden Fahrzeugprojekten zugänglich gemacht werden. Doppelarbeit bei der Methodenentwicklung kann auf diese Weise wirksam vermieden werden.

1.5.2 Verbesserung der Aussagegüte und Zuverlässigkeit

Bei der Vielzahl der Simulationsmethoden, die heute zum Einsatz kommen, werden derzeit sehr unterschiedliche Verfahren zum Aufbau der Modelle sowie zur Durchführung der Berechnungen und ihrer Auswertungen eingesetzt. Diese Vielfalt führt dazu, daß die Berechnungsergebnisse häufig nur schwer vergleichbar sind.

Die Qualität der Simulationsausagen hängt damit entscheidend vom Wissen des verantwortlichen Ingenieurs ab [1.4]. Dieser Prozeß ist daher nicht sehr robust.

Ein Großteil der Berechnungsumfänge wird außerdem bei externen Lieferanten durchgeführt. Die Definition von CAE-Abläufen trägt zusätzlich zur Anbindung von Ingenieurbüros und Zulieferern bei, die derzeit schon erhebliche Entwicklungsumfänge übernehmen.

Durch die Vorgabe von standardisierten Prozessen wird es darüber hinaus möglich, Standards auch bei externen Partnern sicherzustellen und abzu prüfen. Ein dokumentierter CAE-Auslegungsprozeß wäre schon allein vor diesem Hintergrund unerlässlich.

1.6 Einbindung in den Entwicklungsprozeß der Karosseriestruktur

Im Rahmen der CAE-Auslegung stehen mehrere Analyseverfahren zur Verfügung, die bei wachsendem Aufwand eine verbesserte Aussagegüte ermöglichen. Der Berechnungsingenieur muß daher an die geforderte Ergebnis-

güte angepaßt seine Simulationsmodelle und –methoden auswählen.

Er ist hier im wesentlichen von der Qualität der CAD-Daten abhängig, da diese die Basis für den Aufbau seiner Berechnungsmodelle ist. Die Datenqualität und Detaillierung der CAD-Geometriedaten nimmt während des Entwicklungsprozesses zu. Aus diesem Grund muß der Methodeneinsatz über die Laufzeit des Fahrzeugprojektes gestaffelt erfolgen.

Die Abstimmung der verwendeten CAE-Tools und der damit verbundenen Auslegungstiefe an die verschiedenen Phasen des PEP und der dazugehörigen konstruktiven Reife des Produkts ist entscheidend für einen effizienten und reibungslosen Auslegungsprozeß. Gestaffelt über den Auslegungsprozeß fließen so dem Projekt während jedes Entwicklungsstadiums in ihrer Aussagequalität verbesserte Ergebnisse zu.

Nicht nur die CAD-Daten stellen für den virtuellen Auslegungsprozeß der Karosseriestruktur wichtige Eingangsgrößen dar. Für die CAE-Auslegung ist auch die prozeßsichere (im Sinne der Randbedingungen des PEP) und terminergerechte Versorgung mit Lastdaten eine Grundvoraussetzung.

Dies betrifft insbesondere Lastdaten, welche nicht in Normen oder Zulassungsrichtlinien festgelegt sind, wie es zum Beispiel bei Radlasten aus der Betriebsfestigkeit der Fall ist. Hier kann erst durch eine entsprechende Messung oder eine MKS-Simulation (Mehrkörper-Simulation) die genaue Auslegungslast ermittelt werden.

Eine Messung oder Simulation kann jedoch nur so gut sein, wie die Güte der Eingangsgrößen. Diese Größen sind zu Beginn des Auslegungsprozesses noch relativ ungenau. Die Qualität der

Auslegungsgrößen (Lastdaten) entwickelt sich damit gestaffelt während des Auslegungsprozesses. Die bei der CAE-Betriebslastauslegung eingesetzten Methoden orientieren sich daher stark an der Güte dieser Eingangsgrößen.

Die Auslegungsphasen der Betriebslastauslegung orientieren sich an den Synchronisationspunkten des übergeordneten 30-Monats-Entwicklungsprozesses (Reengineering-Prozeß). Die CAE-Betriebslastauslegung wird durch Synchronisationspunkte analog zum übergeordneten PEP in vier Phasen gegliedert:

- Konzeptbewertung
- Konzeptauslegung
- Funktionsauslegung
- Anlaufbegleitung.

Die Entwicklungsphasen des Prozesses der CAE-PEP-Betriebslastauslegung laufen zeitlich leicht versetzt gegenüber dem übergeordneten Hauptterminplan des Fahrzeugprojektes ab, der die zeitlichen Rahmenbedingungen für alle Auslegungsdisziplinen enthält. Dadurch wird sichergestellt, daß die Ergebnisse der CAE-Auslegung noch in den jeweiligen Konstruktionsstand eingearbeitet werden können.

1.7 Auslegungsphasen der CAE-Betriebslastauslegung

Neben den Auslegungsinhalten sind auch die verwendeten Simulationsmethoden über die Laufzeit eines Entwicklungsprojektes gestaffelt. Diese Staffelung ist in Abbildung 1.1 dargestellt.

Während der Konzeptbewertungsphase wird das Strukturkonzept der Karosserie für das neue Fahrzeug definiert. In dieser Zeit muß daher eine große Anzahl von Konzeptvarianten mit relativ geringem Simulationsaufwand bewertet werden. Dabei ist das absolute Ergebnis von untergeordneter Wichtigkeit, da häufig nur der relative Vergleich zwischen mehreren Varianten von Interesse ist. Zu dieser Zeit im Entwicklungsprozeß müssen alle großen konzeptionellen Schwächen aus der Struktur beseitigt und die Ausprägung der Lastpfade optimiert werden.

Die Produktivität beim Modellaufbau und der Simulation steht während dieser Auslegungsphase im Vordergrund. Außerdem müssen die verwendeten Berechnungsmethoden in der Konzeptbewertungsphase geeignet sein, mit geringem Aufwand ein Konzept für alle wesentlichen Auslegungslastfälle zu bewerten.

Für diese Untersuchungen genügen zumeist relativ einfache linearelastische FE-Berechnungen (Finite Elemente) am Gesamtfahrzeug. Es werden daher im wesentlichen Inertial Relief-FE-Berechnungen am Gesamtfahrzeug für statische Betriebslasten eingesetzt, um die Ausprägung von Lastpfaden in der Gesamtstruktur zu untersuchen. Begleitend werden gegen Ende der Konzeptbewertungsphase, wenn das grobe Strukturkonzept definiert ist, die Kräfteinleitungsbereiche mit nichtlinearen FE-Rechnungen untersucht.

Dann folgt mit der Konzeptauslegungsphase die Hauptauslegungsphase, in der das Strukturkonzept zur Reife gebracht wird.

Hier wird die während der Konzeptbewertung festgelegte Struktur zur Serienreife entwickelt. Die Detaillierung der

Berechnungsmodelle und Auslegungsmethoden nimmt in dieser Phase stark zu. Außerdem werden zu dieser Zeit auch erste Informationen zum Fertigungsprozeß benötigt, um Prozeßeinflüsse bei der funktionalen Auslegung kritischer Strukturbereiche berücksichtigen zu können.

Während der anschließenden Funktionsauslegung ist die Konstruktion der Karosserie bereits im wesentlichen ausgereift und abgeschlossen. Hier erfolgt parallel zur Hardwareabsicherung die vollständige virtuelle Absicherung und Freigabe aller Funktionen. Die Berechnungsmodelle haben in dieser Auslegungsphase die maximale Detaillierung. Mit dem Abschluß der Funktionsauslegung ist der eigentliche Auslegungsprozeß für Betriebslasten abgeschlossen.

Während der Anlaufbegleitung soll eine möglichst reibungslose Umsetzung der Konstruktion beim Serienanlauf realisiert werden. Letzte Probleme, die durch veränderte Werkzeuge, Fügefolgen und Schweißpunktlagen entstehen, werden bewertet und – falls erforderlich – Änderungen vorgeschlagen.

Neben der produktbezogenen Entwicklung gibt es außerdem einen Bereich produktunabhängiger Vorentwicklung (VE), in dem Schaufensterlösungen für zukünftige Fahrzeuge zur Reife entwickelt werden. Diese VE-Projekte sind nicht im PEP-Betriebslastauslegung ausgewiesen, da sie in der Regel nicht einem bestimmten Fahrzeugprojekt zugeordnet sind. Die VE ist jedoch ein wichtiger Zulieferprozeß für neue konstruktive Lösungen und Konzepte in der Vorleistungsphase bis 40 Monate vor Serieneinsatz und in der frühen Konzeptbewertungsphase.

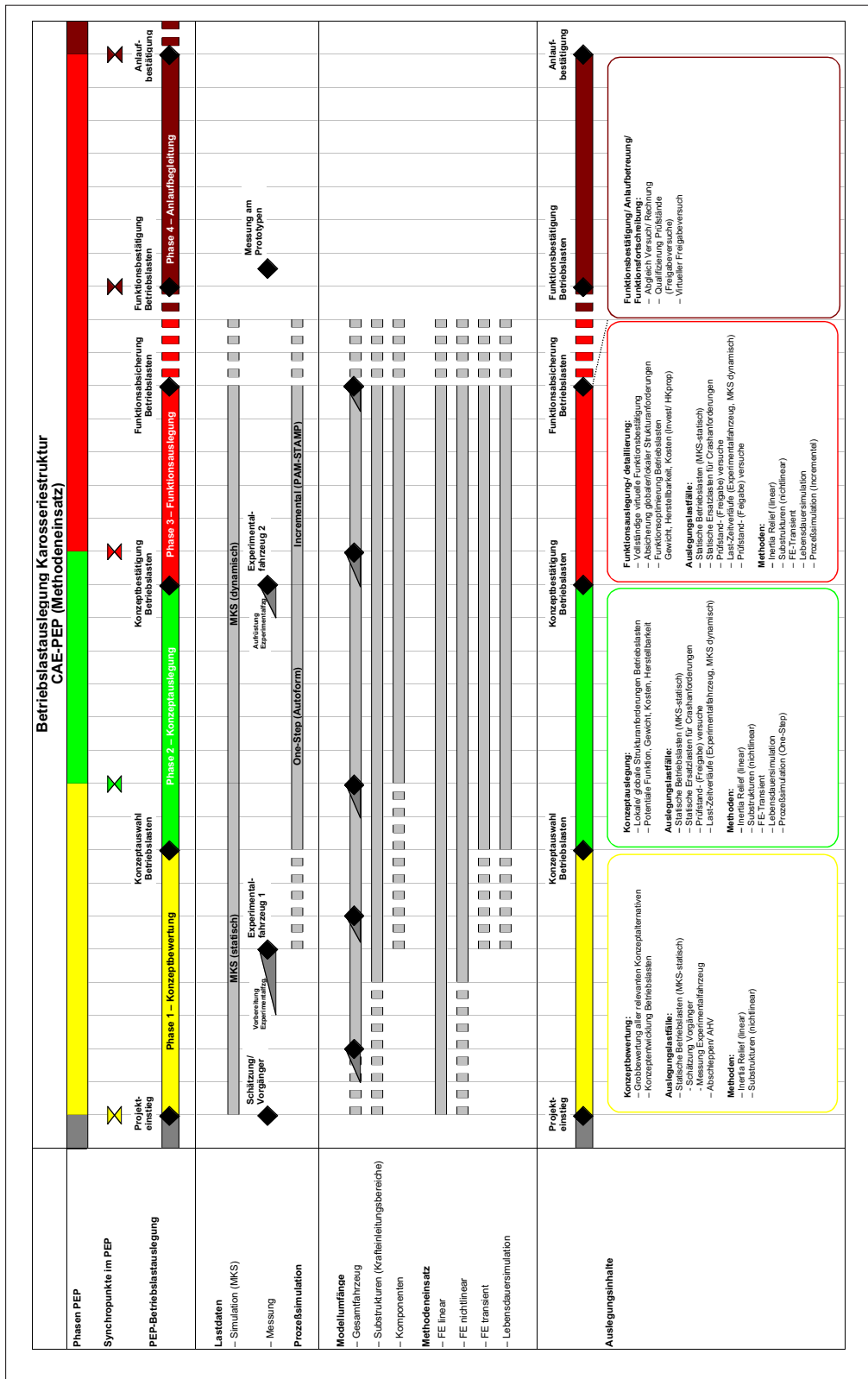


Abb. 11
CAE-Entwicklungsprozess Betriebslastauslegung

1.8 CAE-Bench Betriebslastauslegung

Der CAE-Auslegungsprozess kann nur dann die angestrebten Effizienzvorteile gegenüber den bisherigen Abläufen bringen, wenn die einzelnen Auslegungsschritte definiert sind und reibungslos ineinander greifen. Hierzu ist es notwendig, alle Vorgänge und Abläufe innerhalb des Prozesses zu definieren und mit den angrenzenden Entwicklungsbereichen abzustimmen.

Die Abstimmung der Schnittstellen zwischen zwei Prozessschritten ist dabei in der Regel das Haupthindernis zu einem durchgängigen CAE-Auslegungsprozess. Hier gehen häufig Informationen durch die Konvertierung unterschiedlicher Datenformate verloren. Diese fehlenden Informationen müssen dann in relativ aufwendiger manueller Arbeit wieder erzeugt werden.

Das CAE-Bench faßt alle Komponenten, die für die virtuelle Absicherung der Rohkarosserie erforderlich sind, in einem abgestimmten CA-Prozess zusammen. Alle zwischen den einzelnen Auslegungsschritten bestehenden Schnittstellen sind im CAE-Bench integriert und gewährleisten so ein effizientes Datenhandling.

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte CAE-Bench Betriebslastauslegung orientiert sich stark an der Struktur und den Bestandteilen der bereits etablierten Bench-Prozesse im NVH- und Crash-Umfeld. Durch die direkte Verwendung beziehungsweise nurgeringfügige Anpassung möglichst vieler bereits bestehender Komponenten aus dem NVH- und Crash-Bench ließ sich der Entwicklungsaufwand für die CAE-Bench Betriebslastauslegung erheblich reduzieren. Neue Komponenten wurden

daher modular aufgebaut und als Bausteine in den bestehenden Bench-Prozess eingefügt. Auf diese Weise können erhebliche Synergien realisiert und der Entwicklungsaufwand minimiert werden.

In den folgenden Abschnitten werden die Hauptbestandteile des CAE-Bench Betriebslastauslegung vorgestellt. Die Struktur des CAE-Bench ist dabei in drei Hauptkomponenten aufgeteilt (Abb. 1.2):

- Modellaufbau
- Simulation
- Auswertung.

Diese drei Hauptkomponenten des Prozesses sind über definierte Schnittstellen miteinander verbunden. Des Weiteren ist die Anbindung an die Nachbarprozesse (Konstruktion, Fertigungsplanung, Versuch und Datenbanken) in den drei Teilprozessen definiert. In diesen drei Prozessschritten werden außerdem eine Reihe von Daten- und Simulationsobjekten erzeugt, die durch das CAE-Bench verwaltet und archiviert werden. Der eindeutige Verweis auf die konstruktive Basis (CAD-Daten) ist hier eine weitere wichtige Anforderung.

Die CAE-Bench Betriebslastauslegung stellt eine Vision dar, die sich in seinem gesamten Umfang erst mittelfristig realisieren läßt. In dieser Arbeit wird daher der Prozess des CAE-Bench konkretisiert und das Rahmengerüst entwickelt. Ebenso werden alle wichtigen Systembestandteile definiert und entwickelt. Diese Tools werden dann in Form von Prototypen umgesetzt. Der hier vorgestellte Prozess wird in dieser Form bereits in Fahrzeugprojekten produktiv eingesetzt.

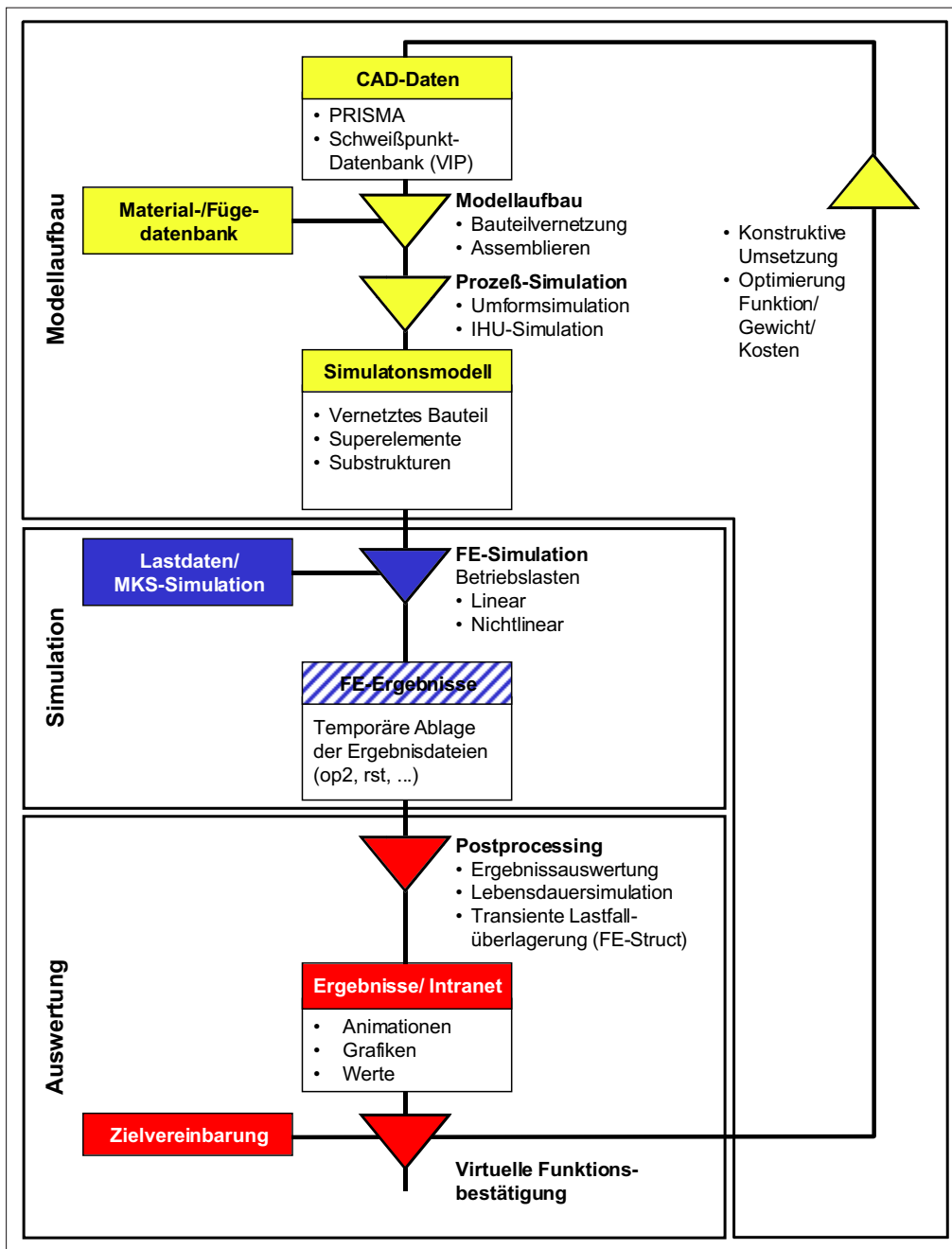


Abb. 1.2

Bestandteile des CAE-Bench Betriebslastauslegung

1.8.1 Modellaufbau

Der Aufbau von Simulationsmodellen nimmt derzeit anteilig am Gesamtaufwand für eine Berechnungsschleife die meiste Zeit im CAE-Ablauf in Anspruch. Damit ergeben sich gerade hier die größten Effizienzpotentiale für das CAE-Bench.

Grund hierfür ist, daß die Vernetzung der Bauteile in vielen Bereichen noch mit großem manuellem Aufwand erfolgen muß. Auch beim Zusammenbau des Gesamtfahrzeugs (Assemblieren) ist ein hoher manueller Aufwand erforderlich. Die einzelnen Bauteile müssen in ein Rechenmodell zusammenkopiert werden. Verbindungen (Schweißpunkte, SG-Nähte (Schutzgas) und Klebung)

müssen erzeugt werden. Das Massenmodell für alle Anbauteile und der Antriebsstrang müssen an die Karosserie angebunden werden. Außerdem muß die Drive-Line (Fahrwerk) mit der Karosserie verbunden werden.

Durch die Vielzahl der zu verwaltenden Bauteile und Schweißpunkte ist die Wahrscheinlichkeit von Modellierungsfehlern sehr groß. Der Prozeß der Modellerstellung muß deshalb vereinfacht und möglichst stark automatisiert werden.

Gerade in diesem Bereich sind wesentliche Funktionen bereits in den Bench-Prozessen im NVH- und Crash-Umfeld definiert und werden produktiv eingesetzt. Daher müssen für die Betriebslastauslegung die erweiterten Anforderungen an die Berechnungsmodelle festgelegt werden und in Form eines Modellierungskatalogs standardisiert werden. Änderungen gegenüber den bestehenden Bench-Abläufen können dann in Form von Zusatzmodulen definiert und programmiert werden.

Der Prozeß der CAE-Modellerstellung für die Betriebslastauslegung mit seinen einzelnen Komponenten und den gegenüber den bestehenden Prozessen erweiterten Anforderungen wird im Kapitel 2 dargestellt.

1.8.2 Analyse- und Auswerteverfahren

Um die Karosserie für die gesamte Beanspruchungsmatrix der Betriebslastauslegung absichern zu können, sind eine Vielzahl von Funktionen simulationstechnisch abzu prüfen. Die hierfür erforderlichen Berechnungsmethoden haben vielfach noch nicht die erforderliche Absicherungsgüte erreicht.

Ein wichtiger Faktor, der die Simulationsergebnisse beeinflusst, beinhaltet die Eingangsparameter für die Simulationen. Um unterschiedliche Varianten miteinander vergleichen zu können, ist es wichtig, daß die Randbedingungen der verschiedenen Simulationen vergleichbar sind.

Die Verbesserung der Effizienz bei der Simulation ist eine weitere wichtige Forderung an den neuen Auslegungsprozeß. Die Anzahl der Freiheitsgrade von Simulationsmodellen erreicht mittlerweile Größen, die selbst bei Verwendung moderner Großrechner nur mit hohem Zeitaufwand lösbar sind. Vielfach ist jedoch nicht das gesamte System von Interesse, sondern nur relativ kleine kritische Strukturbereiche. In dieser Arbeit wurde daher eine Vorgehensweise entwickelt, die es ermöglicht, kleinere Komponenten unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen des Gesamtfahrzeugs zu bewerten. Der Simulationsaufwand konnte durch die reduzierte Modellgröße auf ein Minimum reduziert werden. Vor dem Hintergrund der exponentiell wachsenden Auslegungsumfänge ist diese Vorgehensweise eine Grundvoraussetzung für den großflächigen Einsatz der CAE-Betriebslastauslegung.

1.8.3 Auswertung

Unter dem Begriff Auswertung (Postprocessing) werden alle Vorgänge des CAE-Bench zusammengefaßt, die es ermöglichen, die Simulationsergebnisse effizient auszuwerten und diese anschließend dem Projekt in nützlicher Form zur Verfügung zu stellen. Gerade der zweite Punkt wurde bisher nur mit geringer Priorität bearbeitet. In aktuellen

Projekten fällt auf, daß Berechnungsergebnisse häufig in einer Form präsentiert werden, die nur vom Berechnungsingenieur selbst interpretierbar und damit nutzbar sind. Ziel muss es jedoch sein, daß jeder Projektbeteiligte eine Simulation auswerten und damit die Ergebnisse interpretieren kann.

Derzeit können die anfallenden Simulationsdaten und Ergebnisse nur mit speziellen Applikationen gelesen, ausgewertet und dargestellt werden. Sie sind damit bereits aus technischer Sicht nur einem beschränkten Personenkreis zugänglich. Zudem sind die vom Berechnungsingenieur aufbereiteten Simulationsergebnisse aufgrund von Zugriffsbeschränkungen und der speziellen Anwendungen für die Ergebnisdarstellung nicht allen Projektbeteiligten (Konstruktion, Prozeßplanung) zugänglich.

Der Verfasser ist sich durchaus bewußt, daß durch die Reduzierung der Zugriffsbeschränkungen auch Sicherheitsrisiken bzgl. des Datenschutzes entstehen können. Der Datenschutz wurde im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht weiter untersucht.

Die Berechnung kann aber nur dann eine treibende Rolle im Projekt übernehmen, wenn allen Projektpartnern die Berechnungsergebnisse zugänglich sind und sie diese interpretieren können. Der Zugriff auf Berechnungsergebnisse sollte plattform-unabhängig (Betriebssystem) möglich sein und wurde daher web-basiert aufgebaut.

Die Verfügbarkeit ist aber nicht die einzige Forderung an das Postprocessing. Damit die Berechnungsergebnisse von allen Projektpartnern interpretierbar sind, müssen die Ergebnisse in einheitlicher Form visualisiert und mit einem Zielsystem hinterlegt werden.

Da für den Umfang der Ergebnisauswertung und -darstellung bereits wesentliche Funktionalitäten im NVH- und Crash-Bench realisiert wurden, beschränkt sich der Zusatzumfang für die Betriebslastauslegung insoweit auf die Festlegung einer einheitlichen Ergebnisdokumentation.

Diese kann dann direkt in das bestehende Dokumentationssystem eingefügt werden. Auf die Form der Auswertungen und das damit verbundene Zielsystem wird bei der Beschreibung der Analyse- und Auswerteumfänge im Kapitel 3 eingegangen.

1.9 Berücksichtigung von Prozeßinformationen im virtuellen Auslegungsprozeß

Die verbesserte Aussagegüte ist eine wesentliche Anforderung an die CAE-Abläufe. Durch die Simulation soll es möglich sein, während aller Projektphasen sichere Aussagen über die momentane konstruktive Reife zu liefern. Die versuchstechnische Absicherung soll dabei auf einen einzigen Bestätigungsversuch reduziert werden.

Um die derzeitigen Hardwareschleifen einzusparen, muss die Aussagekraft der Berechnung soweit verbessert werden, daß quantitative Aussagen zu allen Funktionen möglich sind. Dieses Ziel kann jedoch nur erreicht werden, wenn alle technischen Rahmenbedingungen, die das Produkt in seiner Funktion wesentlich beeinflussen können, bei der Auslegung berücksichtigt werden. Die in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen haben gezeigt, daß gerade während des Fertigungsprozes-

ses eine zum Teil erhebliche Veränderung im örtlichen Werkstoffverhalten entstehen kann.

Daher war eine wichtige Forderung an den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten CAE-Prozeß, daß sämtliche Veränderungen des Grundwerkstoffverhaltens, die während des Umformprozesses entstehen, bei der Simulation der Bauteile berücksichtigt werden.

Die Untersuchungen im Kapitel 4 dieser Arbeit zeigen, daß nur auf diese Weise eine zuverlässige quantitative Bauteilauslegung möglich ist. Fehlt diese Randbedingung bei der Simulation, wird das Tragverhalten einzelner Komponenten im Rahmen von Simulationen häufig zu gering bewertet und die Konstruktion daher überdimensioniert. Die konstruktiven Reserven einer Struktur werden in diesem Fall nicht ausgeschöpft. Die Hauptforderung nach einer gewichtsoptimierten Struktur kann ohne die Prozeßsimulation nicht erfüllt werden.

Um Materialkennwerte in einem CAE-Prozess verwenden zu können, ist es außerdem wichtig, daß die Versuche zur Kennwertbestimmung standardisiert durchgeführt und ausgewertet werden. Nur unter diesen Voraussetzungen kann sichergestellt werden, dass Berechnungen unter einheitlichen Randbedingungen und mit einheitlichen Eingangsgrößen durchgeführt werden.

Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Arbeit ein standardisierter Versuchsablauf für Werkstoffe entwickelt und in Form einer Versuchsrichtlinie festgeschrieben. Hierfür wurden zunächst alle für die Betriebslastauslegung nötigen materialtechnischen Eingangsgrößen zusammengefaßt und mit den entsprechenden Versuchen zur Ermittlung dieser Kenngrößen beschrieben. Außerdem wurde erläutert, nach wel-

chen Verfahren die Versuche ausgewertet werden sollen, um eine bestmögliche Anpassung an die Berechnungsmethoden sicherzustellen. Dies betrifft zum Beispiel die Anzahl der Stützstellen bei der Auswertung von Spannungs-Dehnungskurven und die Ausdehnung des elastischen Bereichs.

Außerdem wurde anhand von mehreren Werkstoffen dieses standardisierte Versuchsprogramm an der Technischen Universität München am Lehrstuhl für Stahlbau (Prof. Kostea) durchgeführt.

In Anhang I sind alle Anforderungen an die Kennwertermittlung für die CAE-Betriebslastauslegung in Form einer Standardversuchsvorschrift zusammengefaßt.

Modellaufbau im CAE-Prozeß

Das FE-Modell ist als Basis jedes Simulationsvorgangs ein Hauptbestandteil des Prozesses der CAE-Betriebslastauslegung. Die Qualität des Berechnungsmodells entscheidet in erheblichem Maße über die Güte der Berechnungsergebnisse.

Bildet das Simulationsmodell das wirkliche Tragverhalten der Struktur nicht realistisch ab, kann auch bei der anschließenden Simulation kein abgesichertes Simulationsergebnis erreicht werden. Zu beachten ist außerdem, daß Unzulänglichkeiten des Simulationsmodells im anschließenden Simulationsprozeß nicht mehr behoben werden können.

Im Prozeß der CAE-Betriebslastauslegung wird die Methode der Finiten Elemente eingesetzt. Dies bedeutet, daß die reale Struktur durch ein idealisiertes FE-Modell abgebildet wird. Das Simulationsmodell kann damit immer nur eine Näherung der realen Struktur darstellen.

Effekte, die durch die Idealisierung der Struktur verloren gehen bzw. falsch abgebildet werden, sind in der späteren Simulation nicht bzw. nicht zutreffend dargestellt. Damit ist die Entscheidung, welche Details in einem Simulationsmodell enthalten sein müssen, um das reale Strukturverhalten mit der geforderten Genauigkeit abzubilden, der wichtigste Bestandteil des Modellierungsprozesses.

Dies verdeutlicht die Notwendigkeit, den Prozeß der Modellerstellung genau abzusichern und für einen qualifizierten Auslegungsprozeß zu optimieren und zu standardisieren.

Zudem nehmen die für den Modellaufbau erforderlichen Aufwände einen erheblichen Anteil an den Gesamtaufwendungen einer Auslegungsschleife in Anspruch. Deshalb muß die Effizienz beim Modellaufbau trotz der verbesserten (detaillierteren) Modellierung erhöht werden, um die Gesamtaufwände zu reduzieren. Dies bedeutet, daß eine

höhere Genauigkeit bei geringerem Aufwand gefordert wird.

In diesem Kapitel wird ein neuer Prozeß für den Aufbau von Simulationsmodellen für die Betriebslastauslegung entwickelt, der diesen Zielkonflikt löst. Durch diesen Prozeß werden erhebliche Zeit- und Effizienzvorteile gegenüber den bestehenden Abläufen realisiert. Zusätzlich konnte eine bessere Verzahnung mit den Prozessen der NVH-Auslegung erreicht werden.

2.1 Entwicklung der Modellgüte im Auslegungsprozeß

Zu Beginn eines Fahrzeugprojektes startet der Konstruktionsprozeß der Karosseriestruktur quasi mit einem „leeren Blatt“. Im günstigsten Fall können erste Potentialuntersuchungen auf Basis von Vorgängerfahrzeugen durchgeführt werden. Diese Untersuchungen werden an Modellen eines Vorgängers durchgeführt, die auf die Abmessungen des neuen Fahrzeugs angepaßt werden. Damit sind die Aussagen während der frühen Auslegungsphasen noch sehr unreif und enthalten kaum Details.

Dennoch müssen auch zu dieser frühen Phase mit den Simulationsmodellen zuverlässige Aussagen im Hinblick auf das zu erwartende Tragverhalten der Karosseriestruktur gemacht werden, um die Konstruktion unterstützen zu können.

Vor dem Hintergrund der geringen Konzeptreife der Konstruktion ist die Ausarbeitung von Detaillösungen noch nicht weit vorangeschritten. Dies spiegelt sich in den zu diesem Zeitpunkt ver-

wendeten Simulationsmodellen wider. [2.3]

Obwohl die Modelle zu Beginn der Fahrzeugentwicklung noch relativ ungenau sind, müssen die beschriebenen Aussagen hinsichtlich der Beanspruchbarkeit für Betriebslasten bereitgestellt werden. Daher werden Modelle benötigt, die trotz einer relativ groben Abbildung dennoch zuverlässige Aussagen zulassen.

Anfangs werden daher relativ grob vernetzte Modelle, die noch keinen genaueren Detaillierungsgrad aufweisen, verwendet. Mit diesen Modellen müssen trotz der relativ geringen konstruktiven Reife alle globalen Schwachstellen der Lastabtragung in der Karosserie identifiziert werden und, falls erforderlich, Konzeptvarianten vorgeschlagen werden.

Sind zu diesem frühen Zeitpunkt noch keine Daten vorhanden, kann es sinnvoll sein, auf Basis von Balken-Schalenmodellen Voruntersuchungen durchzuführen. Diese Hybridmodelle ermöglichen schnelle Modifikationen der Trägerverläufe und Querschnitte und erleichtern so Variantenuntersuchungen.

Mit der höheren Detaillierung der Konstruktionsdaten nehmen auch Umfang und Qualität der Berechnungsmodelle über die Laufzeit des Fahrzeugprojektes zu.

Gegen Ende des Auslegungsprozesses liegt dann ein CAE-Modell des vollständigen Gesamtfahrzeugs mit allen wichtigen Bauteilen und Komponenten vor. Mit diesen sehr komplexen und großen Modellen müssen alle Auslegungslastfälle der Betriebslastauslegung abgesichert werden.

Die Entwicklung in der Modellphilosophie leitet sich auch aus den in den jeweiligen Entwicklungsphasen abzusi-

chernden Auslegungsinhalten ab. Zu Beginn der Fahrzeugentwicklung müssen zunächst nur das Strukturkonzept untersucht und Schwachstellen in der Gesamtstruktur aufgezeigt werden.

Für die späteren Projektphasen müssen die Modelle allerdings auch in kleineren Teilbereichen gute Ergebnisse liefern. Dabei ist es wichtig, daß die Größe der Berechnungsmodelle mit den derzeitigen technischen Mitteln noch sinnvoll handhabbar bleibt.

Vor diesem Hintergrund wird es ersichtlich, daß die Anforderungen an die Berechnungsmodelle für alle Phasen der Fahrzeugentwicklung getrennt festgelegt werden müssen. In Form eines Modellierungskataloges können diese wichtigen Informationen allen Projektbeteiligten zugänglich gemacht werden.

Der Modellierungskatalog ist außerdem Grundvoraussetzung für die Zusammenarbeit mit externen Partnern, die in der Regel den Modellaufbau durchführen. Erst durch diese Richtlinie werden diese Leistungen überprüfbar.

2.2 Durchgängige Datenzuordnung und -bezeichnung

Neben der verbesserten Güte der Berechnungsmodelle nehmen die Dokumentation und Archivierung eine wachsende Bedeutung bei der CAE-Auslegung ein. Mit der ständig wachsenden Zahl an Simulationen wird es zunehmend schwerer, die dabei anfallende Datenfülle zu dokumentieren und anderen Prozeßpartnern zugänglich zu machen.

Die Simulation kann jedoch erst durch die Verbreitung der Ergebnisse im

Projekt wirksam werden. Insbesondere die Zuordnung der CAE-Modelle zu den entsprechenden Konstruktionsständen ist für die spätere Auswertung und Archivierung entscheidend.

Diese einheitliche Bezeichnung fehlte bisher noch und machte damit die spätere Zuordnung zu einem Konstruktionsstand im CAD PDM-System (Product Data Management) problematisch. Dies wurde zusätzlich erschwert, da teilweise einzelne Bauteile eines neueren Konstruktionsstandes in ältere Modelle eingebaut wurden, um Zwischenstände zu prüfen und konstruktive Potentiale auszuweisen.

Der CAE-Bench-Prozeß erhielt deshalb in dieser Arbeit ein eigenes Archivierungs- und Datenmanagementkonzept. Dabei werden die Attribute der CAD-Geometriemodelle des PDM-Systems (Zeichnungsnummer, -index und Alternative) herangezogen, um die Zuordnung des Simulationsmodells zu den entsprechenden Konstruktionsdaten eindeutig herzustellen. Das einzelne Bauteil im Simulationsmodell erhält dadurch dieselben Attribute wie das Bauteil im PDM-System der CAD-Daten.

Zunächst müssen die Simulationsdaten in das PDM-System für konstruktive Daten eingepflegt werden. Dabei ergibt sich jedoch das prinzipielle Problem, daß unterschiedliche Intentionen bei der Archivierung von CAD- und Simulationsdaten bestehen.

Bei einem System, das für die Verwaltung von CAD-Daten bestimmt ist, sollen die Daten für alle Prozeßbeteiligten mit möglichst hoher Aktualität verfügbar sein.

Bei der CAE-Auslegung werden auf Basis einer Konstruktion viele Varianten bewertet. Hier steht nicht die schnelle Verfügbarkeit der Daten im Vordergrund,

sondern der Bezug zu einem bestimmten Konstruktionsstand. Damit ist eine Datenbank für Simulationsdaten vielmehr eine Wissensdatenbank, in die alle Simulationen eingestellt werden.

Das bestehende PDM-System für CAD-Daten ist hierfür jedoch nicht geeignet, da die bei der CAE-Auslegung anfallenden Datenmengen zu groß sind und dadurch den CAD-Workflow behindern. Es mußte daher eine neue CAE-Simulationsdatenbank geschaffen werden, welche an die Bedürfnisse der CAE-Prozesse angepaßt wurde.

Das PDM-System für Simulationsdaten ist eine bereits im NVH-Bench integrierte Komponente. Für die Anpassung an die CAE-Betriebslastauslegung mußten allerdings die zusätzlichen Datenobjekte spezifiziert werden. Die hier beschriebenen Untersuchungen beschränken sich daher im wesentlichen auf die aus den Anforderungen der Betriebslastauslegung entstehenden zusätzlichen Umfänge des CAE-Bench.

Die grundsätzlichen Hintergründe des CAE-Bench Prozesses, der als Grundlage für die Inhalte dieses Kapitels dient, sind in [2.2] dargestellt.

2.3 Modellaufbau im Prozeß der CAE-Betriebslastauslegung

Der Prozeß der Modellerstellung für die Betriebslastsimulation umfaßt mehrere Prozeßschritte und setzt eine Reihe von Eingangsdaten voraus.

Wie in Kapitel 2.2 erläutert, baut das CAE-Bench-Betriebslastauslegung zum Teil auf dem bereits implementierten NVH-Bench-Prozeß auf. In Abbildung 2.1 sind daher die Komponenten hervorge-

hoben, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurden, um die Betriebslastauslegung zu ermöglichen.

Die neu entwickelten Komponenten wurden modular aufgebaut, um sie mit möglichst geringem Aufwand in den bestehenden Bench-Prozeß einbinden zu können.

In Abbildung 2.1 ist der vollständige Prozeß zur Erstellung eines Maximalmodells dargestellt. In der Regel wird jedoch kein Maximalmodell mit allen Einflüssen aus dem Umformprozeß und einer maximalen Detaillierung aufgebaut, sondern es werden Modelle mit geringerer Komplexität erstellt.

Es folgt eine Beschreibung der wichtigsten Prozeßschritte, die für die Erstellung eines Simulationsmodells erforderlich sind

2.3.1 CAD-Datenübernahme

Als Basis für jedes Simulationsmodell im CAE-Bench Betriebslastauslegung dient eine Bauteilliste (Strukturdokument) mit der die CAD-Flächenmodelle bzw. -Volumenmodelle aller Bauteile aus dem PDM-System ausgewählt werden können. Dieses Dokument enthält alle Informationen über die Bezeichnung der CAD-Daten (Bauteilnummer, Konstruktionsstand, Variante). Dadurch ist später ein eindeutiger Bezug zu einem festen Konstruktionsstand möglich.

Derzeit werden anhand des Strukturdokuments die einzelnen Bauteile noch manuell aus dem PDM-System der CAD-Daten geladen und mit einer getrennten Schnittstelle in das Format (VDA) umgewandelt, das für die Weiterverarbeitung im CAE-Workflow benötigt wird.

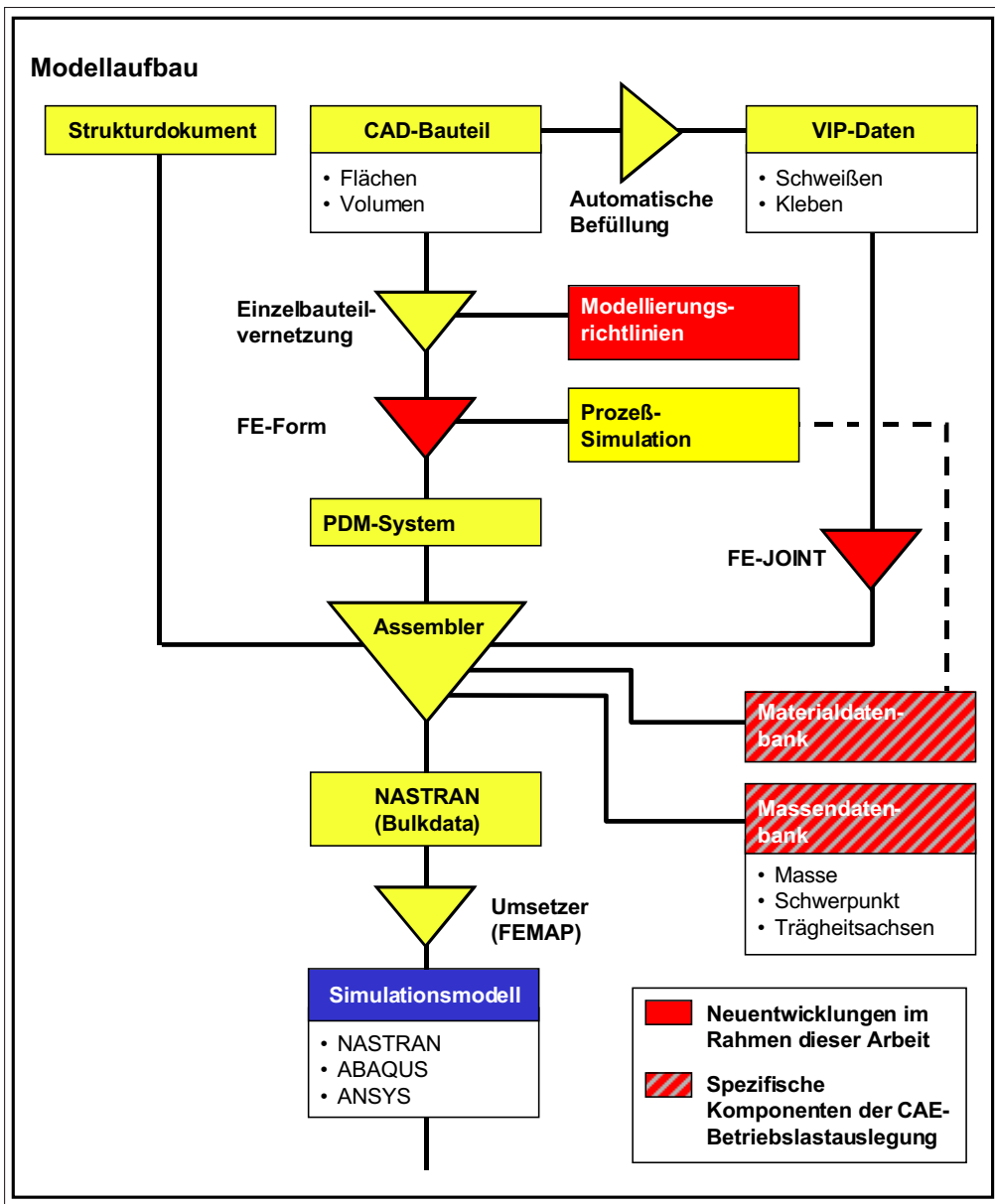


Abb. 2.1
 Prozeß der Modellerstellung für den Auslegungsprozeß Betriebslasten

Dieser Prozeßschritt nimmt bei den bestehenden Abläufen noch viel Zeit in Anspruch, da jedes Bauteil einzeln bearbeitet werden muß. Beim Exportieren aus dem PDM-System und der anschließenden Konvertierung der Datenformate geht zudem die Zuordnung der Bauteile verloren. Es besteht damit im momentanen Prozeß nach dem Exportieren der Bauteile kein eindeutiger Bezug mehr zu der Zeichnungsnummer und dem Konstruktionsstand im CAD PDM-System.

Ein wesentlicher neuer Bestandteil des CAE-Bench ist daher die konsistente Datenverwaltung aller Objekte, die während der CAE-Auslegung erzeugt werden. Dadurch, daß Simulationsmodelle nicht mehr lokal auf den Workstation-Arbeitsplätzen gespeichert, sondern in einer eigenen Datenbank abgelegt werden, kann zudem sichergestellt werden, daß keine redundanten Daten auf den Festplatten vorhanden sind.

Zu Beginn der Modellerstellung muß daher zunächst für das CAE-Bench Betriebslastauslegung ein Strukturdokument erzeugt werden, das den Umfang des zu erstellenden Modells definiert. Es wird dann abgeprüft, ob Bauteile, die im Strukturdokument aufgelistet sind, bereits vorher vernetzt und im PDM-System des CAE-Bench abgelegt wurden. Dadurch kann Mehrarbeit durch die doppelte Vernetzung von Bauteilen vermieden werden.

Alle noch nicht vernetzten Bauteile werden dann automatisch im für die Vernetzung erforderlichen VDA-Format exportiert und zur Modellierung an den entsprechenden externen Lieferanten weitergegeben. Beim Datenexport wird zusätzlich eine Identifizierungsdatei erzeugt, die eine eindeutige Zuordnung zur Zeichnungsnummer ermöglicht.

Durch die automatische Auswahl der Bauteile wird zudem eine mögliche Fehlerquelle durch die Auswahl eines falschen Konstruktionsstandes verhindert.

2.3.2 Bauteilvernetzung

Das FE-Netz des Bauteils wird dann auf Basis der Geometriedaten, die im VDA-Format vorliegen müssen, erstellt. Dazu werden die einzelnen Bauteile in einem Preprozessor mit Hilfe der Flächen- und Volumengeometrieinformationen vernetzt.

Bei der Vernetzung der Bauteile müssen mehrere Anforderungen berücksichtigt werden. Dazu gehören zum einen die durchschnittliche Elementkantenlänge und zum anderen Qualitätsanforderungen an die Geometrieverhältnisse der Elemente.

Diese Randbedingungen sind erforderlich, um später zuverlässige Simulationsaussagen mit diesen Modellen machen zu können. Insbesondere für Spannungsanalysen, wie sie für die Betriebslastauslegung benötigt werden, ist die Einhaltung der geforderten Elementqualitätskriterien entscheidend.

Die durchschnittliche Elementkantenlänge, die bei der Vernetzung vorgegeben wird, wird dabei nicht konstant über die gesamte Struktur festgelegt, sondern abhängig von den Anforderungen der Simulation variabel gestaltet. Strukturbereiche, die sich bei früheren Untersuchungen als kritisch erwiesen haben, werden von vornherein feiner vernetzt, während die restliche Struktur mit denselben Anforderungen wie bei den NVH-Modellen vernetzt wird. Dies betrifft im wesentlichen die lokalen Kräfteinleitungsbereiche des Fahrwerks.

Zeigen sich bei späteren Untersuchungen im Gesamtfahrzeug weitere hoch beanspruchte Strukturbereiche, werden diese mit einer höheren Netzdicke neu vernetzt. Dadurch, daß nicht alle Bauteile fein vernetzt werden, kann die Größe der FE-Modelle minimiert werden und bleibt mit den derzeitigen Rechnersystemen handhabbar.

Die gegenüber dem NVH-Modellierungskatalog veränderten Anforderungen bei der Abbildung von Kräfteinleitungsbereichen werden zum Ende dieses Kapitels beschrieben.

2.3.3 Aufbau des Massenmodells

Bei der Untersuchung von Gesamtfahrzeugstrukturen werden bei der Betriebslastauslegung Inertia-Relief-Analysen zur Bewertung der Lastpfade in der Karosseriestruktur durchgeführt. Bei die-

ser Simulation werden die äußeren Kräfte mit den Massenträgheitskräften der Struktur ins Gleichgewicht gebracht. Das Fahrzeug wird damit ohne Fesselung simuliert.

Die Massenverteilung in der Gesamtstruktur muß dazu möglichst genau abgebildet werden. Hierzu werden alle Einzelmassen im Fahrzeug, die größer als ca. ein Kilo sind, als Masselement in ihrer Schwerpunktlage erzeugt und mit Interpolations-Elementen (RBE) an die Struktur angebunden.

Die wesentlichen Eingangsgrößen, die zum Aufbau des Massenmodells benötigt werden, sind die genauen Schwerpunktskoordinaten und Massen aller Komponenten. Zusätzlich sind die Massenträgheitsmomente aller größeren Komponenten erforderlich, um das reale Strukturverhalten bei dynamischer Beanspruchung besser abbilden zu können.

Wichtig für die Anbindung der Einzelmassen ist außerdem die Information, an welches Bauteil und in welcher Koordinate die Massen an die Karosserie angebunden sind. Dies ist bedeutend, da die Halter, an denen die meisten Komponenten angebunden werden, im Gesamtfahrzeugmodell in der Regel nicht ausmodelliert bzw. im Modell abgebildet werden.

Die RBE-Elemente mit denen die Massen an die angrenzenden Bauteile angebunden werden, müssen daher so mit einzelnen Knoten verbunden werden, daß das Strukturverhalten auch ohne die Anbindung über entsprechende Halter wirklichkeitsnah abgebildet wird. Auf diese Weise können Singularitätsstellen im FE-Netz, die durch eine zu lokale Anbindung entstehen, vermieden werden.

Diese Information ist derzeit noch nicht direkt im CAE-Prozeß verfügbar. Es müssen deshalb die Masseninformationen noch manuell aus den Konstruktionsdaten berechnet werden. Diese Daten werden dann in Form von Excel-Listen gespeichert.

Für einen abgestimmten Auslegungsprozeß ist es zukünftig wichtig, diese Daten in einer Datenbank zu verwalten und die Befüllung zu vorgegebenen Zeitpunkten im Entwicklungsprozeß sicherzustellen. Diese Information muß dann dem Projekt in Form von einem Massen-Package zugänglich gemacht werden.

2.3.4 Assemblierung des Gesamtfahrzeugmodells

Alle Bestandteile des Simulationsmodells werden abschließend in einem Gesamtfahrzeugmodell zusammengeführt. Bei dem als Assemblieren bezeichneten Vorgang werden die einzelnen Bauteile zu einem Modell zusammengefügt und verschweißt. Anschließend wird das Massenmodell eingefügt und das bereits bestehende Drive-Line-Modell des Fahrwerks mit der Karosseriestruktur verbunden.

Dieser sehr aufwendige und fehlerträchtige Prozeßschritt kann mit den Komponenten des CAE-Bench automatisiert erfolgen. Dazu müssen jedoch einige Rahmenbedingungen berücksichtigt werden.

Hier kommt ein wichtiger Punkt der neuen Vernetzungsstrategie zum Tragen. Dadurch, daß die FE-Netze der einzelnen Bauteile im Bereich von Verbindungsflanschen aufgrund der neuen Vorgehensweise bei der Abbildung von Bauteilverbindungen nicht mehr kompatibel

(mit gleicher Elementierung) vernetzt werden müssen, kann bei der Einbringung von Bauteilverbindungen ein erheblicher Zeitvorteil realisiert werden.

Aufgrund der bisherigen Anforderungen bei der Abbildung von Bauteilverbindungen, bei der die Schweißpunkte als Balken abgebildet wurden, ergab sich bislang die Notwendigkeit, benachbarte Bauteilflansche kompatibel zu vernetzen. Der Aufwand bei der Modellierung wurde aufgrund dieser Forderung erheblich vergrößert, da benachbarte Bauteile immer von einem Modellierer vernetzt wurden und von Hand angeglichen werden mußten. Im CAE-Prozeß Betriebslastauslegung dagegen können alle Bauteile unabhängig voneinander erstellt werden. Viele Abläufe bei der Modellerstellung können damit parallel erfolgen. Die Modellerstellungszeit kann durch die Parallelisierung bei gleichbleibendem Aufwand reduziert werden.

Diese Funktionalität ist bereits zum Teil im NVH-Assembler integriert. Die wesentlichen Änderungen gegenüber dem NVH-Assemblierungsprozeß sind die bereits beschriebenen unterschiedlichen Vorgehensweisen bei der Abbildung von Bauteilverbindungen. Die veränderten Anforderungen können mit Hilfe des Software-Tools FE-JOINT in das Modell eingebracht werden. FE-JOINT tauscht die NVH-Schweißpunktabbildung gegen die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Abbildung für die Betriebslastauslegung aus.

Hierfür mußte eine neue Abbildung für Punktschweißverbindungen entwickelt werden, die auch bei inkompatiblen Flansch-Netzen einsetzbar ist und trotzdem zuverlässige Betriebsfestigkeitsaussagen für Bauteilverbindungen zuläßt.

2.4 Nutzung von Synergiepotenzialen bei der Erstellung von Gesamtfahrzeugmodellen

Um die zum Teil erheblichen Aufwände, die zur Erstellung eines CAE-Modells notwendig sind, zu reduzieren, mußte der Modellaufbau mit den Nachbardisziplinen synchronisiert werden. Der Modellaufbauprozeß für NVH- und Betriebsfestigkeitsmodelle muß dafür über weite Bereiche parallel ablaufen.

Um beim Modellaufbau Synergiepotentiale zu erzielen, müssen zunächst die grundsätzlichen Unterschiede in der Modellphilosophie zwischen den einzelnen CAE-Modellen hervorgehoben werden.

Modelle, die für die NVH-Simulation erstellt werden, unterscheiden sich von denen der Betriebslastauslegung insbesondere dadurch, daß die Netzdichte (Elementkantenlänge) in den für die Betriebslastauslegung kritischen lokalen Kräfteinleitungsbereichen nicht fein genug abgebildet ist. Mit der Elementierung, wie sie bei NVH-Modellen eingesetzt wird, wären daher keine Aussagen über die lokale Festigkeit möglich. Diese Bereiche müssen deshalb für die Betriebslastauslegung neu vernetzt werden.

Ein weiterer Unterschied zu den Modellen der Betriebslastauslegung ist, wie bereits erwähnt, die Abbildung von Schweißpunkten und anderen Bauteilverbindungen. Hier wird ein Ersatzmodell verwendet, das zur Ermittlung von globalen Steifigkeitskennwerten geeignet ist, aber aufgrund der unzureichenden Abbildung des örtlichen Steifigkeitsverhaltens (Deformationsverhaltens) im Bereich der Verbindung nicht für Aussagen über einzelne Schweißpunkte geeignet ist. Außerdem ist dieses Schweiß-

punktmodell nicht mit der Vorgehensweise bei der Lebensdauerbewertung von Schweißpunkten kompatibel.

Das Schweißpunktersatzmodell der NVH-Modelle wurde unter der Maßgabe entwickelt, daß das FE-Netz im Bereich von Flanschen nicht kompatibel vernetzt werden muß. Dadurch konnte bei der Modellerstellung Zeit eingespart werden.

Dieses sind die zwei wesentlichen Faktoren, die eine direkte Verwendung der NVH-Modelle im Umfeld der Betriebslastauslegung verhindern.

Die feinere Netzdichte der Betriebslastauslegung hat abgesehen von der etwas längeren Simulationszeit keinen negativen Einfluß auf die NVH-Auslegung. Solange die Gesamtzahl der Elemente noch handhabbar bleibt, könnte daher das Modell der Betriebslastauslegung übernommen werden.

Daher kann die Netzdichte in der Regel an die Erfordernisse der Betriebslastauslegung angepaßt und von den anderen Auslegungsdisziplinen übernommen werden.

Ein größeres Problem im Hinblick auf eine vereinheitlichte Modellerstellung bereiten die unterschiedlichen Philosophien der Ersatzmodelle für Verbindungsmittel. Das derzeitige Schweißpunktersatzmodell der Betriebslastauslegung setzt eine kompatible Vernetzung der Flansche voraus.

Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit das in [2.1] entwickelte „Gössing“-Schweißpunktersatzmodell weiterentwickelt und zusätzlich ein neues Ersatzmodell für Gesamtfahrzeug-Untersuchungen entwickelt, das wie das Ersatzmodell der NVH-Auslegung keine kompatiblen Flansche erfordert.

Das „Gössing“-Ersatzmodell wird im wesentlichen bei nichtlinearen Analy-

sen eingesetzt und bei einzelnen besonders kritischen Schweißpunkten in der Gesamtstruktur. Da dabei nur eine relativ geringe Zahl von Schweißpunkten betroffen ist, werden für diese Bereiche die Schweißpunktmodelle nachträglich erzeugt.

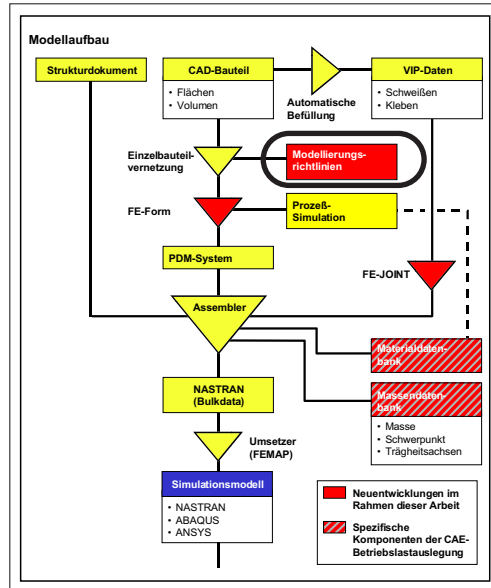
Das zweite Ersatzmodell wird bei Untersuchungen an der Gesamtstruktur verwendet. Es ermöglicht dieselben Vorteile in Bezug auf die Vernetzung wie die Abbildung für NVH-Modelle.

Der Prozeß der Modellerstellung von Gesamtfahrzeugmodellen kann mit der neuen Schweißpunktabbildung zwischen den beiden Berechnungsdisziplinen synchron ablaufen. Es wird damit nur noch ein Modell erstellt, das sich einzig durch das verwendete Schweißpunktersatzmodell unterscheidet.

Zum Einbau des Ersatzmodells für die Betriebslastauslegung wurde das Tool FE-JOINT entwickelt. Da das Verschweißen der Modelle vollständig automatisiert ablaufen kann, ist der Zusatzaufwand für diese Umfänge minimal.

Zur Erzeugung der „Gössing“-Schweißpunktabbildung wurde vom Verfasser das Makro SPNEU programmiert, das im Preprozessor des Simulationsprogramms ANSYS das Schweißpunktersatzmodell auf Basis der Balkenabbildung automatisch erzeugt. Auch dieser Prozeßschritt läuft vollständig automatisch ab.

2.5 Benchmark Vernetzungsstrategien



Die Qualität des FE-Netzes hat, wie bereits erläutert, einen erheblichen Einfluß auf die Güte der Berechnungsergebnisse. Aus diesem Grund ist bei der Vernetzung von Bauteilen ein zusätzlicher manueller Aufwand zur Verbesserung der FE-Netz-Qualität erforderlich. Dieser Aufwand zur manuellen Vernetzung der Bauteile nimmt derzeit den größten Anteil innerhalb des Vernetzungsprozesses in Anspruch.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher nach Möglichkeiten gesucht, den Aufwand in diesem Bereich zu reduzieren. Es zeigte sich dabei, daß die Potentiale der automatischen Bauteilvernet-

zung im Laufe der letzten Jahre erheblich verbessert wurden.

Aus diesem Grund wurde ein Benchmark durchgeführt, um den Einfluß der aufwendigen manuellen Vernetzung auf die Ergebnislage aufzuzeigen und mit dem Ergebnis einer weitgehend automatisierten Vernetzung zu vergleichen.

Hierzu wurde die Karosserieteilstruktur eines Vorderwagens nach den beiden Vernetzungsmethoden aufgebaut. Anschließend wurden Steifigkeits- und Festigkeitsuntersuchungen an den beiden Modellen durchgeführt, um die Unterschiede der beiden Modelle zu bestimmen.

Die Bauteile wurden dazu einmal mit hohen Anforderungen, wie sie derzeit in den Modellierungsrichtlinien für die elasto-plastische Simulation vorgegeben werden, manuell vernetzt. Die dabei verwendeten Richtlinien wurden auf Basis von Empfehlungen der Programmhersteller erstellt.

Zusätzlich wurde eine zweite Struktur aufgebaut, die weitgehend automatisch vernetzt wurde. Die Modellierungszeit konnte hier um etwa ein Drittel gegenüber der bisherigen Vorgehensweise reduziert werden.

Die Simulationsergebnisse der beiden Varianten zeigten, daß die Vernetzung nur einen geringen Einfluß auf die Steifigkeit der Struktur (Abb. 2.2) und die

Abb. 2.2

Vergleich der Steifigkeiten des High-Quality Mesh gegenüber dem Free Mesh der automatischen Vernetzung

		Chargin		Single Beams	
		Verschiebung		Verschiebung	
		[mm]	[%]	[mm]	[%]
High Quality Mesh	x	2,514	100,0%	2,707	93%
	y	1,081	100,0%	1,168	93%
	z	0,508	100,0%	0,565	90%
Free Mesh	x	2,533	99,3%	2,737	92%
	y	1,079	100,2%	1,180	92%
	z	0,533	95,2%	0,612	83%

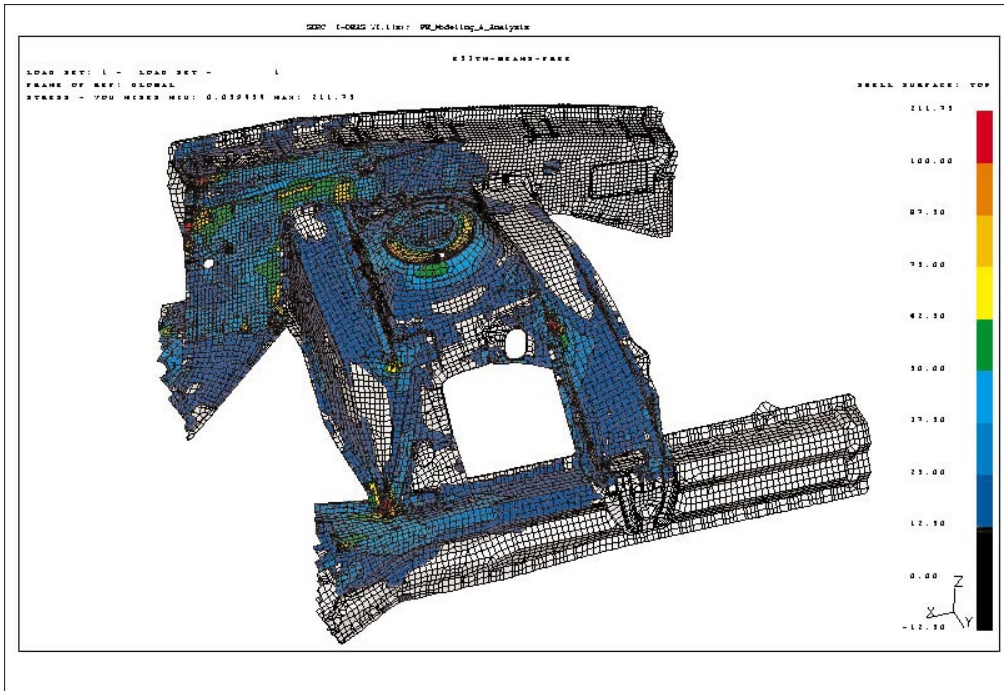


Abb. 2.3

Spannungsverteilung des High-Quality Mesh

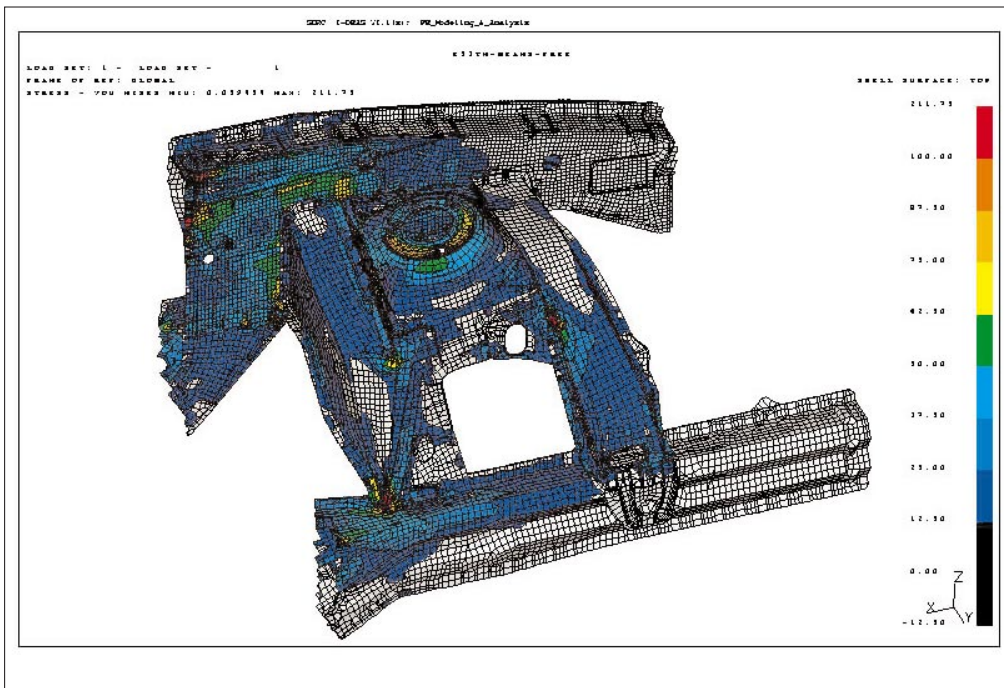


Abb. 2.4

Spannungsverteilung des Free Mesh

globalen Lastpfade hat (Abb. 2.3 und 2.4). Diese Unterschiede lassen sich im wesentlichen auf die deutlich größere Anzahl von Elementen mit schlechten Elementqualitätskriterien in der Struktur zurückführen. Hierdurch wird die Steifigkeit der Struktur verändert.

Deutliche Unterschiede zeigen sich jedoch bei dem Vergleich der Spannungsverteilungen in einzelnen Lokalbereichen zwischen den beiden Simulationsmodellen. Hier hat die schlechtere Elementqualität einen erheblich größeren Einfluß.

In den Abbildungen 2.3 und 2.4 erfolgt eine Gegenüberstellung der Spannungsverteilung (von-Mises-Spannungen) in der Gesamtstruktur. Hier sind nur geringe Unterschiede zu erkennen. Viel gravierender ist die unterschiedliche Verteilung in den lokalen Bereichen der Bauteilverbindungen (Abb. 2.5).

Aus diesem Grund ist die weitgehend automatisierte Bauteilvernetzung für die Betriebslastauslegung nicht anwendbar. Für die reine Steifigkeitsauslegung bieten sich jedoch Potentiale.

ist es daher wichtig, speziell hier zuverlässige Abbildungsmethoden zu haben.

Die Ersatzmodelle für Bauteilverbindungen müssen daher gegenüber der NVH-Abbildung (Abb. 2.6) verbessert werden, um genauere Simulationsergebnisse in diesen Bereichen erreichen zu können. Bei der Betriebslastauslegung müssen dabei zwei Auslegungsdisciplinen abgedeckt werden.

Zum einen muß zur Absicherung für statische Einzelereignisse eine Abbildung entwickelt werden, mit der die Spannungsverteilung im Umfeld der Bauteilverbindung realistisch wiedergegeben wird und das Versagen der Verbindung für statische Ereignisse abgesichert werden kann. Außerdem müssen die Schweißpunkte im Rahmen einer Betriebsfestigkeitssimulation abgeprüft werden.

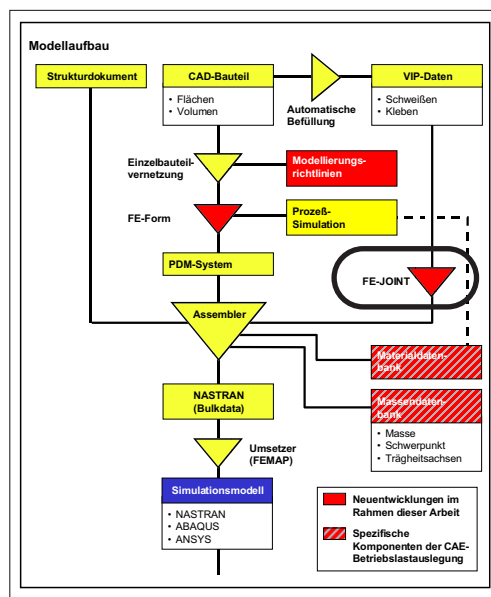
Die Anforderungen an die Schweißpunktabbildung unterscheiden sich gerade in diesem Bereich stark von denen der NVH-Simulation (Chargin-Ersatzmodell). [2.4, 2.5]

Bei der Betriebsfestigkeitssimulation wird das Gesamtfahrzeug bewertet, während bei der statisch nichtlinearen Simulation nur kleinere Teilmodelle eingesetzt werden. Für die Gesamtfahrzeugsimulation ist die Gesamtzahl der Elemente im Modell und der effiziente Modellaufbau entscheidend, während bei der nichtlinearen Bewertung von Teilmodellen das Abbilden der genauen Spannungsverteilung im Vordergrund steht.

Aus diesem Grund mußten zwei unterschiedliche Schweißpunktabbildungen entwickelt werden:

Eine Abbildung, die bei Gesamtfahrzeuguntersuchungen zum Einsatz kommt, und eine weitere, für die nichtlineare Bewertung von Teilstrukturen.

2.6 Abbildung von Punktschweißverbindungen bei der Betriebslastauslegung



Schweißpunkte sind in der Regel die Stellen in der Struktur, die durch Betriebsbeanspruchungen am höchsten belastet werden. Schäden durch Betriebslasten treten daher im Bereich von Bauteilverbindungen häufig als erstes auf. Für die Betriebslastauslegung

Manuelle Bauteilvernetzung

Automatische Bauteilvernetzung

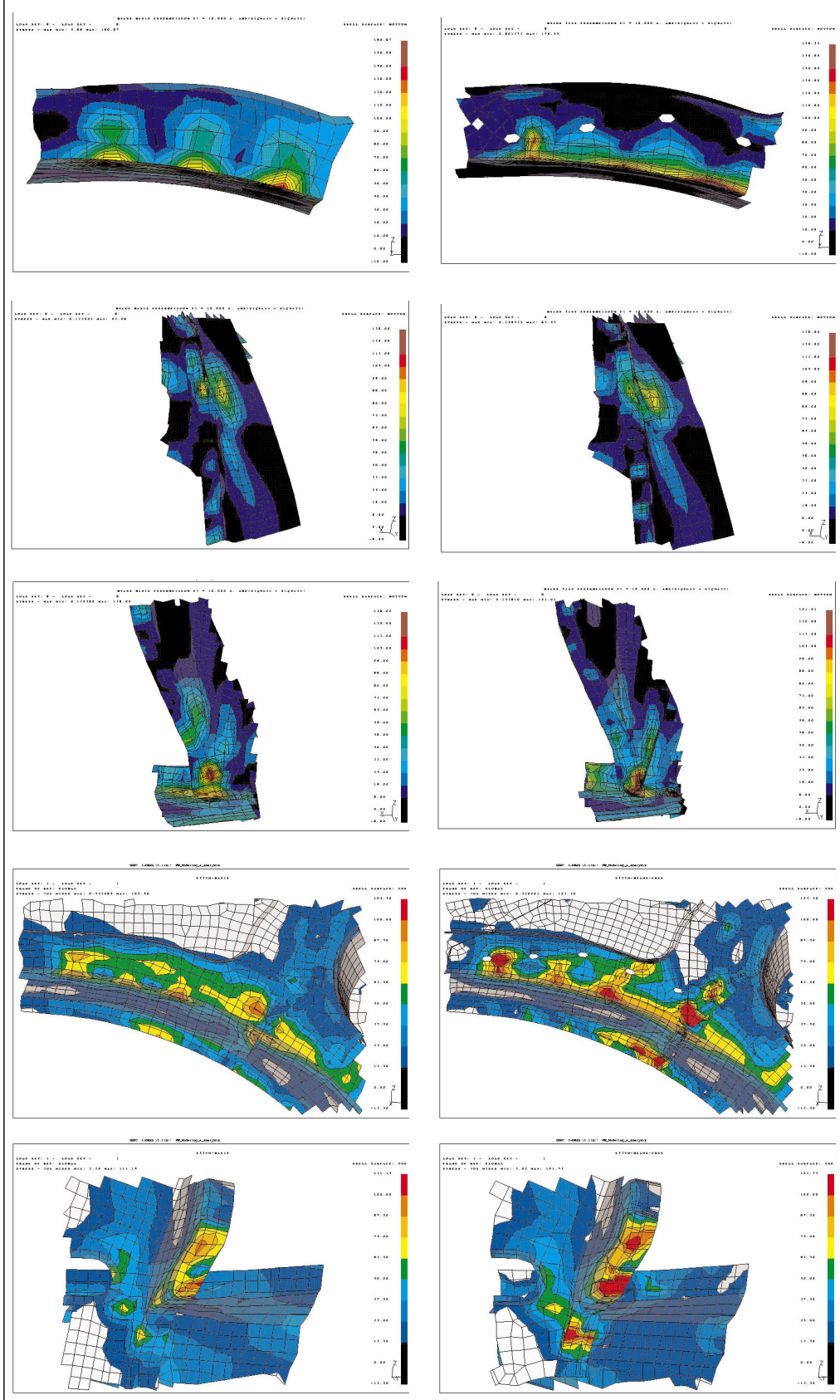


Abb. 2.5

Vergleich der Spannungsverteilung im Bereich von Schweißpunkten

Dabei ist zu beachten, daß in beiden Fällen nur Ersatzmodelle entwickelt wurden, die das wirkliche Verhalten im Schweißpunkt idealisiert für eine bestimmte Funktion bzw. Fragestellung wiedergeben.

Für andere Auslegungsdisziplinen wie zum Beispiel den Crash kann es daher besser geeignete Abbildungen geben, die im Hinblick auf die jeweilige Fragestellung optimiert sind.

In jedem Fall kann das reale Verhalten eines Schweißpunkts in einem FE-Modell des Gesamtfahrzeugs mit ca. 6.000 Schweißpunkten nie vollständig abgebildet werden, da die Gesamtzahl der Elemente durch die derzeit verfügbare Rechenleistung begrenzt ist.

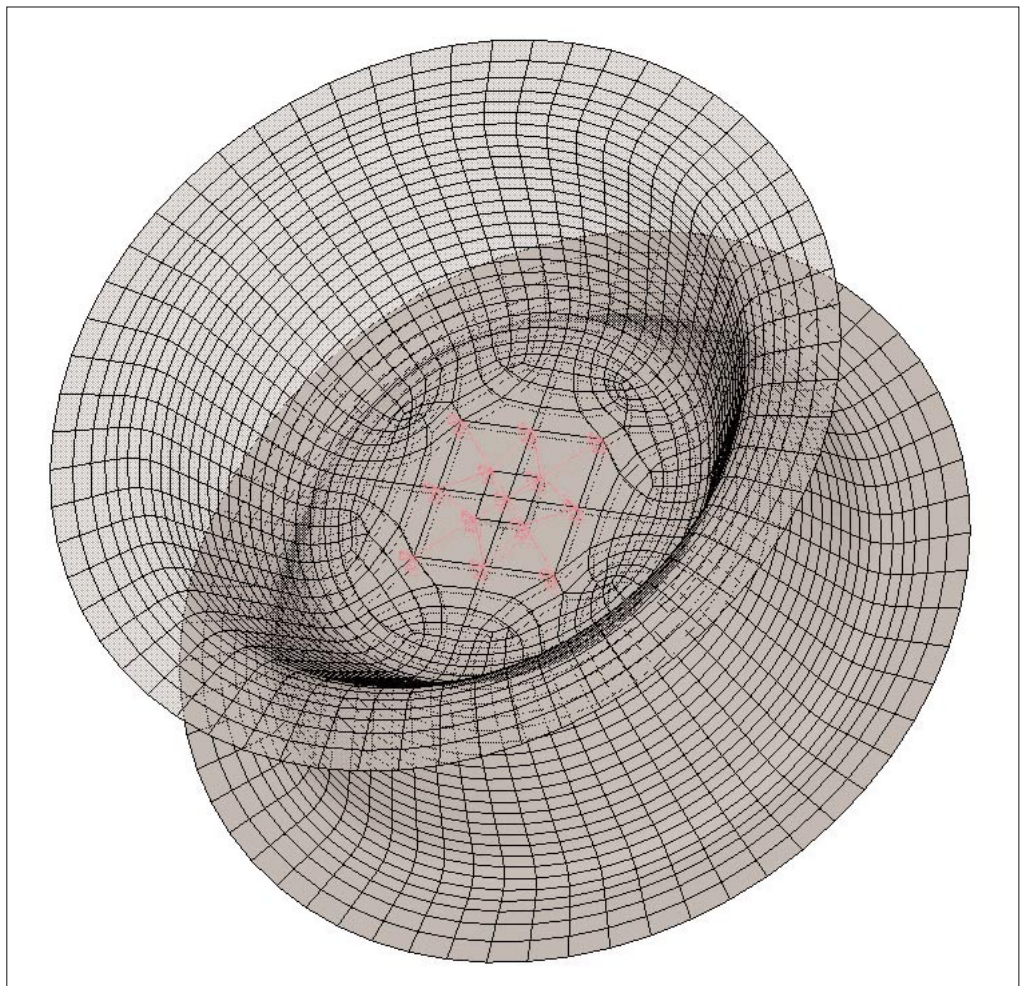
2.6.1 Gegenüberstellung der derzeitigen Schweißpunktabbildungen

Es gibt derzeit eine Fülle verschiedener Schweißpunktersatzmodelle, die bei der Karosserieauslegung zum Einsatz kommen. Jede ist für eine bestimmte Simulationsanwendung oder Funktionsanforderung optimiert. Um die Ersatzmodelle für die Betriebslastauslegung zu entwickeln, wurden daher zunächst die gebräuchlichsten Abbildungen verglichen.

Die älteste derzeit noch zum Einsatz kommende Schweißpunktabbildung ist die mit einem einzelnen Balkenelement. Hier wird jeweils ein Knoten der beiden Flansche an der Stelle des Schweißpunktes mit einem senkrecht

Abb. 2.6

NVH-Schweißpunktabbildung (Chargin)



zur Flanschebene orientierten Balkenelement verbunden. Diese Abbildung dient gleichzeitig als Basis für die Erzeugung der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten „Gössing“-Schweißpunktabbildung (Abb. 2.7).

Die Balkenabbildung hat einige Nachteile gegenüber den neueren Schweißpunktersatzmodellen. Zum einen entsteht eine Singularitätsstelle am Übergang vom Balkenelement zu den benachbarten Schalen und zum anderen müssen bei der Vernetzung die Flansche mit dem gleichen Netz aufgebaut werden, damit der Balken orthogonal zum Flansch eingebaut werden kann.

Für die Betriebsfestigkeitssimulation ist der Balken als Verbindungselement jedoch eine Grundvoraussetzung,

da das Schweißpunktversagen bei der Lebensdauersimulation aus Balkenschnittkräften hochgerechnet wird (Verfahren nach Rupp [2.6]).

Um die Nachteile dieser Abbildung zu beheben, wurde für die NVH-Simulation eine neue Abbildung entwickelt. Hier wird der Schweißpunkt durch ein einzelnes Solid-Element abgebildet, das über Interpolationselemente (RBE) an die Flansche angebunden wird.

Dadurch müssen die Flansche nicht mehr die gleichen Netze aufweisen und die Kraftüberleitung erfolgt nicht mehr in einem Knoten, sondern „verschmiert“ über eine größere Fläche.

Der dabei entstehende „Verschmierungseffekt“ ist aber gleichzeitig das größte Hindernis für den Einsatz die-

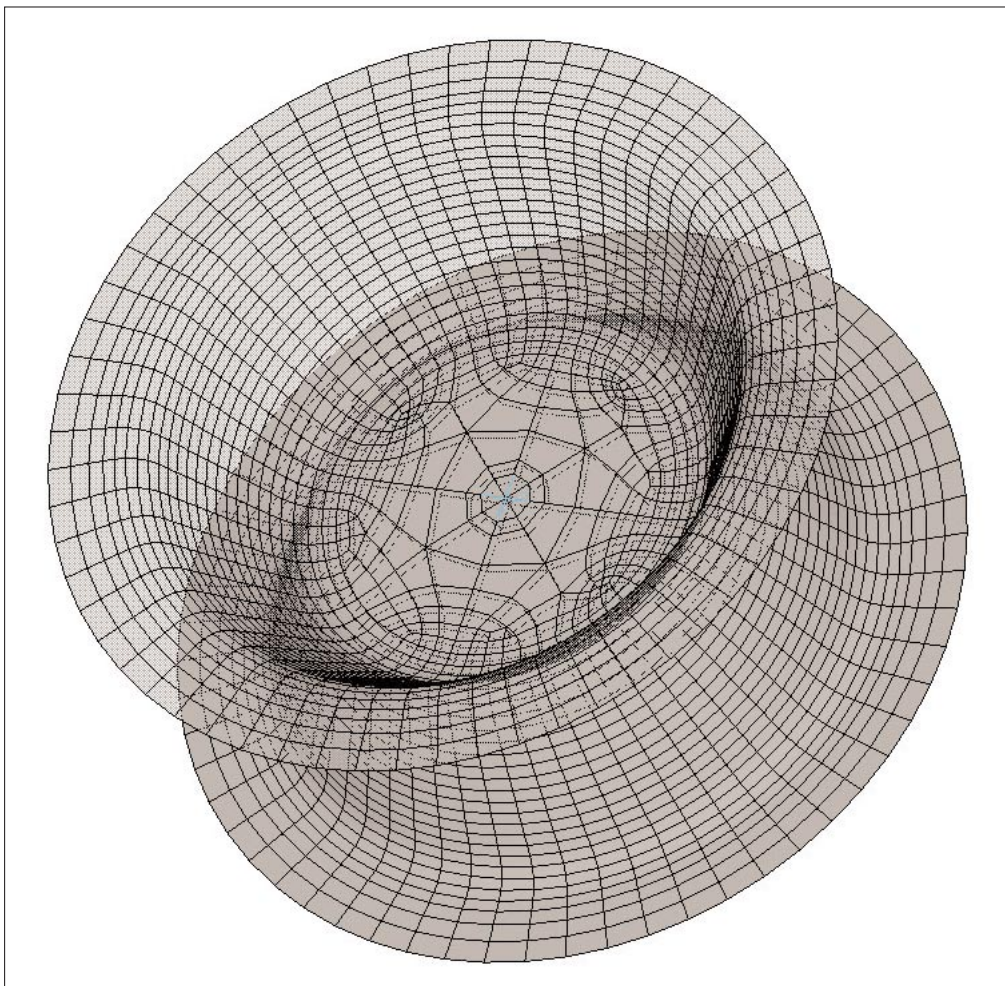


Abb. 2.7
„Gössing“-
Schweißpunkt-
ersatzmodell

ser Abbildung bei der Festigkeitsauslegung. Durch die großflächige Lastüberleitung über die Interpolationselemente wird die lokale Beanspruchung und Lastüberleitung im Umfeld des Schweißpunkts stark verfälscht.

Außerdem kann aufgrund des fehlenden Balkenelements keine Lebensdauersimulation für die Schweißpunkte erfolgen.

2.6.2 Schweißpunktabbildung für die Lebensdauersimulation

Die Lebensdauersimulation erfolgt in der Regel am Gesamtfahrzeug. Hier sind daher ähnliche Randbedingungen gegeben wie bei der NVH-Auslegung. Dennoch sind Anpassungen bei der Schweißpunktabbildung für die Betriebsfestigkeitssimulation erforderlich.

Wie bereits erläutert, muß für die Lebensdauersimulation ein Balkenelement an Stelle des Schweißpunktes vorhanden sein. Um die Nachteile der direkten Anbindung des Balkens an die Schalenelemente zu beseitigen, wurde bei der hier vorgestellten Abbildung der Balken nicht direkt an die Schalen angebunden, sondern, ähnlich der NVH-Abbildung, über Interpolationselemente mit den Flanschen verbunden.

Aus technischer Sicht mußte außerdem eine weitere Anpassung erfolgen. Bei der Lebensdauersimulation wird das Berechnungsergebnis für jeden Schweißpunkt auf die nächsten angren-

zenden Schalenelemente geschrieben. Da bei der Anbindung mittels RBE-Interpolationselementen keine Schalen mehr direkt an den Schweißpunkt balken angrenzen, wäre so keine Ergebnisdarstellung möglich. Aus diesem Grund wird die Fläche, die von den Interpolationselementen aufgespannt wird, zusätzlich mit Schalenelementen (Dreiecken) aufgefüllt, denen bei der Simulation ein sehr geringer E-Modul zugewiesen wird. Sie haben dadurch keinen Einfluß auf das Simulationsergebnis und können bei der Lebensdauersimulation für die Ergebnisauswertung verwendet werden.

Um dieses Schweißpunktersatzmodell zu erzeugen, wurde das Software-Tool FE-JOINT erstellt, welches ein Gesamtfahrzeugmodell, das mit dem NVH-Schweißpunktersatzmodell aufgebaut wurde, automatisch in ein Betriebsfestigkeitsmodell mit der hier vorgestellten Schweißpunktabbildung umwandelt.

Bei der Gegenüberstellung der globalen Steifigkeitskennwerte ergaben sich im Vergleich zu der NVH-Abbildung nur sehr geringe Unterschiede (Abb. 2.8). Die Auswertung der lokalen Spannungen ergab jedoch eine deutlich realistischere Verteilung.

Abb. 2.8

Systemsteifigkeit des Vorderwagens bei Verwendung unterschiedlicher Schweißpunktabbildungen

	NVH		Single Beams		Goessing	
	Verschiebung [mm]	[%]	Verschiebung [mm]	[%]	Verschiebung [mm]	[%]
x	2,51	100	2,71	92,9	2,59	97,0
y	1,08	100	1,17	92,5	1,11	97,6
z	0,508	100	0,565	89,8	0,520	97,6

2.6.3 Versuchstechnische Ermittlung von Steifigkeits- und Festigkeitskennwerten von Schweißpunkten

Um das Schweißpunktersatzmodell für die nichtlineare Festigkeitsauslegung und Lebensdauersimulation zu qualifizieren, wurde ein Versuchsprojekt zusammen mit dem MPA der TU München durchgeführt. Ziel des Projektes war es, anhand einfacher Schweißpunktproben alle für die Festigkeitsauslegung relevanten Eigenschaften von Punktschweißverbindungen zu ermitteln.

Als Probe wurde die aus [2.7] bekannte einfache Napfprobe (Abb. 2.9) ausgewählt. Diese Probenform ermöglicht Zugversuche in unterschiedlichen Winkellagen zur Fügeebene. Dazu ist eine spezielle Einspannvorrichtung erforderlich, die an die verschiedenen Zugrichtungen angepaßt werden kann.

Der Aufbau dieser Vorrichtung wurde [2.7] entnommen.

Dadurch kann die örtliche Beanspruchung und Deformation für alle relevanten Belastungsrichtungen ermittelt werden. Dies ist insbesondere wichtig, da die Festigkeit einer Punktschweißverbindung sehr stark von der Lastrichtung abhängt [2.3].

Ein weiterer Grund, warum diese Probe ausgewählt wurde, ist die hohe Steifigkeit der Näpfe [2.11]. Dadurch kann verhindert werden, daß die Versuchsergebnisse durch Verformungen in der Probe beeinflußt werden. Dies ist zum Beispiel bei einfachen Scherzug-Proben der Fall, bei denen sich der Flansch bei steigender Last verformt und sich die Belastung des Schweißpunkts von einem reinen Kopfzug hin zu einer gemischten Schälbeanspruchung verändert.

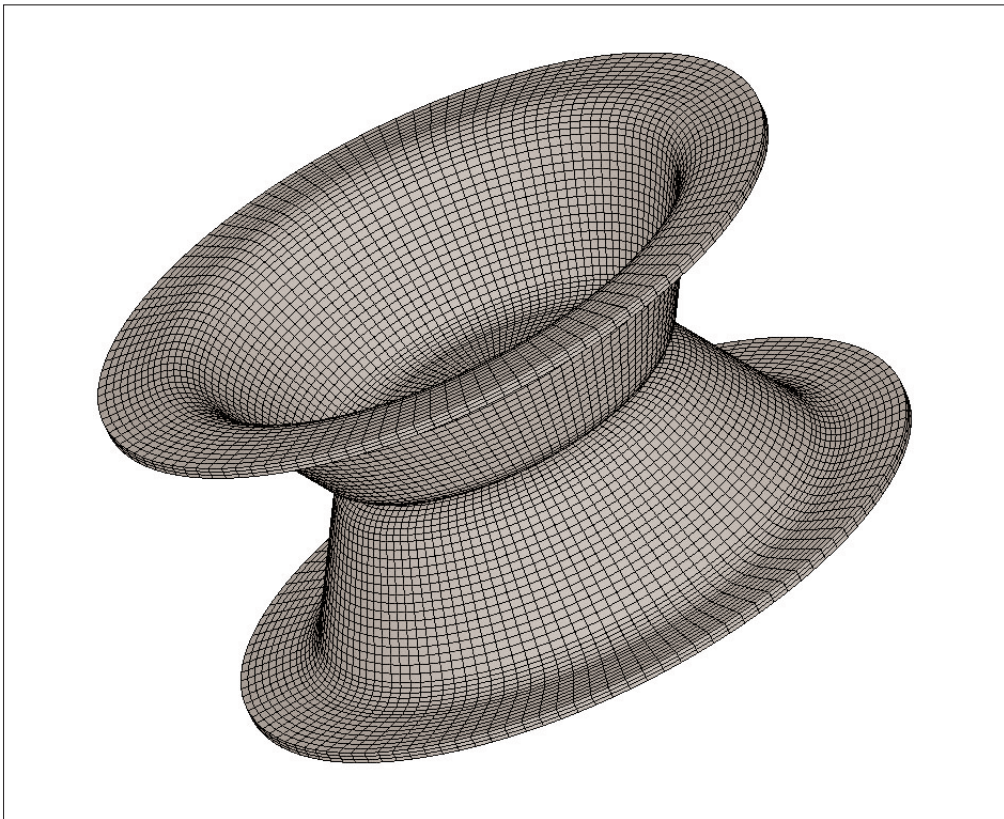


Abb. 2.9

FE-Modell der Napfprobe

Abb. 2.10

Deformation im Boden der Napfprobe (Rechnung/Versuch) bei Kopfzugbeanspruchung

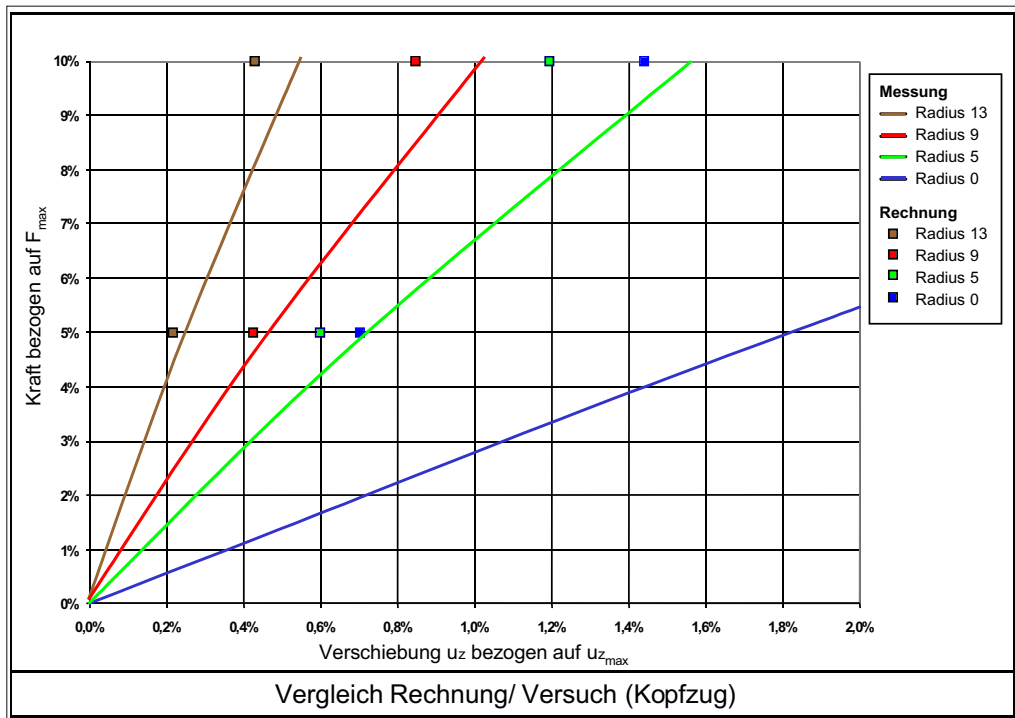
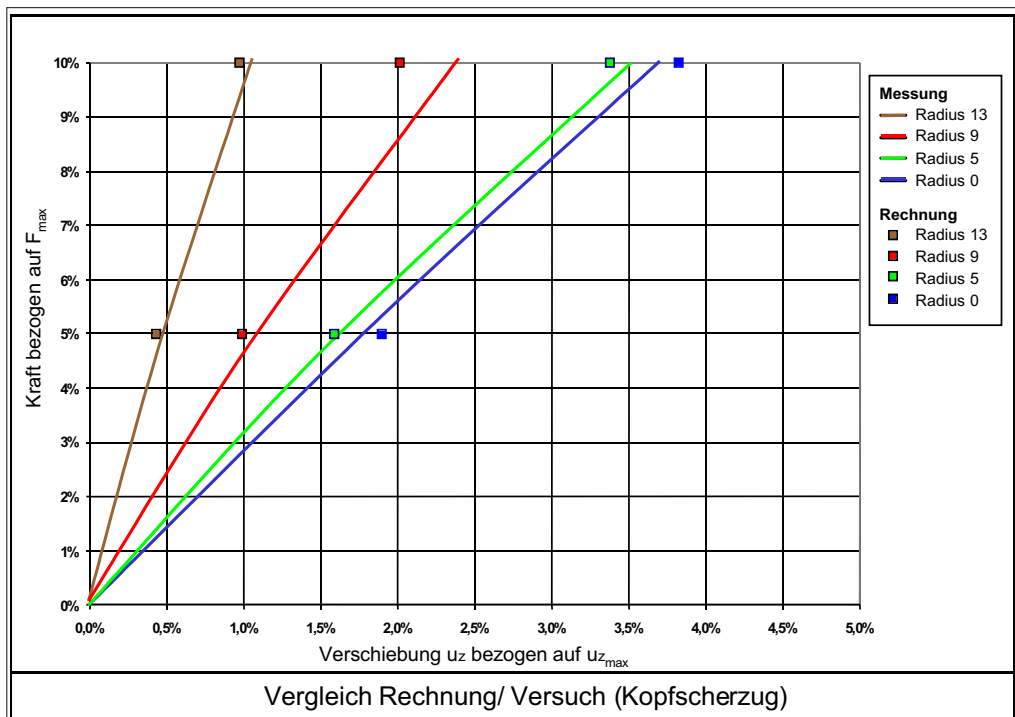


Abb. 2.11

Deformation im Boden der Napfprobe (Rechnung/Versuch) bei Kopfscherzugbeanspruchung



Die Versuche an den Napfproben teilten sich in zwei Gruppen. Zum einen wurden statische Zugversuche mit drei verschiedenen Belastungsrichtungen durchgeführt. Dabei stand die Ermittlung der statischen Bruchlast und die Messung des Deformationsverhaltens im

Vordergrund. Dazu wurde die Deformation der Proben während des Zugversuchs mittels Feinwegaufnehmern bestimmt. Diese Messungen dienen anschließend dazu, das „Gössing“-Ersatzmodell zu kalibrieren (Abb. 2.10 und 2.11).

Die Entwicklung des Versagenskriteriums für statische Beanspruchungen wurde aus dieser Arbeit abgelöst und in einer, vom Verfasser betreuten, Diplomarbeit [2.15] untersucht. Hier wurde unter der Vorgabe der „Gössing“-Schweißpunkttafeln ein Verfahren zur rechnerischen Vorhersage des statischen Versagens von einzelnen Schweißpunkten entwickelt. Das dabei entwickelte Verfahren orientiert sich stark an den bereits bekannten Verfahren [2.4, 2.6, 2.14] für das zyklische Versagen von Punktschweißverbindungen.

Zusätzlich zu den statischen Versuchen wurden Einstufenschwingversuche zur Bestimmung der zyklischen Festigkeit der Schweißpunkte unter verschiedenen Kraftangriffsrichtungen durchgeführt. Diese dienten dazu, Materialkennwerte für das in [2.6] vorgestellte Verfahren zu bestimmen. Die Auswertung der Versuche wurde auf den späteren Einsatz in der Lebensdauersimulationssoftware FALANCS abgestimmt [2.8, 2.9, 2.10].

2.6.4 Schweißpunkttafeln für die statische Festigkeitssimulation

Bei der statischen Festigkeitssimulation stehen die Anforderungen im Hinblick auf eine möglichst realistische Spannungsverteilung im Bereich des Schweißpunktersatzmodells im Vordergrund. Bei der nichtlinearen Bewertung von Teilmodellen müssen zuverlässige Aussagen über die Tragfähigkeit aller Schweißpunkte gemacht werden.

Dazu muß sowohl das Versagen des Schweißpunktes selbst, als auch die Tragfähigkeit der Blechstruktur abgebildet werden.

In [2.1] wurde die erste Version der „Gössing“-Schweißpunkttafel entwickelt, die deutlich verbesserte Spannungsergebnisse gegenüber den bisherigen Ersatzmodellen ermöglichte. Die dort vorgestellten Untersuchungen wurden allein auf Basis eines Referenzmodells durchgeführt. Eine versuchstechnische Absicherung war im Rahmen von [2.1] nicht möglich.

Die dort vorgestellte Schweißpunkttafel wurde deshalb vor dem Hintergrund des Versuchsprogramms hinterfragt und überarbeitet. Zusätzlich wurden dabei die Anforderungen für die Vorhersage des statischen Bruchs berücksichtigt.

Um die Tragfähigkeit des Schweißpunktes für statische Lasten vorhersagen zu können, mußte die in [2.1] vorgestellte Tafel modifiziert werden. Dabei wurde die Modellierung des ersten Elementrings um die Balkenspinne verändert.

Hier konnte durch die Vorgabe eines Elementrings mit im Verhältnis zum Linsendurchmesser festen geometrischen Abmessungen eine verbesserte Aussagegüte ermöglicht werden. Dies begründet sich im wesentlichen aus der dabei entstehenden besseren Elementqualität.

Außerdem entstehen durch die Vorgabe des zweiten Knotenrings um den Schweißpunkt feste Auswertestellen, die für die Vorhersage des statischen Bruchs verwendet werden können. Eine aufwendige Umrechnung der Knotenkräfte auf bestimmte Punkte kann daher entfallen.

Ein weiterer Vorteil dieses Elementrings um den Schweißpunkt ist die Möglichkeit, diesem eigene Materialeigenschaften bei der elasto-plastischen Simulation zuzuweisen. Dadurch kann

Abb. 2.12

Spannungsverteilung bei NVH-Modellierung

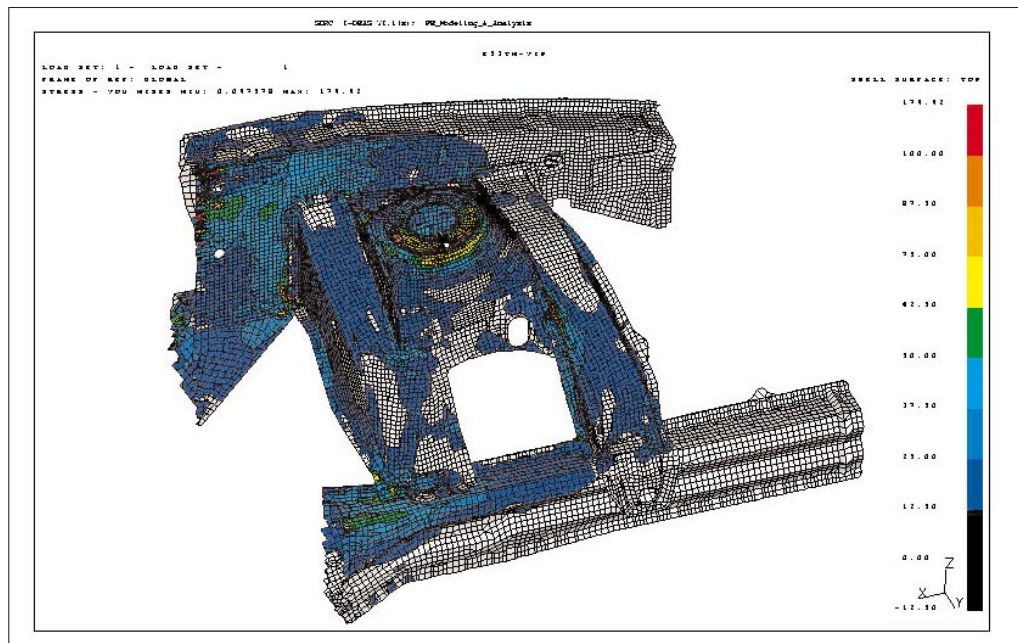


Abb. 2.13

Spannungsverteilung bei „Gössing“-Schweißpunktabbildung



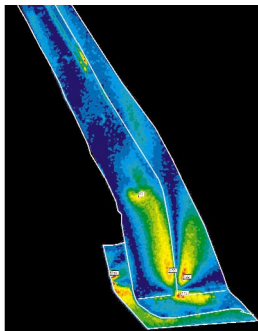
das veränderte Materialverhalten im Bereich der Wärmeeinflußzone (WEZ) berücksichtigt werden.

Bei Versuchen, die im Rahmen des Schweißpunktprogramms an der TU München durchgeführt wurden, zeigte sich jedoch, daß der Bereich der WEZ bei Punktschweißverbindungen nur sehr klein ist. Der Einfluß der WEZ kann daher

bei der nichtlinearen FE-Simulation vernachlässigt werden.

Als erheblich wichtiger erwies sich die genaue Abbildung des lokalen Deformationsverhaltens im Umfeld der Schweißlinse, da dadurch die Lastüberleitung im Schweißpunkt und damit die lokale Spannungsverteilung stark beeinflusst wird.

Bereich I



Bereich II

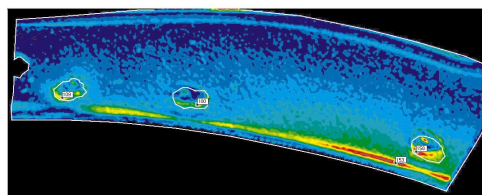
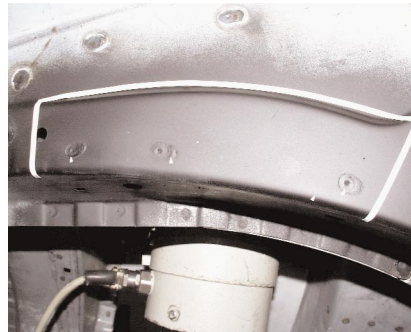
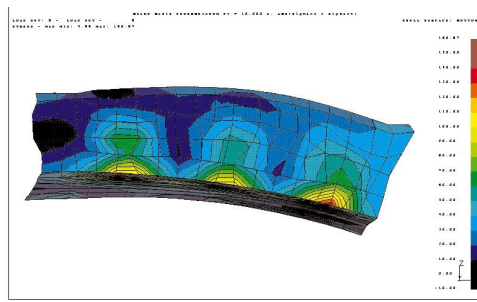
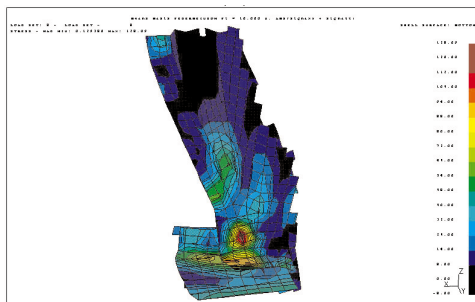


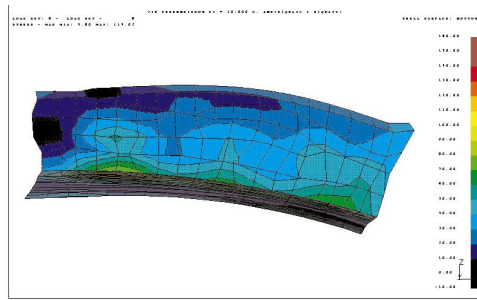
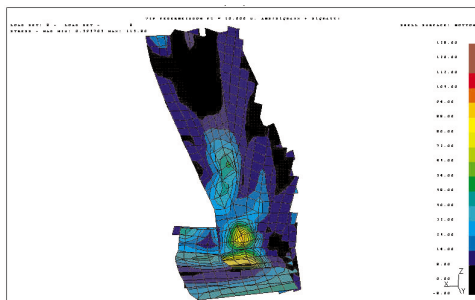
Abb. 2.14

Vergleich der Spannungsverteilung im Bereich von Schweißpunkten (Summe der Hauptspannungen)

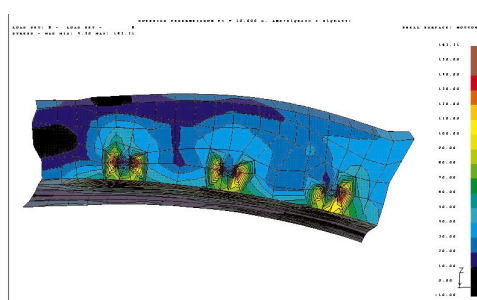
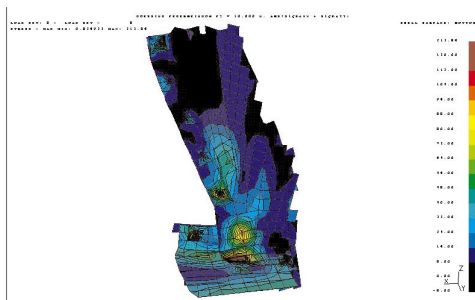
THESA-Messung (Versuch)



Simulation Balken-Abbildung



Simulation NVH-Abbildung



Simulation „Gössing“-Abbildung

Hier zeigte sich, daß durch die Anpassung des Linsendurchmessers im FE-Modell (Durchmesser der Balkenspinne) von 5,0 auf 4,8 mal der Wurzel aus der kleineren Blechdicke des Flanschpaares eine Verbesserung der Aussagegüte erreicht werden kann.

Diese Untersuchungen zeigten außerdem, daß der Durchmesser des zweiten Knotenrings um die Balkenspinne mit 1,5 mal dem Durchmesser der Balkenspinne gewählt werden muß, um den weiteren Spannungsverlauf realistisch abzubilden.

Diese Erkenntnisse wurden dann im Makro SPNEU umgesetzt. Dadurch kann das „Gössing“-Ersatzmodell automatisch erzeugt werden. Bei der Ausführung des Makros können unterschiedliche Formfaktoren für den Linsendurchmesser und die WEZ eingestellt werden.

Bei der abschließenden versuchstechnischen Validierung des Schweißpunktmodells an einem Vorderwagen zeigten sich die Vorteile der neuen Abbildung. Dabei wurde mit Hilfe der thermoelastischen Spannungsanalyse die Verteilung der Spannungen im Bereich von mehreren Schweißpunkten ermittelt (Abbildung 2.14).

Parallel wurden Simulationen unter denselben Rahmenbedingungen mit den derzeit zum Einsatz kommenden Schweißpunktmodellen durchgeführt, um die Unterschiede bei der Festigkeitssimulation aufzuzeigen. Es zeigte sich dabei sehr deutlich, daß einzig mit der neuen „Gössing“-Schweißpunktmodellen zuverlässige Spannungsaussagen im Bereich von Schweißpunkten möglich sind.

Die Unterschiede bei der lokalen Lastabtragung können sich auch auf entferntere Bereiche auswirken. Dies

zeigte sich beim Vergleich der Abbildungen 2.12 und 2.13.

Analyseprozeß und Verfahren zur Ergebnisauswertung

Ziel des CAE-Prozesses Betriebslastauslegung ist es, die gesamte Karosseriestruktur für alle während des Betriebes auftretenden Lastereignisse zu qualifizieren. Dazu müssen alle Bauteile und Verbindungen der Karosserie sowohl für statische Sonder- und Mißbrauchslasten als auch für zyklische Betriebsfestigkeitslasten mit Hilfe von CAE-Berechnungen abgesichert werden.

Um dies zu erreichen, müssen mehrere grundsätzlich unterschiedliche Auslegungsinhalte berücksichtigt werden. Diese Bandbreite von Funktionsumfängen kann nicht allein durch eine einzelne Simulationsanwendung bzw. CAE-Berechnungsmethode abgedeckt werden. Die Versagensmechanismen sind zudem für die unterschiedlichen Belastungen zu verschieden.

Die Berechnungsabteilungen benötigen deshalb für das gesamte Beanspruchungsfeld der Betriebslastauslegung zuverlässige Simulationsmethoden und Auswertungsverfahren, um das volle Beanspruchungsspektrum abzudecken.

Von der Theorie her haben die meisten der hierfür erforderlichen Simulationsmethoden eine relativ hohe Aussagekraft erreicht [3.6]. Es existieren sowohl für die elastoplastische Festigkeitssimulation als auch für die Lebensdauerbewertung eine Vielzahl von Simulationanwendungen und Berechnungsmethoden. Diese Methoden müssen jedoch für den produktiven Einsatz in Fahrzeugprojekten modifiziert und untereinander vernetzt werden.

In [2.1] wurde bereits exemplarisch gezeigt, daß mit Hilfe der derzeit verfügbaren Methoden und Simulations-Software qualitative Betriebsfestigkeitsausagen möglich sind. In diesem Zusammenhang wird unter dem Begriff qualitativ verstanden, daß die Simulation den Schadensort zuverlässig vorher sagt. Die quantitative Bestimmung der Lebensdauer ist mit den bestehenden Methoden jedoch noch nicht möglich.

Der in [2.1] benötigte Aufwand war jedoch noch sehr groß, da noch kein definierter Auslegungsprozeß vorhanden war. Außerdem waren quantitative Ausagen nicht möglich, da der Fertigungsprozeß bei der CAE-Berechnung nicht

berücksichtigt wurde. Die im Rahmen von [3.1] durchgeführten Untersuchungen zeigten, welche weiteren Rahmenbedingungen für den produktiven Einsatz der Betriebslastauslegung berücksichtigt werden müssen.

Ein weiteres Hindernis für den flächendeckenden Einsatz der Betriebslastauslegung war bisher die fehlende Integration in die bestehenden Simulationsabläufe der Crash- und NVH-Auslegung. Ohne die durchgängige Einbindung der Berechnungsanwendungen in das bestehende CA-Umfeld können neue Berechnungswerkzeuge nicht wirksam im CA-Prozeß zum Einsatz kommen.

In dieser Arbeit war daher nicht die Entwicklung von Einzelanwendungen und Berechnungsmethoden die Hauptaufgabe, sondern:

- der Aufbau eines stimmigen, in sich geschlossenen Auslegungsprozesses für die Betriebslastauslegung
- die Vernetzung mit Nachbarprozessen
- Auswahl der am besten geeigneten Simulationsanwendungen
- Abstimmung und Vernetzung aller Komponenten über Schnittstellenanwendungen.

3.1 Auslegungsprozeß Betriebslasten

Der eigentliche Auslegungsprozeß für Betriebslasten beginnt erst nach der Erstellung des Simulationsmodells. Während des Prozesses der Karosserieentwicklung müssen bestimmte feste Konstruktionsstände zu vorgegebenen

Zeitpunkten bewertet und anhand von Variantenuntersuchungen optimiert werden.

Die einzelnen Berechnungsschleifen laufen dabei weitgehend identisch ab. Einzig der Umfang der Auslegungsinhalte wird entsprechend der jeweiligen konstruktiven Reife des Produktes variiert. Der hier vorgestellte Auslegungsprozeß wurde deshalb unter den zeitlichen Rahmenbedingungen einer Simulationschleife entwickelt und ausgestaltet. Dabei wurde eine CAE-Auslegungsschleife gegen Ende der Fahrzeugentwicklung zu Grunde gelegt, bei der das gesamte Funktionsspektrum abgesichert werden muß.

Die grundsätzliche Vorgehensweise orientiert sich bei der Betriebslastauslegung von grob nach fein. Dazu wird in einem ersten Simulationsschritt die Gesamtstruktur auf Basis von Lastpfaduntersuchungen für statische Lastereignisse bewertet. Diese Untersuchungen ermöglichen mit relativ geringem Aufwand eine erste grobe Bewertung des Strukturkonzepts.

Die Schwachstellen, die bei dieser Gesamtstrukturbewertung aufgezeigt werden, müssen dann in folgenden Simulationen mit feinerer Auflösung und besserer Aussagekraft ein zweites Mal bewertet werden. Mit dieser Vorgehensweise kann die Anzahl der aufwendigen nichtlinearen Berechnungen auf einzelne kritische Strukturbereiche beschränkt werden.

3.1.1 Rahmenbedingungen für den Simulationsprozeß Betriebslasten

Bei der Entwicklung des CAE-Prozesses Betriebslastauslegung standen

zwei wesentliche methodische Erweiterungen im Vordergrund. Der Gesamtprozeß wird hierdurch erst produktiv umsetzbar.

Zum einen mußte eine geeignete Methode gefunden werden, mit der Teilmodelle für Lokaluntersuchungen mit möglichst geringem Aufwand erstellt werden können. Die Teilstrukturen müssen dabei trotz der möglichst geringen Größe dennoch aussagekräftige Ergebnisse ermöglichen. Hierfür mußte eine neue leistungsfähige Methode zur Erstellung und Simulation von Teilstrukturen entwickelt werden unter Berücksichtigung der Randbedingungen des Gesamtfahrzeugs. (Abb. 3.1)

Zum anderen mußten die Simulationsmethoden und Auswerteverfahren für Teilstrukturen so weit verbessert werden, daß alle Anforderungen der Betriebslastauslegung abgedeckt werden. In diesem Zusammenhang sind zwei Problemfelder von besonderem Interesse.

Für Bereiche, bei denen infolge dynamischer Belastungen Resonanzeffekte auftreten, besteht derzeit noch keine Auslegungsmethode. Dies hängt damit zusammen, daß fast alle Simulationsmethoden der Betriebsfestigkeitsauslegung mit Hilfe der statischen Superposition durchgeführt werden. Bei der Lebensdauerberechnung gehen alle

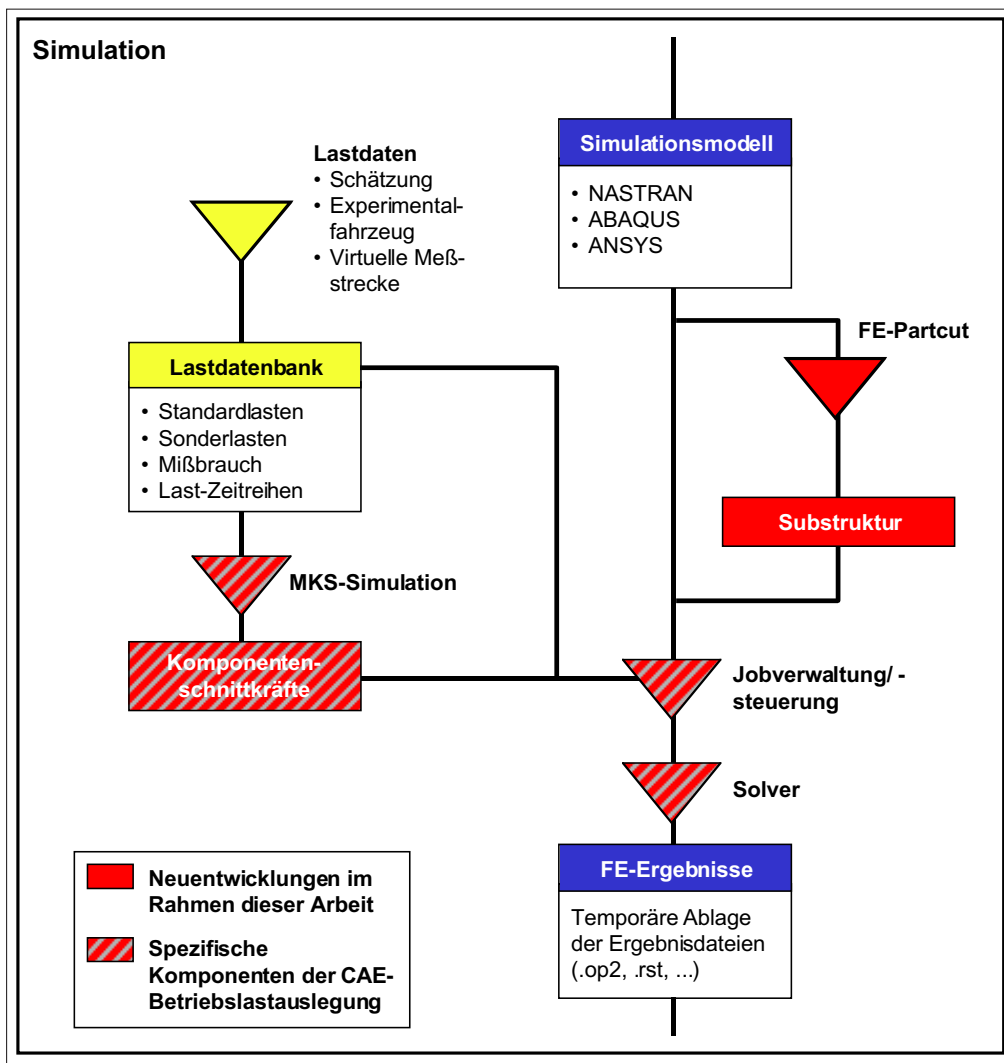


Abb. 3.1

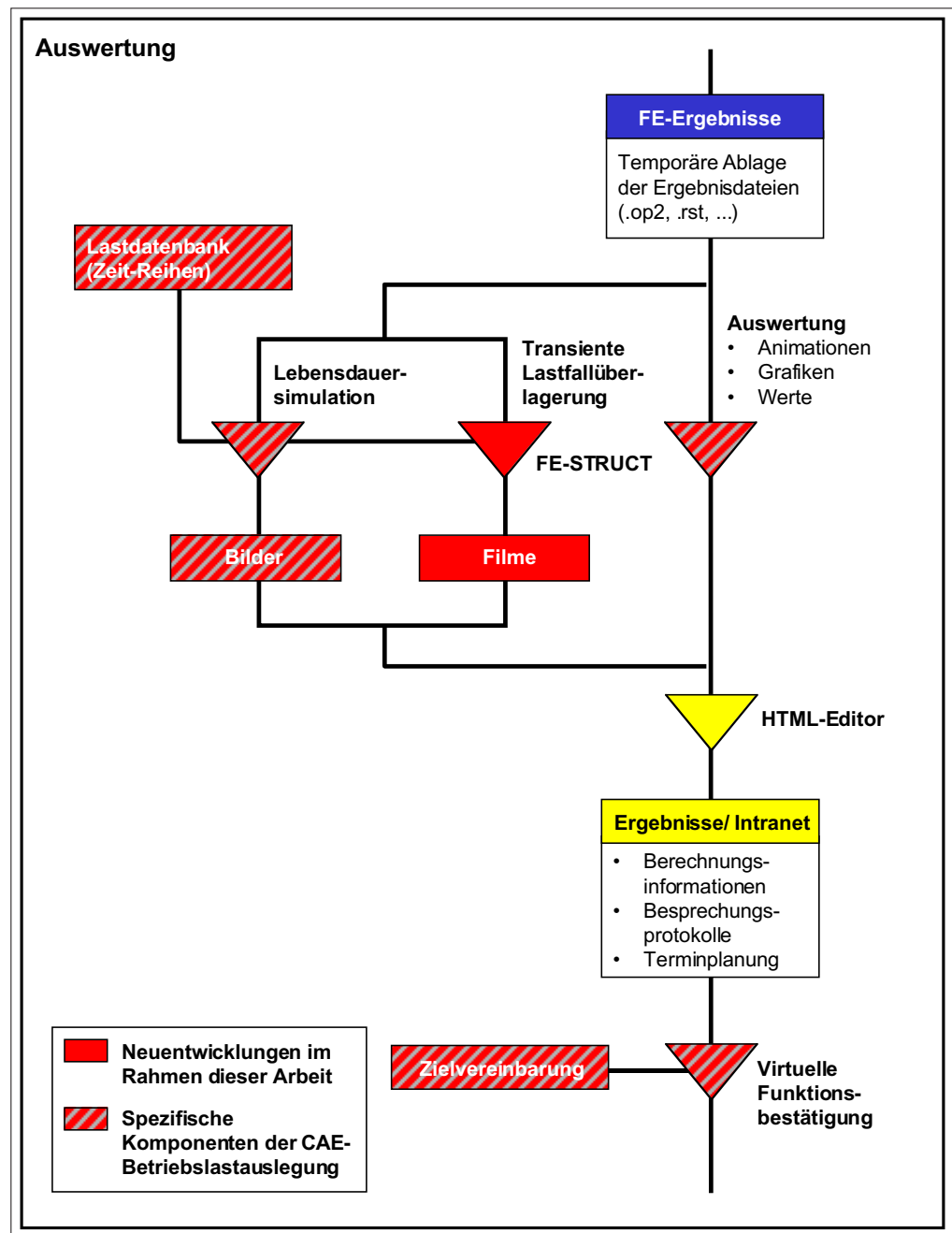
Analyseprozeß der CAE-Betriebslastauslegung

dynamischen Effekte verloren. In den folgenden Abschnitten wird daher der Einfluß der dabei entstehenden dynamischen Überhöhung berechnet und eine Standardvorgehensweise zur Lösung dynamischer Lebensdauerprobleme vorgestellt.

Eine weitere Schwierigkeit ergibt sich aus Problemstellungen, bei denen während der Belastung Umlagerungen

der Lastpfade auftreten. Dies ist dann der Fall, wenn sich das Strukturverhalten abhängig vom Lastniveau oder der zeitlichen Aufeinanderfolge von Lastspitzen verändert. Hier wurde bereits eine Vorgehensweise in [2.1] vorgestellt, die bei der Entwicklung der Methodik zum Aufbau von Teilstrukturen berücksichtigt werden muß.

Abb. 3.2
Auswertung (Post-processing) bei der CAE-Betriebslastauslegung



In Abbildung 3.2 ist der grundsätzliche Prozeß der Auswertung (Post-Processing) dargestellt. Es werden der Datenfluß der verschiedenen Simulationsobjekte und die wichtigsten Eingangsgrößen gezeigt. Die gegenüber dem NVH-Prozeß veränderten oder neuen Komponenten wurden ebenfalls gekennzeichnet.

3.1.2 Abgleich von Simulationsmethoden und -modellen mit dem praktischen Versuch

Der Versuch ist noch immer die effektivste Methode zur Validierung von neuen CAE-Methoden. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit ein umfangreiches Versuchsprogramm parallel zu den hier vorgestellten Methodenentwicklungsaktivitäten durchgeführt. Die im Rahmen dieser Arbeit neu entwickelten Methoden wurden anhand dieser Versuche umfassend abgesichert.

Mehrere Versuchsreihen wurden auf Basis eines halben Vorderwagens durchgeführt. Dazu wurden insgesamt zehn Vorbaukomponenten im Musterbau aufgebaut und mit Platten zur Einspannung auf dem Prüfstand versehen. Der Versuchsaufbau umfaßte außerdem den Vorderachsträger und Teile der Vorderachse.

Der Aufbau wurde starr mit dem Prüfstand verspannt, wobei an den freien Anschraubpunkten des Vorderachsträgers (alle Anschraubpunkte links und der hintere Verschraubungspunkt rechts) elastische Lagerungen aufgebracht wurden, um keine Verfälschungen der Versuchsergebnisse durch eine zu steife Anbindung hervorzurufen.

Die dabei gewählten Einspannbedingungen an den Vorderachsträgerver-

schraubungen wurden mit Hilfe einer FE-Simulationen so angepaßt, daß die Deformationen in den Bereichen der Einspannung annähernd vergleichbar mit denen im Gesamtfahrzeug sind. Die elastischen Einspannungen wurden dazu beim Versuch im Bereich der Verschraubungen der Karosserie durch Federbleche abgebildet, die wie Blattfedern wirken.

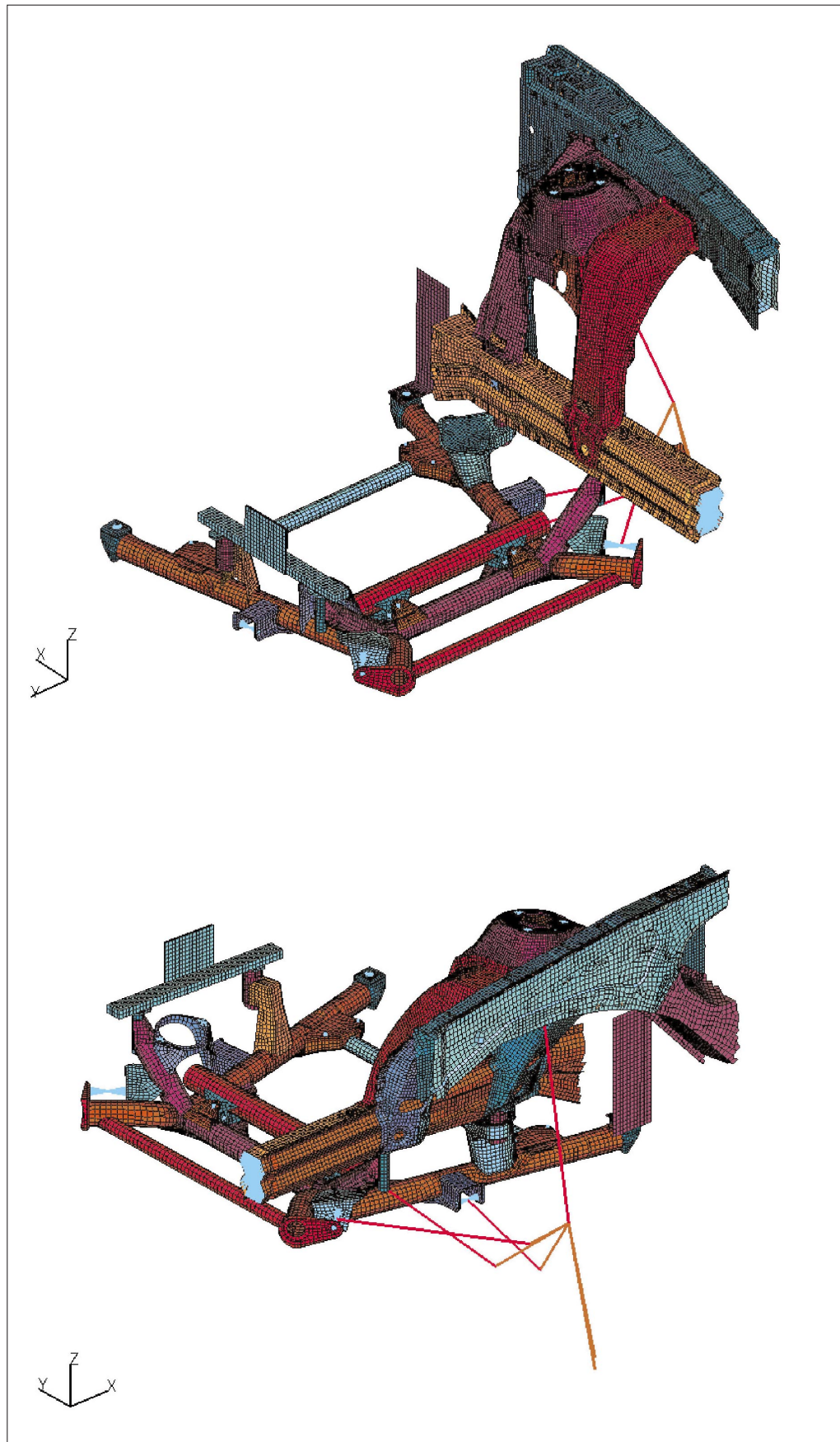
Auf Basis dieses Prüfstandsbaus wurden drei Dauerläuferproben durchgeführt. Dabei wurden über hydraulische Zylinder Radkräfte, die bei einer Fahrerproben gemessen wurden, in drei Richtungen auf den Radträger aufgebracht. Die Krafteinleitung erfolgte über drei Hydraulikzylinder, die im Radträger eine Belastung in vertikaler, horizontaler und Längsrichtung einleiteten.

Parallel zu dem Versuchsaufbau wurde ein Simulationsmodell aufgebaut, das detailliert mit dem Versuchsaufbau abgestimmt wurde. Dazu mußte die Lage aller Schweißpunkte im Modell an den Versuch angepaßt werden. Zusätzlich wurden die Versuchseinspannungen und die Krafteinleitung über die starr gesetzte Vorderachse im Simulationsmodell abgebildet.

Vor der Dauerläuferproben wurden zusätzlich mehrere Untersuchungen zur Validierung des Simulationsmodells durchgeführt. Dazu wurde unter anderem an mehreren Stellen mittels der thermographischen Spannungsanalyse die Beanspruchung in der Struktur und an einzelnen Schweißpunkten versuchsstechnisch bestimmt. Außerdem wurden Dehnungsmessungen an mehreren Stellen des Aufbaus durchgeführt, um die Spannungen lokal mit denen im Simulationsmodell abzugleichen. Durch diese Maßnahmen konnte eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse des

Abb. 3.3

Abbildung des Simulationsmodells des Versuchsumfangs (Vorderwagenkomponente)



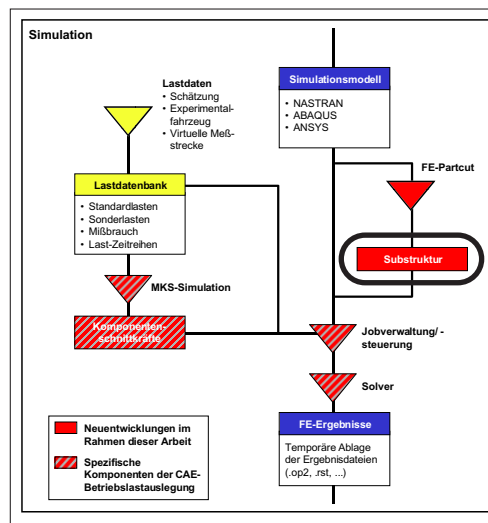
Versuchs und des Simulationsmodells erzielt werden. Abbildung 3.3 zeigt das Simulationsmodell des Prüfstands-aufbaus.

Auf Basis des überarbeiteten Simulationsmodells wurde dann eine Lebensdauersimulation durchgeführt. Dabei wurde die gleiche Belastung wie auf dem Prüfstand zugrunde gelegt. Bei dem Vergleich der Ergebnisse zeigte sich eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Versuch bei den identifizierten Schadensorten. Problematisch war jedoch die relativ große Streuung der Versuchsergebnisse, verbunden mit der geringen Anzahl der Versuche. Damit konnte ein quantitativer Abgleich (Lebensdauer bis zum Anriß) nicht erfolgen.

Da die Weiterentwicklung der Methoden für die Lebensdauersimulation nicht Gegenstand dieser Arbeit ist, sondern vielmehr die Entwicklung eines Gesamtprozesses unter Berücksichtigung des Fertigungsprozesses im Vordergrund steht, wurden an dieser Stelle keine weiterführenden Untersuchungen zur Verbesserung der Methoden der Lebensdauersimulation durchgeführt.

3.2 Simulation von Teilstrukturen unter Gesamtfahrzeugrahmenbedingungen

Die Karosseriestruktur besteht aus einem äußerst komplexen System verschiedener Bauteile und Bauteilverbindungen. Die Auslegung der Karosserie als Gesamtsystem läuft daher als Optimierung vieler Einzelkomponenten in einem Systemverbund ab.



Dabei treten Schwachstellen sowohl an relativ lokalen Stellen als auch in der Gesamtstruktur auf. Häufig wird das Strukturverhalten in relativ kleinen Bereichen stark durch die Rahmenbedingungen der Gesamtstruktur beeinflusst. Für die CAE-Auslegung werden daher häufig Simulationsmodelle des Gesamtfahrzeugs eingesetzt. Modelle, welche die Struktur mit ihrer vollen Komplexität abbilden, nehmen jedoch mittlerweile Größen an, die mit derzeitigen Rechnern nur noch sehr schwer zu bearbeiten wären.

Seit dem ersten Einsatz der FE-Simulation im Automobilumfeld gibt es deshalb Bestrebungen, die Größe der Berechnungsmodelle durch die Bildung von Teilstrukturen zu reduzieren. Dies ist vor dem Hintergrund der komplexen physikalischen Zusammenhänge in lokalen Kräfteinleitungsbereichen der Struktur sogar unerlässlich.

Das hängt damit zusammen, daß in bestimmten Bereichen der Karosseriestruktur aufgrund der Betriebsbeanspruchungen im Umfeld von örtlich begrenzten Kräftein- bzw. Überleitungen nichtlineare Effekte auftreten. Diese zum Teil sehr komplizierten Beanspruchungszustände lassen sich nur mit Hilfe von

rechenintensiven nichtlinearen Simulationen lösen. Dabei ist neben dem Wechsel der Berechnungssoftware auch eine veränderte Abbildung im FE-Modell während des Simulationsprozesses erforderlich. Dies hängt damit zusammen, daß der numerische Aufwand bei nichtlinearen Problemen erheblich anwächst. Des weiteren muß für nichtlineare Untersuchungen die Elementierung in Bereichen mit großen Spannungsgradienten verfeinert werden, um den exakten Spannungsverlauf im Modell besser annähern zu können. Die Rechenzeiten wären bei Verwendung der gesamten Struktur unter diesen Rahmenbedingungen nicht mehr zu handhaben. Ohne den Einsatz von Teilstrukturen können daher nichtlineare Strukturanalysen für die Karosserie heute nicht durchgeführt werden.

Wichtig bei der Verwendung von Teilstrukturen ist außerdem, daß die Randbedingungen des Gesamtfahrzeugs berücksichtigt werden. Das bedeutet, daß trotz der fehlenden Abbildung der Reststruktur bei der Simulation der Teilstruktur dennoch der Einfluß des Gesamtfahrzeugs erfaßt werden muß. Dazu müssen die Teilmodelle zwischen verschiedenen Berechnungsprogrammen austauschbar sein und die strukturellen Randbedingungen des Gesamtfahrzeugs bei der Bewertung der Teilmodelle berücksichtigt werden, um Einflüsse, die durch zu steife Lagerungsbedingungen entstehen, zu vermeiden. Dies war bisher jedoch nicht möglich, da Komponentenmodelle starr eingespannt wurden.

Für die Betriebslastauslegung wird daher ein Verfahren benötigt, um Teilstrukturen unter Gesamtfahrzeugrahmenbedingungen aufzubauen; das Verfahren muß zudem äußerst flexibel in

Kombination mit verschiedenen Simulationsanwendungen (MSC/NASTRAN, ABAQUS, ANSYS) einsetzbar sein.

In den derzeit verwendeten FE-Programmen werden die Verfahren der Submodell- und Superelementtechnik angeboten, um die Anzahl der Freiheitsgrade im FE-Modell zu reduzieren. Diese Verfahren haben allerdings gewisse Grenzen, die eine Verwendung bei der Betriebslastauslegung nur eingeschränkt zulassen.

3.2.1 Die Submodelltechnik

Die Erstellung einer Teilstruktur mit der Submodelltechnik läuft in zwei Schritten ab. Im ersten Schritt wird die Gesamtstruktur für den relevanten Lastfall linear bewertet. Dabei wird das Deformationsverhalten der Gesamtstruktur berechnet.

Die Idee der Submodelltechnik besteht dann darin, daß das Deformationsverhalten in weiten Teilen der Struktur nicht von lokalen nichtlinearen Effekten abhängt. Bei der Submodelltechnik werden daher Bereiche eliminiert, deren Strukturverhalten nicht durch nichtlineare Effekte beeinflusst werden.

Bei der anschließenden nichtlinearen Simulation werden deshalb die Bereiche, die aufgrund der Belastung ein nichtlineares Verhalten aufweisen, aus dem Gesamtmodell herausgelöst. Aufgrund der erheblich geringeren Problemgröße lassen sich dann im Teilmodell nichtlineare Effekte berücksichtigen.

An den Randknoten der Lokalmodelle werden bei der nichtlinearen Berechnung die Verformungen aufgebracht, die an den entsprechenden Positionen in dem Gesamtmodell bewertet

wurden. Unter diesen Randbedingungen wird dann das Lokalmmodell berechnet.

Der wesentliche Vorteil der Submodelltechnik gegenüber anderen Verfahren besteht darin, daß zu Beginn der Berechnung noch nicht bekannt sein muß, welcher Ausschnitt für das Lokalmmodell ausgewählt wird. Es reicht damit aus, die Ergebnisse der Untersuchungen an der Gesamtstruktur zu bewerten und erst dann zu entscheiden, welche Teilbereiche gesondert untersucht werden müssen und wie groß die Lokalmmodelle für diese Untersuchungen gewählt werden müssen.

Die Submodelltechnik kann geschachtelt werden, so daß zunächst ein grobes Modell, dann ein Ausschnitt davon als Detailmodell, dann ein Ausschnitt von diesem als neues Detailmodell, usw. berechnet werden kann.

Hier muß jedoch betont werden, daß die Submodelltechnik eine Näherungslösung für den Detailbereich darstellt. Es hängt von dem Abstand des Schnittrandes des Detailmodells zum genau zu untersuchenden Ort ab, wie genau die Ergebnisse sind und wie weit das Detailmodell die Realität abbildet.

Der Hauptgrund, der den Einsatz dieser Methode im Auslegungsprozeß Betriebslasten verhindert, ist, daß dieses Verfahren in den einzelnen Anwendungen integriert ist und ein Wechsel des Programmsystems damit nicht möglich ist.

Ein weiterer großer Nachteil der Submodelltechnik ist, daß für jeden unterschiedlichen Lastfall eine neue Substruktur aufgebaut werden muß, da die Randverschiebung nur für einen Lastfall gültig ist. Damit wäre bei der großen Zahl der bei der Betriebslastauslegung zu untersuchenden Lastfälle ein

enormer zusätzlicher Aufwand für den Submodellaufbau nötig.

3.2.2 Die Superelementtechnik

Bei der Superelementtechnik wird eine andere Vorgehensweise zur Reduzierung der FE-Modellgröße eingesetzt. Während bei der Submodelltechnik die Steifigkeit der Gesamtstruktur durch statische Verschiebungs-Randbedingungen abgebildet wird, werden bei der Superelementtechnik die Randbedingungen der Gesamtstruktur durch ein vereinfachtes Ersatzelement (Superelement) abgebildet.

Ein Superelement stellt eine Art übergeordnetes Element dar. Es wird durch die Randknoten des Lokalsystems definiert und bildet die Systemsteifigkeit der Gesamtstruktur in diesen Knoten ab, ohne daß alle Freiheitsgrade im Superelement berücksichtigt werden müssen. Dazu wird die Steifigkeit des Strukturbereichs des Superelements in einer getrennten Berechnung auf die Randknoten des Superelements reduziert. Dieses reduzierte System wird durch ein neues Element, dem Superelement abgebildet. Der erste Schritt der Superelementtechnik wird als Generier-Schritt bezeichnet.

Für die Superelementtechnik ist es typisch, daß bereits vor der Berechnung des Gesamtmodells der Substrukturbereich festgelegt wird und die Aufteilung der Analysebereiche zu Beginn der Modellierung konzipiert werden muß. Die Superelementtechnik ist bei der statischen strukturmechanischen Anwendung exakt, also keine Näherungslösung.

Ein weiterer Vorteil der Superelementtechnik ist die flexible Verwendbar-

keit bei unterschiedlichen Lastfällen. Insbesondere bei großen, auch nichtlinearen Modellen mit Komponenten, die nahezu lineares Verhalten zeigen oder mehrfach vorhanden sind, bietet dieses Verfahren große Vorteile.

Auch bei der Superelementtechnik ist die ungünstige Kompatibilität zu anderen Berechnungsprogrammen ein großes Hindernis für den Einsatz bei der Betriebslastauslegung. Ein Superelement kann nur mit großem Aufwand in ein anderes Berechnungsprogramm exportiert werden.

In Fällen, bei denen sehr viele Freiheitsgrade des Superelements verbleiben, ist die Erzeugung des Superelementes sehr aufwendig. Außerdem wird die Bandbreite der Steifigkeitsmatrix stark vergrößert, was die Lösung des Gleichungssystems erschwert. Die Rechenzeit hängt daher erheblich von der Beschaffenheit des Superelements ab.

3.2.3 „Dynamisches Submodellverfahren“

In dieser Arbeit wird versucht, die Vorteile der beiden in den Abschnitten 3.2.1 und 3.2.2 beschriebenen Verfahren zu kombinieren, um eine neue Methode für die Auslegung lokaler Strukturbereiche unter Berücksichtigung der Randbedingungen des Gesamtfahrzeugs zu entwickeln.

Der Ansatz, der bei der Submodelltechnik verwendet wird, bietet die günstigeren Voraussetzungen für den Einsatz bei der Betriebslastauslegung. Es werden hier keine zusätzlichen Elementtypen benötigt, die nicht direkt in allen derzeit verwendeten Software-Systemen verfügbar sind.

Der Austausch eines Superelements zwischen unterschiedlichen Berechnungsprogrammen stellt ein Problem dar, da die Formulierung eines Superelements in den unterschiedlichen FE-Programmen verschieden ist. Der Austausch von Teilmodellen, die mit der Submodelltechnik erzeugt wurden, ist dagegen mit geringem Aufwand möglich, da nur das FE-Modell der Teilstruktur umgewandelt werden muß.

Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Prozeß zum Aufbau von Teilmodellen setzt dazu zunächst auf einem Gesamtfahrzeugmodell auf. Dieses Modell wird mit MSC/NASTRAN verarbeitet. Zur Vorbereitung des Submodells werden wie bei der ursprünglichen Submodelltechnik zunächst an der Gesamtstruktur lineare Berechnungen durchgeführt, um das Steifigkeitsverhalten (Deformationsverhalten) und damit auch die Randverschiebungen des Teilmodells zu bestimmen.

Nach diesem Verfahrensschritt wurde das herkömmliche Verfahren der Submodelltechnik modifiziert, um einen wesentlichen Nachteil dieser Methode zu umgehen. Für das Submodellverfahren muß für jeden Lastfall ein getrenntes Submodell erzeugt werden. Das bedeutet, daß für einen neuen Lastfall trotz unveränderter Teilstruktur zunächst eine Berechnung der Gesamtstruktur durchgeführt werden muß, um die neuen Randsteifigkeiten der Teilstrukturen zu ermitteln. Bei der Vielzahl der zu bewertenden Lastfälle würde dies einen erheblichen Zusatzaufwand bedeuten. Um diesen zu umgehen, wird nach einer Methode gesucht, mit der die Randsteifigkeiten in einem Simulationsschritt für beliebige Lastfälle bestimmt werden können. Das Submodell könnte damit

flexibel für alle Lastkombinationen eingesetzt werden.

Bei der Lösung dieses Problems dient die Vorgehensweise bei der mehrachsigen Betriebsfestigkeitssimulation als Vorbild, da hier ein ähnliches Problem gelöst werden muß. Für eine große Zahl von Lastschritten mehrerer Last-Zeitreihen muß die Spannungsverteilung ermittelt werden. [3.8] Eine direkte Berechnung jedes Lastschritts würde dabei an die Grenzen der derzeitigen Hardware stoßen, da die Ausgabedateien für Tausende von Lastfällen wegen ihrer Größe auf keinem Datenträger gespeichert werden könnten. Daher wird hier das Verfahren der linearen statischen Superposition von Einheitslastfällen eingesetzt. Dabei wird für jede Lastkomponente ein Einheitslastfall berechnet. Bei der anschließenden Lebensdauersimulation werden diese Lastfälle für jeden Zeitschritt der Last-Zeitreihe mit den entsprechenden Skalierungsfaktoren linear kombiniert. [3.9] Der Simulationsaufwand für eine Betriebsfestigkeitssimulation kann auf diese Weise erheblich reduziert werden.

Die Grundidee der statischen Superposition wurde für das „dynamische Submodellverfahren“ aufgegriffen. Durch die Linearkombination von Einheitslastfällen aller Lastkomponenten können alle Kombinationen von Lastfällen abgebildet werden. Bei der „dynamischen Submodelltechnik“ werden im Gegensatz zur Lebensdauersimulation nicht die Spannungszustände, sondern die Verschiebungszustände überlagert. Diese nachträgliche Umrechnung der Randverschiebungen kann mit sehr geringem Aufwand durchgeführt werden, da keine weitere FE-Berechnung der Gesamtstruktur nötig ist.

3.2.4 Vorgaben für die Verwendung des dynamischen Submodellverfahrens

Das Verfahren der linearen Superposition hat eine Einschränkung, die bei Vorhandensein von Nichtlinearitäten in der Struktur beachtet werden muß, um trotzdem sinnvolle Ergebnisse mit diesem Verfahren zu erzeugen.

Nichtlinearitäten werden bei der linearen Superposition nicht berücksichtigt, da die Linearkombinationen immer nur aus einem Lastfall extrapoliert werden. Die Einheitslastfälle bilden jedoch nur einen Zustand ab, der für ein bestimmtes Lastniveau gültig ist. Verhält sich die Struktur nichtlinear, kann auf Basis dieses Zustands nicht auf das Strukturverhalten bei einer höheren bzw. niedrigeren Last geschlossen werden.

Daher muß bei der Wahl des Strukturbereiches für das Teilmodell darauf geachtet werden, daß alle eventuell vorhandenen Nichtlinearitäten innerhalb des Teilmodells enthalten sind. Sind Nichtlinearitäten außerhalb des Teilmodells in der Struktur vorhanden, muß sichergestellt sein, daß sie keinen Einfluß auf die Ergebnisse der Teilstruktur haben.

Außerdem sollte das Teilmodell so gewählt werden, daß zwischen dem Bereich, in dem sich das Teilmodell nichtlinear verhält, und dem Rand des Teilmodells ein Abstand vorhanden ist. Dadurch kann verhindert werden, daß die Einspannung des Teilmodells einen Einfluß auf die Simulationsergebnisse des Teilmodells hat.

Bei der Lagerung des Teilmodells könnten theoretisch sowohl Verschiebungen als auch Knotenkräfte eingesetzt werden. Für dieses Verfahren wurde allerdings eine Lagerung mit Verschie-

Abb. 3.4
Gesamtstruktur

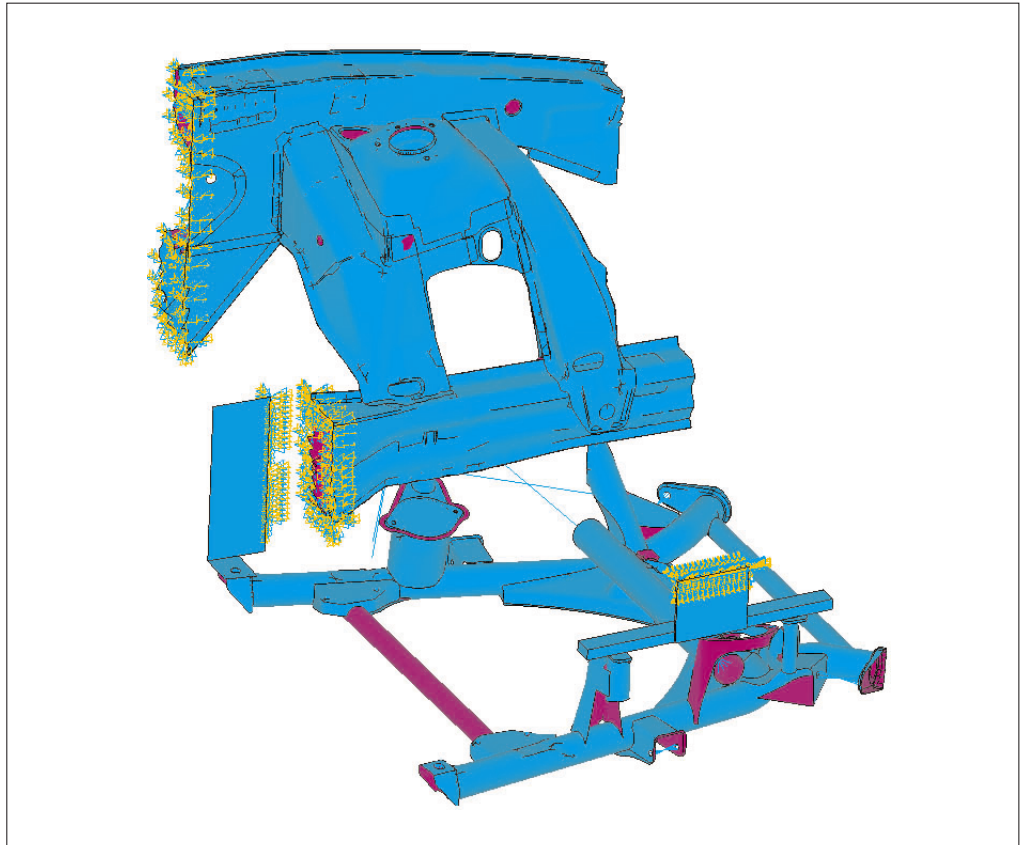
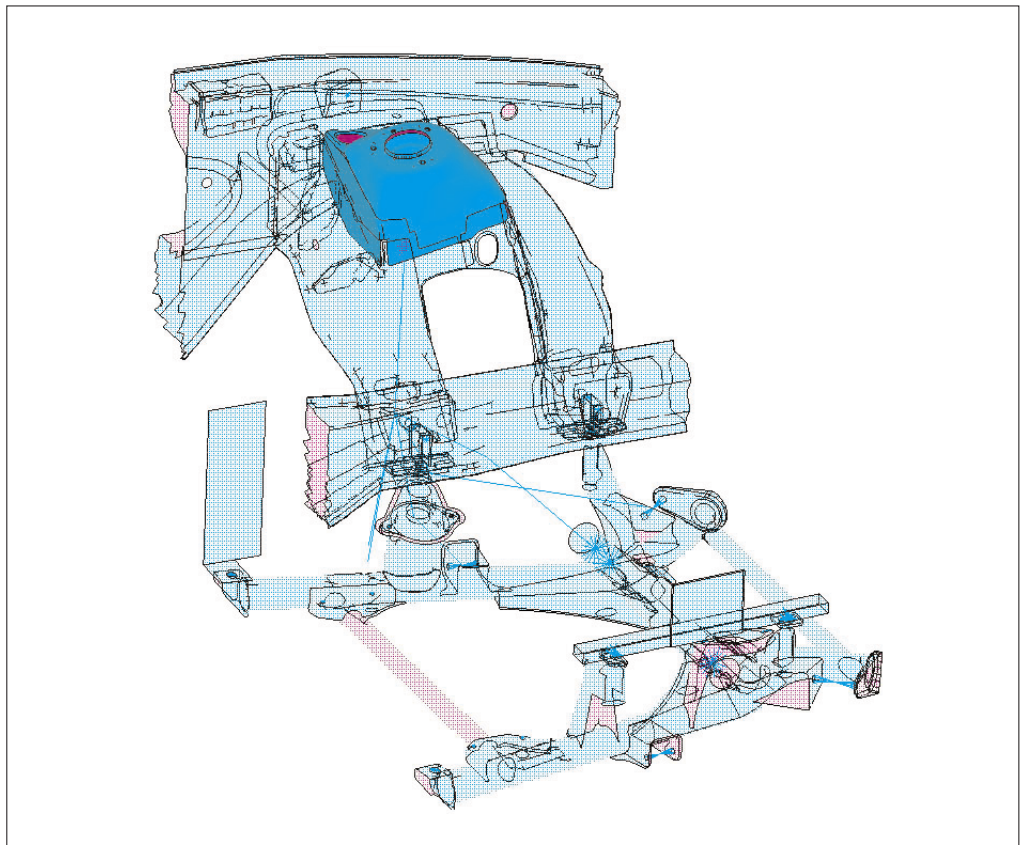


Abb. 3.5
Ausschnittbereich dargestellt in der Gesamtstruktur



bingrandbedingungen gewählt, da bei der Lagerung über Schnittkräfte Probleme bei nichtlinearen Simulationen auftreten können, da hier häufig mit großen Verformungen [3.1] gerechnet wird (Theorie 2. Ordnung). Dies bedeutet, daß sich das Kräftegleichgewicht im System während der Belastung verändern kann, da sich die Kraftangriffspunkte und –wirkrichtungen gegeneinander verschieben. Das System wäre bei reiner Lagerung über Schnittkräfte dann nicht mehr im Gleichgewicht und damit instabil. Eine Lagerung über Verschiebungsrandbedingungen ist daher für diesen Aufgabenbereich besser geeignet.

Des weiteren ist zu beachten, daß nachträgliche Änderungen in der Teilstruktur das Systemverhalten nicht zu stark beeinflussen dürfen, da die Rückkoppelung zur Gesamtstruktur fehlt.

Daher sollte bei größeren Veränderungen an der Teilstruktur ein neues Submodell aufgebaut werden.

Ein interessanter Vorteil der neuen Submodelltechnik gegenüber Superelementen ist, daß der Kraftangriffspunkt nicht notwendig im Teilmodell liegen muß. Dadurch, daß die Verschiebungsrandbedingungen der Submodelltechnik eine Belastung im Teilmodell hervorrufen, ist jeder beliebige Teil der Gesamtstruktur für die Teilmodellbildung geeignet. So können zum Beispiel Strukturknoten in einem Teilmodell ausgelegt werden, ohne daß ein Lastenangriffspunkt im Teilmodell vorhanden sein muß. Mit dem „dynamischen Submodellverfahren“ kann daher jeder Strukturbereich unabhängig bewertet werden. Das Verfahren ist dadurch äußerst flexibel einsetzbar.

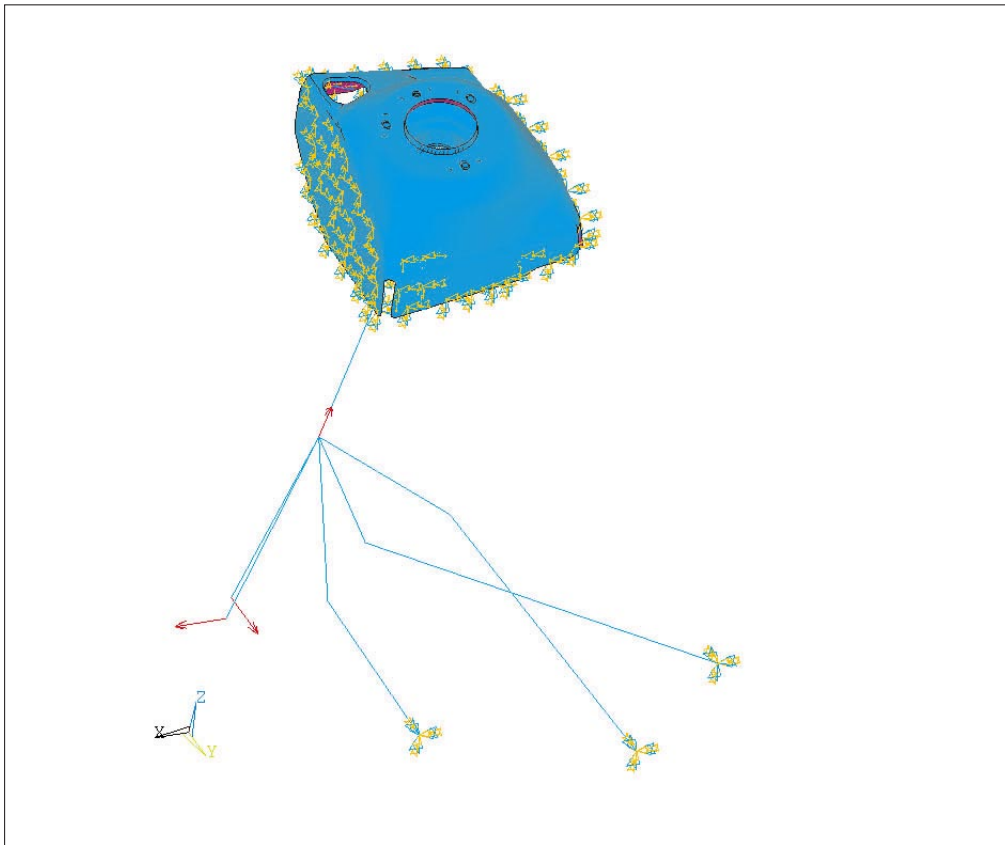


Abb. 3.6

Komponentenmodell

Abb. 3.7

Spannungsverteilung in der Gesamtstruktur

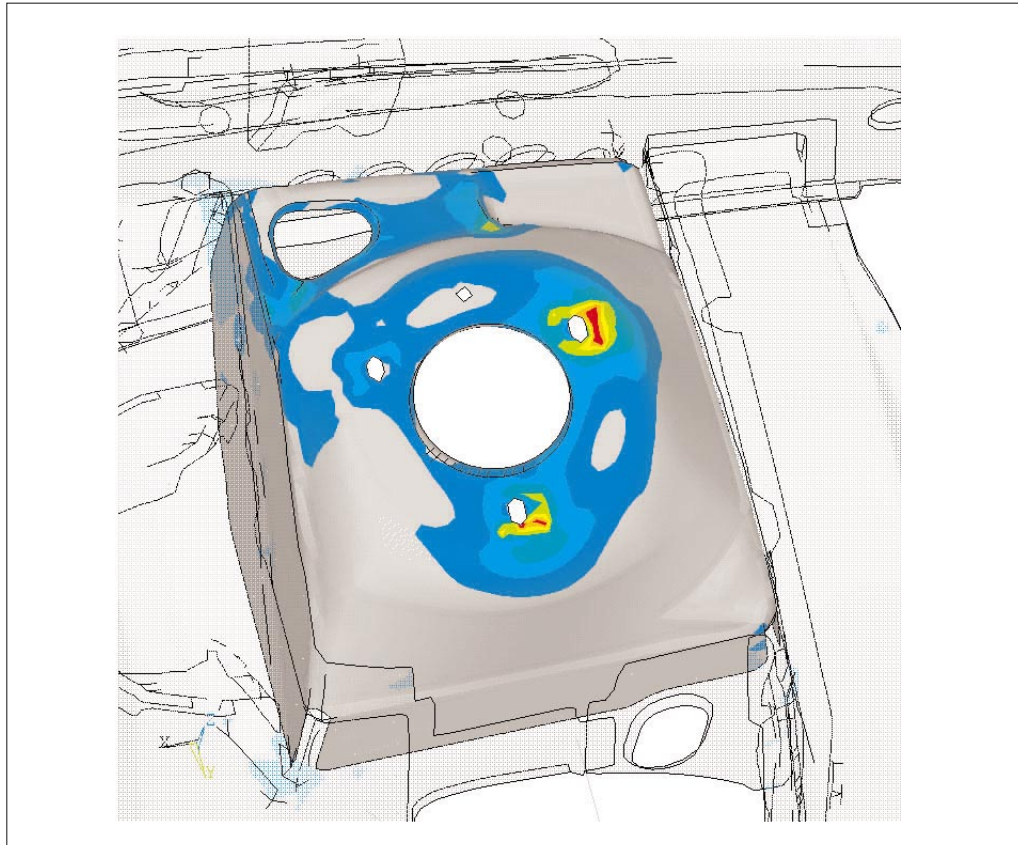
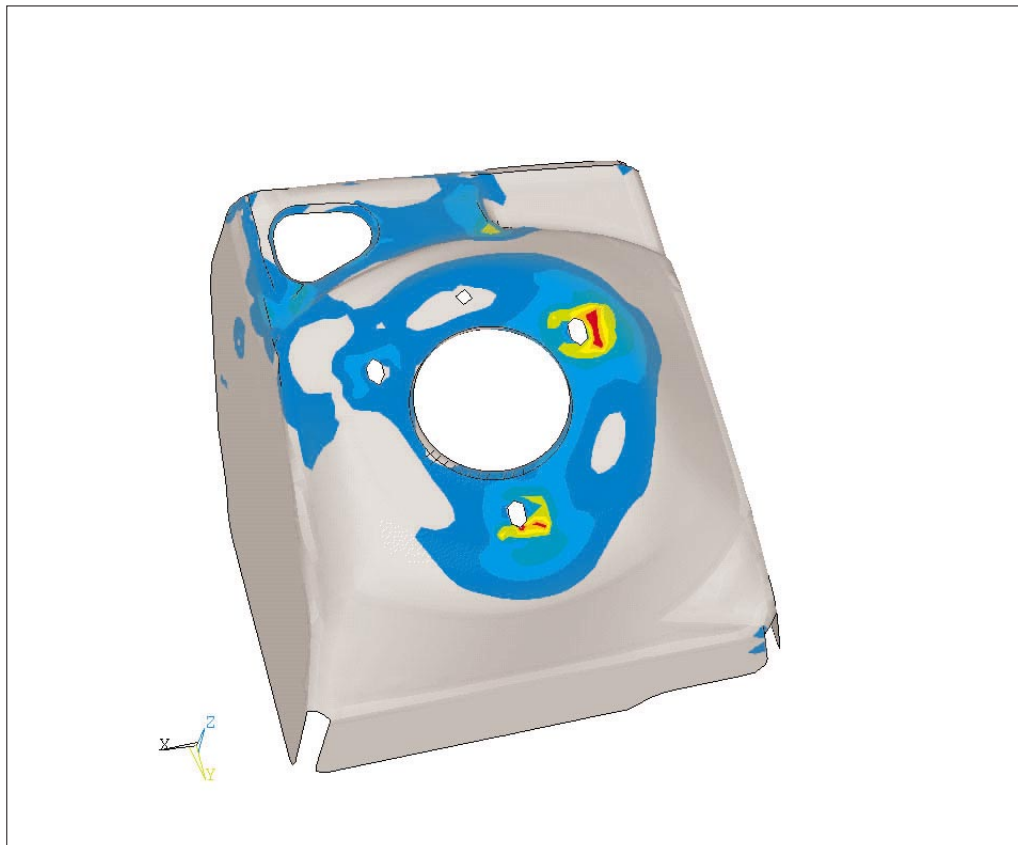


Abb. 3.8

Spannungsverteilung in der Teilstruktur („dynamisches Submodellverfahren“)



3.2.5 Umsetzung in ANSYS

Das Simulationsmodell des halben Vorderwagens der Versuchserprobung (aus Abschnitt 3.1.2) diente zur Validierung der hier vorgestellten Methode. Die Nichtlinearitäten in diesem Vorderwagen beschränken sich im wesentlichen auf den Kontaktbereich zwischen Stützlager und Federbeindom. Um dieses System für Sonder- und Mißbrauchslasten auslegen zu können, muß eine nichtlineare Berechnung mit Kontakt durchgeführt werden.

Bisher müßte für diese Simulation ein relativ großes Teilmodell (ca. 100.000 Freiheitsgrade) verwendet werden, um den Kontaktzustand nicht durch eine zu steife Anbindung der Teilstruktur zu verändern. Der Simulationsaufwand für diese Komponente war daher mit den bisherigen Methoden noch relativ groß.

Ein Teilmodell dieses Systems, das mit der dynamischen Submodelltechnik aufgebaut wurde, muß dagegen nur die direkt zu untersuchenden Bauteile enthalten. Die Modellgröße und damit der Umfang der Steifigkeitsmatrix kann gegenüber der bisherigen Vorgehensweise erheblich reduziert werden (ca. 30.000 Freiheitsgrade), ohne daß Fehler durch unrealistische Lagerungsbedingungen entstehen. Die Simulationsdauer und teilweise auch die Aussagegüte können damit gegenüber der bisherigen Vorgehensweise erheblich verbessert werden.

Um das volle Potential dieser Methode aufzuzeigen, wurde die dynamische Submodelltechnik zunächst mit Hilfe eines Makros (SUB-SYS.MAC) im Simulationsprogramm ANSYS implementiert.

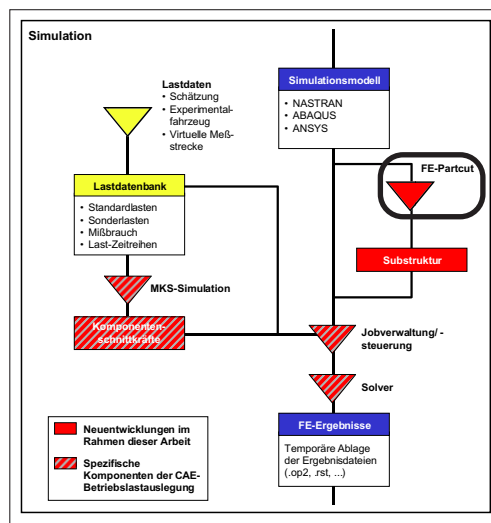
Dazu müssen drei Einheitslastberechnungen am Gesamtsystem (Abb.

3.4) getrennt für die drei Lastangriffsrichtungen der Hydraulikzylinder des Prüfstands durchgeführt werden. Auf Basis der dabei erzeugten Simulationsergebnisse wird dann das ANSYS-Makro SUB-SYS.MAC ausgeführt, mit dem die Randsteifigkeiten des Teilmodells getrennt für alle Einheitslastfälle in einer Matrix gespeichert werden. Außerdem werden durch das Makro die Elemente und Knoten, die außerhalb des Teilmodells liegen, gelöscht (Abb. 3.5). Damit liegt ein neues Modell der Teilstruktur (Abb. 3.6) mit den erforderlichen Informationen für die Randbedingungen vor.

Im zweiten Schritt der dynamischen Submodelltechnik werden die Randbedingungen für die verschiedenen Lastfälle auf die Teilstruktur aufgebracht. Um die Randsteifigkeiten auf das Teilmodell aufzubringen, wird das ANSYS-Makro PARTCUT.MAC ausgeführt, das die lineare Superposition der Randsteifigkeiten aus der Einheitslastfallberechnung durchführt. Dabei muß für jede Lastrichtung ein Faktor eingegeben werden, mit dem die Randverschiebungen aus der entsprechenden Einheitslastberechnung skaliert werden. Dieser Vorgang kann auf Basis des Arrays für beliebig viele Lastfälle wiederholt werden, ohne daß eine neue Simulation am Gesamtmodell erforderlich ist.

Der Vergleich der Ergebnisse der Gesamtstruktur (Abb. 3.7) und des Teilmodells (Abb. 3.8) zeigt, daß beide Analysen absolut äquivalente Ergebnisse liefern. Sowohl der Spannungszustand als auch die Verschiebungen sind zwischen den beiden Simulationen identisch.

3.2.6 FE-PARTCUT



Das dynamische Submodellverfahren wurde im nächsten Schritt als Software-Tool FE-PARTCUT für den Auslegungsprozeß Betriebslastauslegung programmiert. Dabei sollte eine Verbindung zwischen der linearen Gesamtfahrzeugsimulation in MSC/NASTRAN und der nichtlinearen Festigkeitsanalyse in ANSYS und ABAQUS erstellt werden. Die hier vorgestellte Methode ist damit sehr einfach und flexibel einsetzbar.

Mit der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Software FE-PARTCUT kann der Anwender Bereiche aus einem Karosseriemodell des Gesamtfahrzeugs ausschneiden, um anschließend für diese Teilbereiche nichtlineare Festigkeitsanalysen durchzuführen. Die Randsteifigkeiten der angrenzenden Bauteile werden durch Verschiebungen an den freigeschnittenen Knoten abgebildet, die in der nichtlinearen Festigkeitsanalyse als Zwangsverschiebungen aufgebracht werden.

Basis für FE-PARTCUT ist immer eine lineare statische Berechnung mit MSC/NASTRAN. Beim Ausschneiden des Teilmodells muß der Anwender darauf achten, daß die Schnittstellen, an

denen das Teilmodell ausgeschnitten wird, in dem Bereich der Karosserie liegen, in der sich linear verhält (keine Spannungen über der Fließgrenze). Als Schnittstellen werden in der Regel Schweißpunkte gewählt, die in den nichtlinearen Festigkeitsmodellen über Balkenelemente abgebildet sind. Der Schnitt kann aber auch direkt durch ein Bauteil verlaufen.

Vorzugsweise stammen die linearen Berechnungsergebnisse aus einer Inertia Relief Berechnung mit MSC/NASTRAN [3.4]. Dadurch sind die Berechnungsergebnisse unabhängig von den Lagerungsbedingungen des Gesamtfahrzeugs. Dies ist im Auslegungsprozeß Betriebslasten auch immer die Basisanalyse, die bei einer Simulationsschleife als erstes durchgeführt wird.

FE-PARTCUT erzeugt dann einen Eingabedatensatz für ANSYS oder ABAQUS, der zum einen die FE-Struktur und zum anderen eine ANSYS-Parameterdatei enthält, die ein dreidimensionales Array beinhaltet. Dieses Array enthält für jeden Lastfall aus der NASTRAN-Ergebnisdatei (output2-File) und für jeden Randknoten des Teilmodells die Verdrehungen und Verschiebungen getrennt für alle Lastfälle. Außerdem werden an Stelle der Knotennummern der Randknoten auch die drei Raumkoordinaten der Randknoten gespeichert. Die Randbedingungen können damit unabhängig von der ursprünglichen Knotennumerierung auf das Teilmodell aufgebracht werden. Dies ist wichtig, da die Knoten- und Elementnumerierung der Teilmodelle häufig durch eine Umnumerierung verändert werden muß.

In ANSYS werden dann zunächst die Geometrie des Teilmodells und das Parameter-File eingelesen und anschließend das Makro PARTCUT.MAC

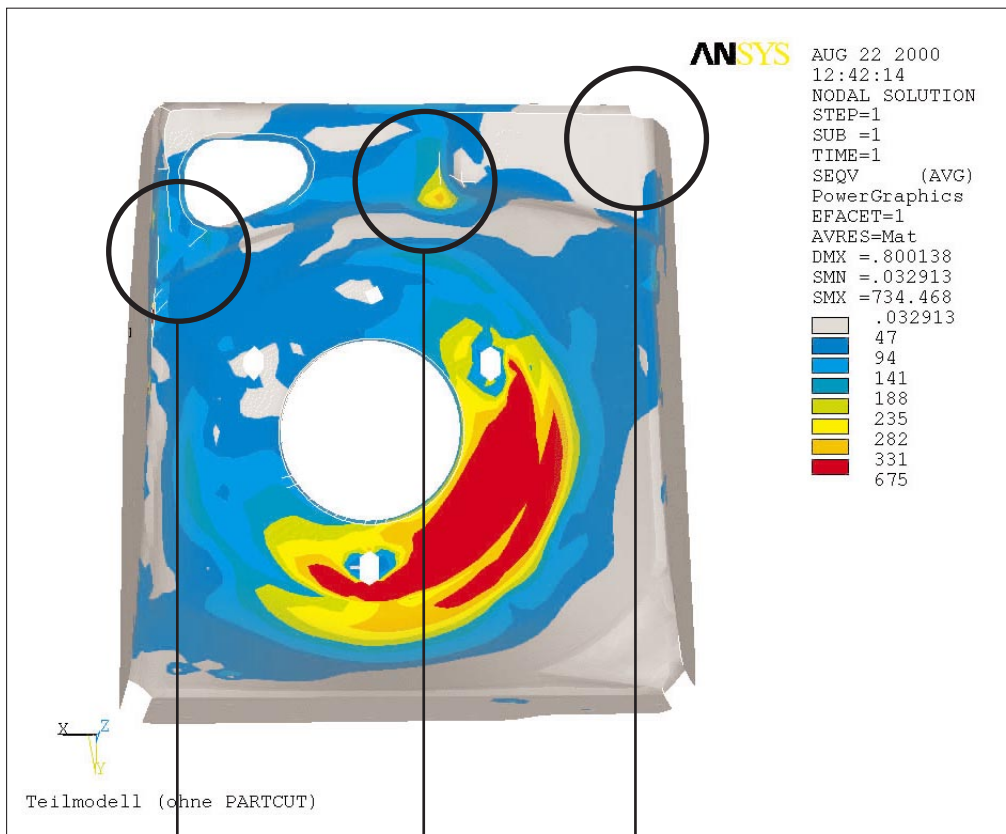


Abb. 3.9
Spannungsverteilung im Teilmodell bei starrer Lagerung

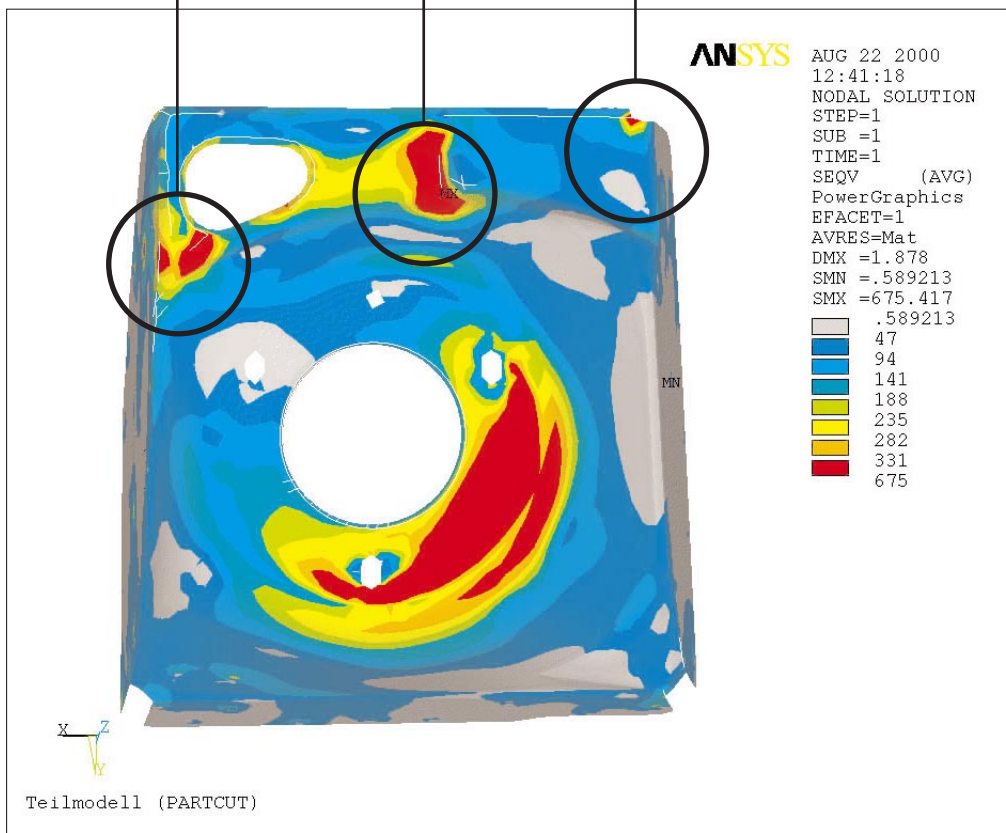


Abb. 3.10
Spannungsverteilung im Teilmodell bei Verwendung von FE-PARTCUT

ausgeführt. Dieses Makro superponiert die Randverschiebungen der Einheitslastfälle und bringt die entsprechenden Knotenverschiebungen auf das Teilmodell auf. Das Ergebnis des FE-PART-CUT-Prozesses ist ein Berechnungsmodell, das an den Koppelstellen die Randtranslationen und -rotationen, definiert als Zwangsbedingungen, enthält.

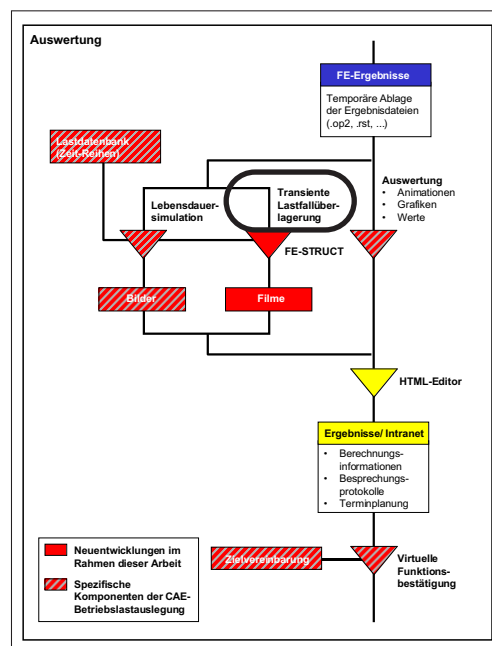
Die Abbildungen 3.9 und 3.10 zeigen Ergebnisse von Berechnungen an einem Federbeindom, die in ANSYS durchgeführt wurden.

Gerechnet wurde einmal mit fester Einspannung (Abb. 3.9) und einmal unter Berücksichtigung der Randsteifigkeiten, die aus FE-PARTCUT stammen (Abb. 3.10). In der Berechnung ohne Randsteifigkeiten wurde das Modell an allen Schweißpunkten fest gelagert (nur translatorische Freiheitsgrade).

Die Spannungsauswertung zeigt vor allem Unterschiede im Bereich der Einspannung, die bei der Berücksichtigung der Randsteifigkeiten höher sind. Diese Untersuchungen zeigen, daß erst durch die Berücksichtigung der Gesamtfahrzeugrandbedingungen zuverlässige Simulationsaussagen bei Teilstrukturuntersuchungen möglich sind.

3.3 Auslegung von dynamisch beanspruchten Strukturen

Die meisten derzeit eingesetzten Simulationsmethoden für die Betriebslastauslegung ermöglichen sehr gute Aussagen für quasistatische Lastereignisse. Quasistatische Lastereignisse sind in diesem Zusammenhang Beanspruchungen, die keine bzw. vernachlässigbar kleine dynamische Reaktionen (Resonanzen) in der



Struktur hervorrufen. Dies trifft auch auf die Lebensdauersimulation zu, bei der mittels linearer statischer Superposition der Beanspruchungszustand in der Struktur für jeden Zeitschritt des Last-Zeitsignals berechnet wird. Dies hängt damit zusammen, daß beim Verfahren der statischen Superposition keine Veränderungen der Beanspruchung durch dynamische Effekte berücksichtigt werden.

In Fällen, bei denen durch die Anregung eine dynamische Überhöhung des Antwortverhaltens der Struktur auftritt, versagen diese Berechnungsmethoden, da Überhöhungen, die durch Resonanzen entstehen, nicht durch diese Simulationsverfahren abgedeckt werden können.

Im Rahmen dieser Arbeit wird daher zunächst geprüft, ob es in der Karosseriestruktur Bereiche gibt, bei denen durch Betriebslasten dynamische Effekte auftreten können, die nicht durch die bestehenden statischen Simulationsverfahren abgedeckt werden. Außerdem wird ein Verfahren vorgestellt, mit dem Resonanzeffekte bei der Struktur-

auslegung berücksichtigt werden können.

Um diese Effekte zu untersuchen, wurden auf Basis des halben Vorbaus eine Reihe von Untersuchungen durchgeführt. Dabei wurde das dynamische Antwortverhalten der Karosseriestruktur für eine Straßenanregung (Radkräfte) untersucht. Um den eventuell vorhandenen Einfluß einer dynamischen Überhöhung durch Betriebsbeanspruchungen zu bestimmen, wurde das Strukturverhalten für eine repräsentative Anregung sowohl im Versuch als auch durch eine transiente FE-Simulation in MSC-NASTRAN untersucht.

3.3.1 Ermittlung der dynamischen Reaktion im Versuch

Das dynamische Verhalten der Teilstruktur wurde zunächst versuchstechnisch bewertet. Hierfür wurde die Belastung durch Kräfte an der Radnabe in allen drei Raumrichtungen entsprechend eines repräsentativen Ausschnitts der im Fahrversuch ermittelten Last-Zeitreihen aufgebracht.

Zeitsynchron wurde während der Belastung mittels mehrerer Spannungsaufnehmer (DMS) das Antwortverhalten in der Struktur gemessen [3.7]. Für die spätere Auswertung standen damit synchrone Zeitreihen von den Ansteuersignalen der Hydraulikzylinder und den gemessenen Reaktionen der DMS-Aufnehmer zur Verfügung. Anhand dieser Zeitreihen konnte festgestellt werden, ob sich die Struktur proportional zu der Anregung verhält.

Dazu muß der Verlauf der Anregung mit dem Antwortverhalten der DMS verglichen werden. Zeigen sich hier deutliche Unterschiede in der Charakteristik

der Verläufe, läßt sich auf eine dynamische Anregbarkeit bzw. Dämpfung der Struktur rückschließen. Die Höhe der Amplitudenspitzen ermöglicht zusätzlich eine quantitative Abschätzung des Einflusses.

Um die Auswertung des Antwortverhaltens zu vereinfachen, wurde die Struktur mit drei proportionalen Signalen belastet. Für eine proportionale Anregung müssen die Verläufe der Spannungen identisch mit denen der Belastung sein, falls keine Resonanzeffekte auftreten.

Die Verläufe der gemessenen Spannungen an den einzelnen Meßstellen zeigten zum Teil deutliche Abweichungen gegenüber dem Verlauf der Anregung. Ein Vergleich der DMS-Messungen untereinander zeigte auch große Unterschiede bei den Verläufen der Spannungen. Dies läßt sich nur auf Resonanzen in der Struktur zurückführen.

Um diese Effekte genauer zu untersuchen und die genauen Ursachen festzustellen, wurde der Versuchsaufbau mit derselben Belastung simulationstechnisch untersucht.

3.3.2 Rechnerische Ermittlung der dynamischen Reaktion

Eine zuverlässige Möglichkeit das dynamische Antwortverhalten der Struktur zu bestimmen, ist die transientmodale Simulation in MSC/NASTRAN (Solution 112) [3.4]. Dabei wird die transiente Antwort einer durch ein Signal angeregten Struktur berechnet. Es ist zu beachten, daß dies eine lineare Analyse ist. Eventuell in der Struktur vorhandene Nichtlinearitäten können daher bei der

Solution 112 in MSC/NASTRAN nicht erfaßt werden.

Das Simulationsmodell des halben Vorderwagens war auf Grund der großen Anzahl der Freiheitsgrade so groß, daß nicht das gesamte Signal (Abb. 3.11) der Prüfstandssteuerung untersucht werden konnte. Bei der Größe des Simulationsmodells konnte deshalb nur ein kurzer Zeitbereich berechnet werden, ohne daß die Ergebnisdateien zu groß wurden (<2 GB). Aus diesem Grund wurde nur ein relativ kurzer Zeitbereich von 3 Sekunden (Abb. 3.12) rechnerisch untersucht. Als Anregung für die Simulation wurde ein Zeitbereich mit hoher Dynamik (großen Amplitudensprüngen) ausgewählt.

Um das dynamische Antwortverhalten der Struktur zu ermitteln, wurde die transiente Spannungsantwort an einigen ausgewählten Bereichen der Struktur (Abb. 3.13) ausgewertet. Der Verlauf der von-Mises-Vergleichsspannungen der transienten Berechnung wurde dann mit denen aus einer rein statischen Berechnung (Superposition) verglichen, wie sie derzeit bei der Lebensdauersimulation eingesetzt wird.

Es zeigte sich dabei sehr deutlich, daß sich die Struktur bereichsweise sehr unterschiedlich verhält. Dabei zeigten einige Punkte eine sehr deutliche Überhöhung, während sich die Beanspruchung an anderen Stellen proportional zur Belastung verhält (Abb.3.14).

Abb. 3.11
Ansteuerungssignal des Prüfstands

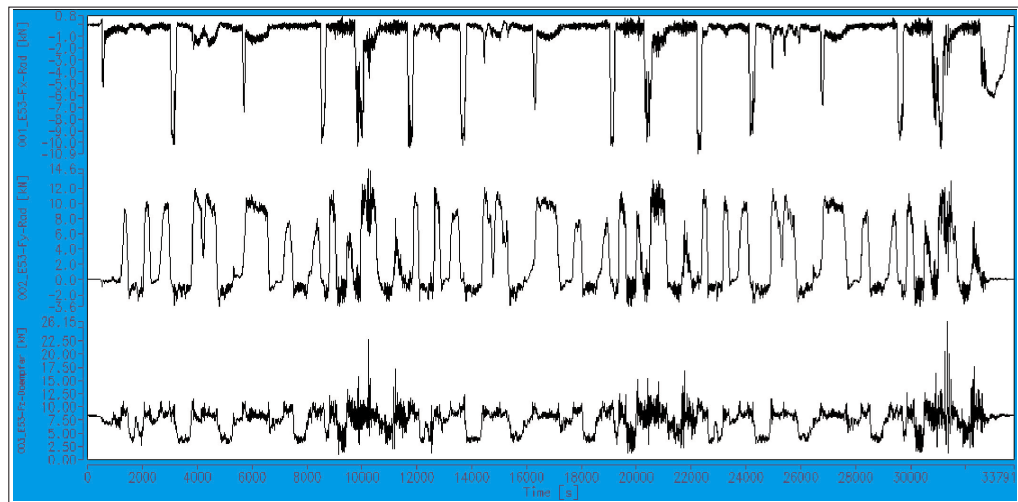
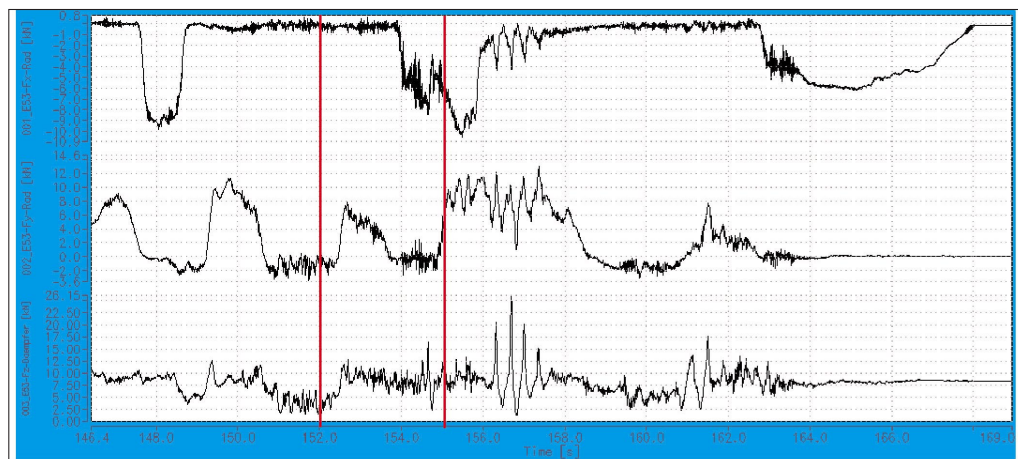


Abb. 3.12
Signalausschnitt für transiente Response-Analyse (3 sec.)



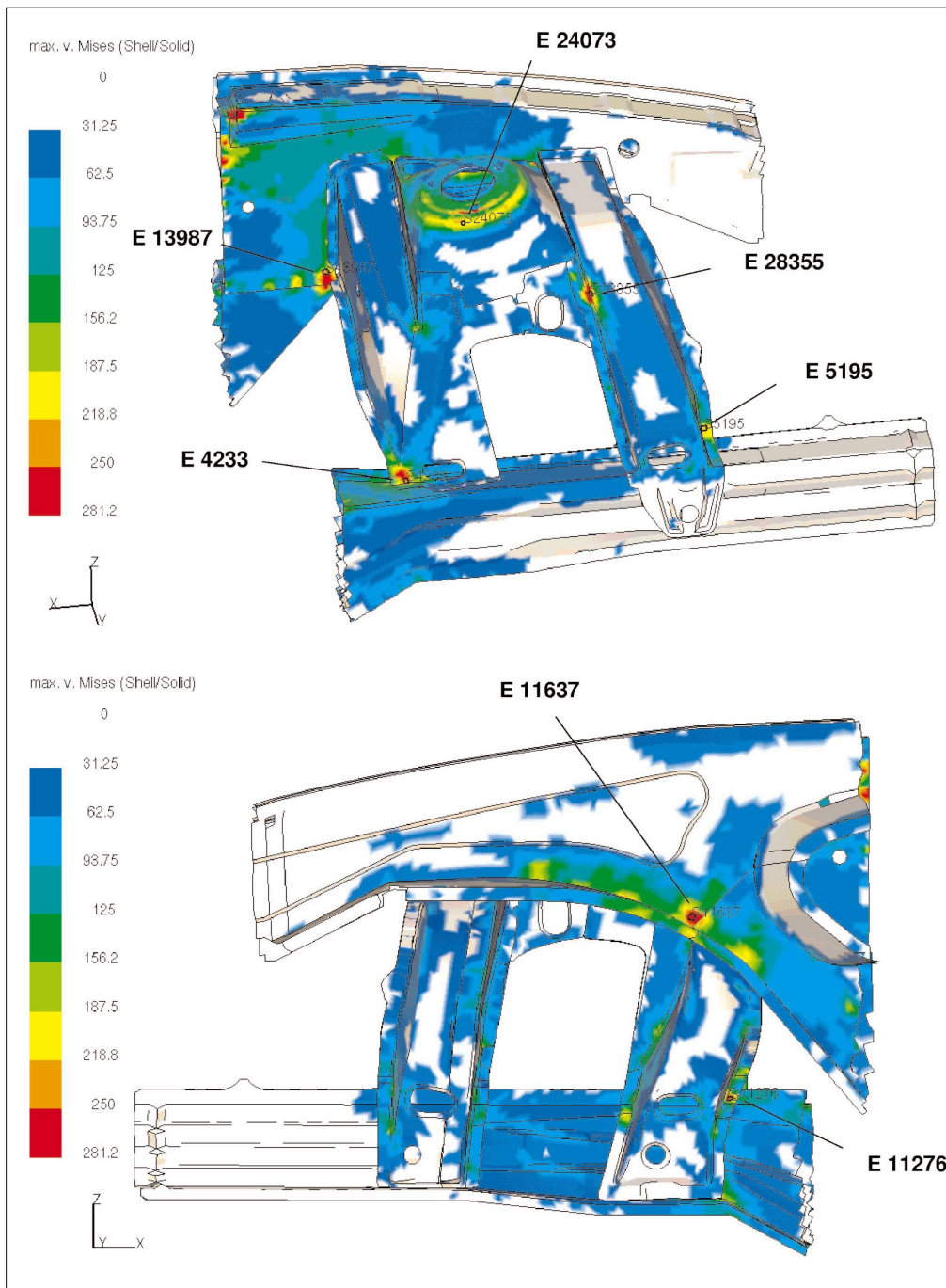


Abb. 3.13

Auswertungsstellen des dynamischen Antwortverhaltens der Vorderbaustruktur in der Simulation

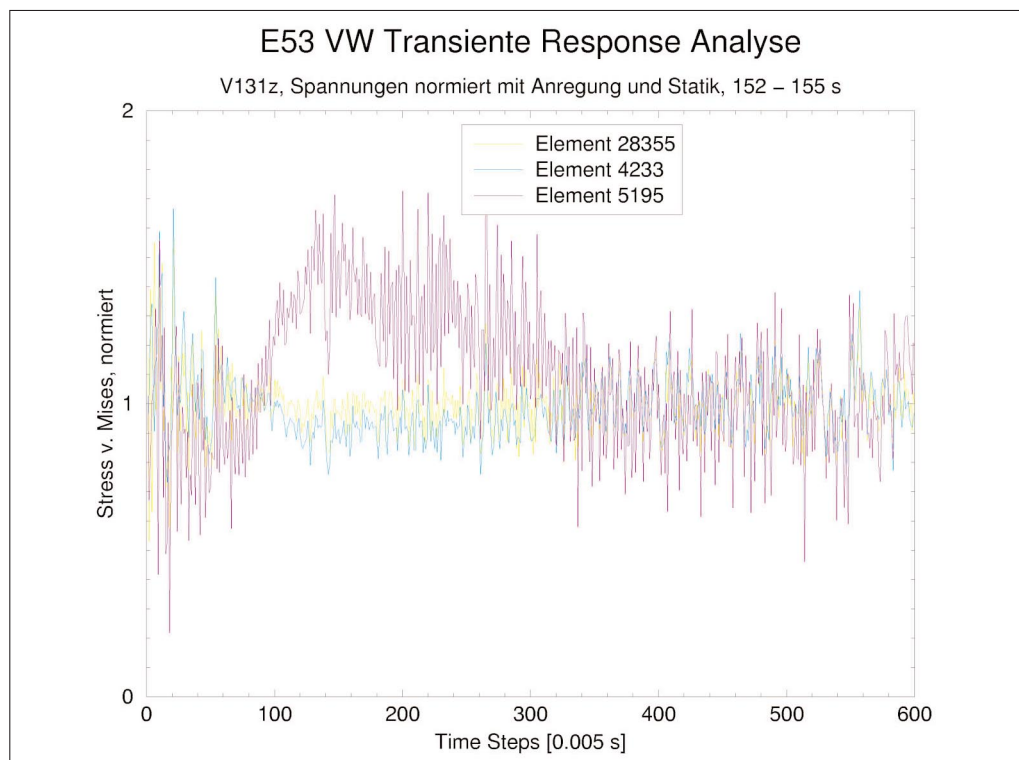
Um den theoretisch maximal möglichen Einfluß der dynamischen Anregung zu bestimmen, wurde das System bei einer weiteren Simulation durch Aufbringung von mehreren Einzelmassen so „verstimmt“, daß sich die globalen Strukturmoden in einem ähnlichen Frequenzspektrum wie die Anregung befanden. Dadurch wird eine Anregung in der

Eigenfrequenz des Systems simuliert. Auch hier wurde das Antwortverhalten der Struktur bestimmt und mit der Strukturantwort des Systems ohne Zusatzmassen verglichen.

Die Verläufe der Vergleichsspannungen in Abhängigkeit von der Massenbelegung der Struktur (Abb.3.15 und 3.16) zeigen deutliche Unterschiede

Abb. 3.14

Antwortverhalten (von-Mises-Spannungen) bei der transienten Analyse



gegenüber der Basisanalyse ohne zusätzliche Massenaufrüstung. Dieser Effekt läßt sich nur mit der unterschiedlichen Anregbarkeit der Struktur bei veränderter Massenbelegung erklären.

Die Untersuchung der Verläufe der Vergleichsspannungen der transienten Simulation zeigten zudem eine deutlich höhere Amplitude gegenüber der rein statischen Superposition. Außerdem zeigte sich abhängig von den Beobachtungsstellen ein unterschiedlich stark ausgeprägtes Überhöhungsverhalten der Amplituden in den Zeitverläufen der transient berechneten Spannungsverläufe. Dies sind eindeutige Hinweise darauf, daß das Resonanzverhalten an bestimmten Stellen der Karosseriestruktur einen erheblichen Einfluß auf die Beanspruchungen haben kann.

Große Überhöhungen traten insbesondere am Radhausstützträger vorne (Element 5195) mit einem Überhöhungsfaktor der Spannungen von bis zu 1,75 auf. Hier macht sich besonders

das Schwingverhalten des im Versuchsaufbau frei kragenden Motorträgers bemerkbar.

An den außen liegenden Beobachtungsstellen Radhaus außen (Element 11637) und Radhaus Stützträger hinten außen (Element 11276), sinkt das Lastniveau zunächst unter das der statischen Superposition, steigt bei wiederholter (periodischer) Anregung auf ein hohes Niveau mit einer Überhöhung von bis zu 1,6 an.

Die restlichen Beobachtungspunkte sind wesentlich schwächer in ihrem Verhalten mit Überhöhungen zwischen Faktor 1,2 und max. 1,4, da sie im direkten Lastpfad zwischen der Lasteinleitungsstelle und der Einspannung liegen. Der Einfluß der Einspannung führt in diesem Bereich zu sehr hohen Eigenfrequenzen, die nicht durch die Belastung angeregt werden.

Die dynamische Überhöhung bei der veränderten Massenbelegung des Modells ist auch am Beobachtungs-

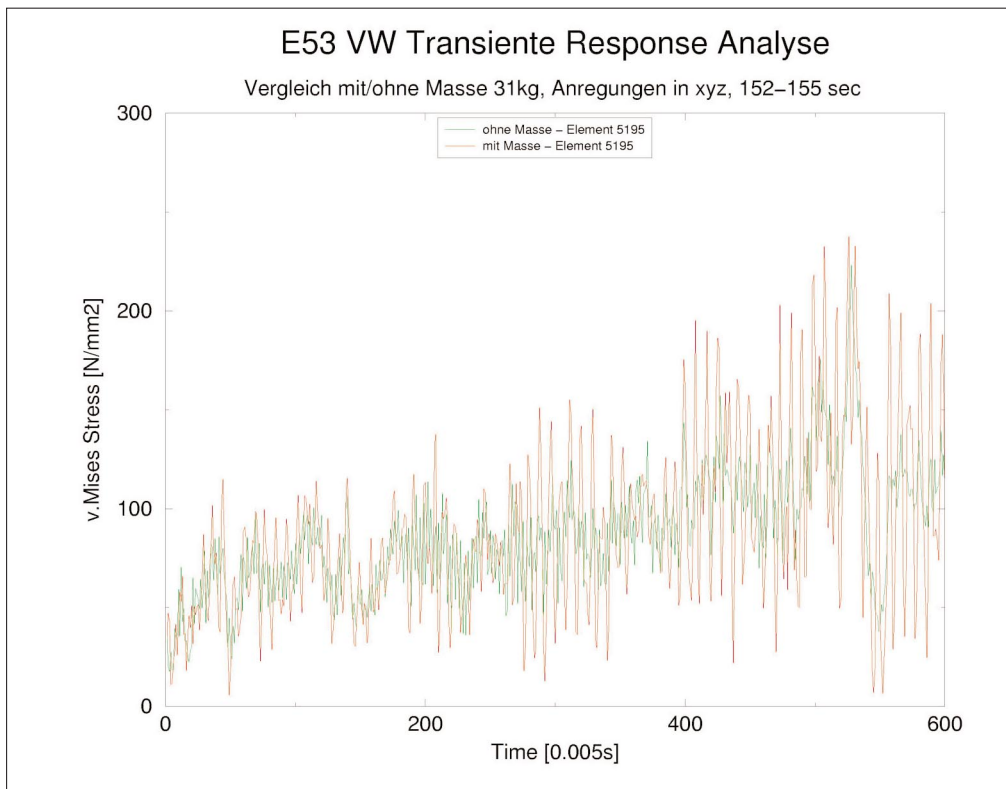


Abb. 315

Einfluß der veränderten Massenbelegung auf das Antwortverhalten der Struktur (Element 5195)

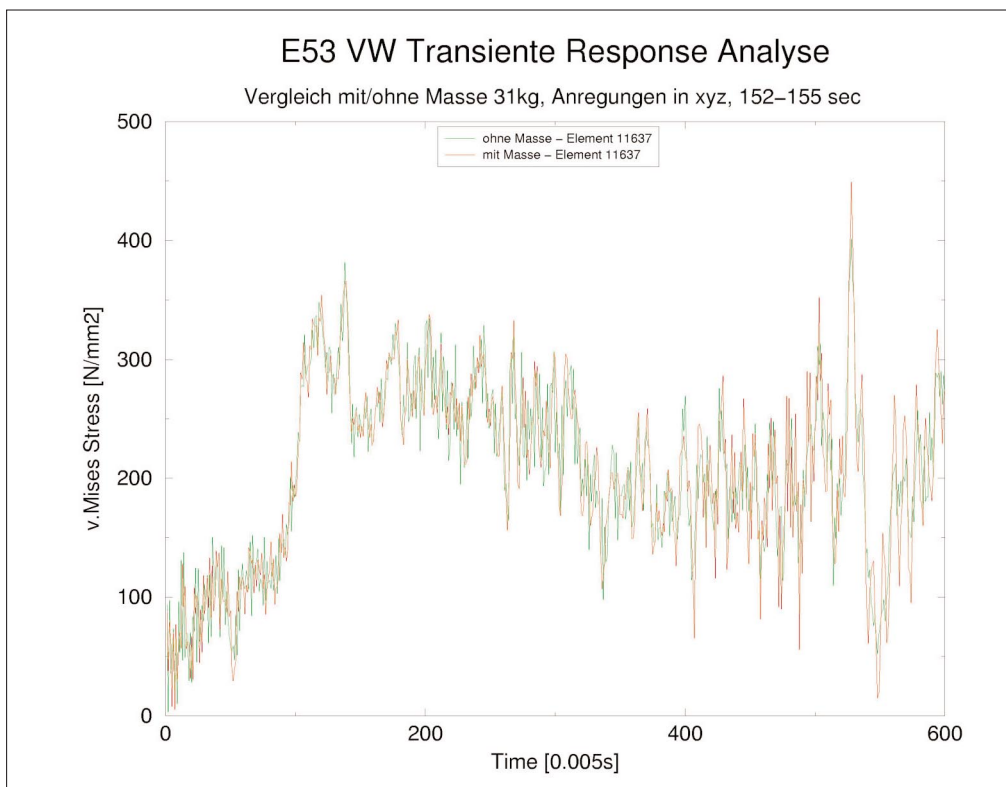


Abb. 316

Einfluß der veränderten Massenbelegung auf das Antwortverhalten der Struktur (Element 11637)

punkt Radhausstützträger vorne am größten. Während sich der Maximal-Peak kaum verändert, sind in den regelmäßig angeregten Bereichen wesentliche

Spannungserhöhungen von 100 N/mm² auf 140 N/mm² bzw. 130 N/mm² auf 180 N/mm² zu erkennen.

Die weiteren Beobachtungspunkte zeigen eine umso geringere Veränderung durch die zusätzliche Massenbelegung, je näher sie sich bei der Lasteinleitung befinden. Im Federbeindom unmittelbar am Stützlager sind schließlich keine Abweichungen der Spannungen zwischen der Basissimulation und der Variante mit erhöhter Massenbelegung mehr zu erkennen.

Die dynamische Steifigkeit der Struktur hat damit an bestimmten Punkten in der Struktur einen wesentlichen erhöhenden Einfluß auf die auftretenden Spannungen. Sie steigen bis zu Faktor 1,75 gegenüber der rein statischen Superposition der Lasten an.

Dies gilt bereits für die dynamisch relativ steife, nicht mit zusätzlichen Massen belegte Vorbaustruktur. Durch die Verschiebung der Eigenfrequenzen mit Zusatzmassen werden die Spannungen nochmals merklich erhöht. Das bedeutet, daß für eine Lebensdauerberechnung der Struktur die dynamischen Spannungsüberhöhungen in einigen Bereichen unbedingt mit zu berücksichtigen sind, um aussagekräftige Simulationen durchführen zu können.

Dies ist derzeit nur mit dem Verfahren der modalen Superposition im Simulationsprogramm Falancs [3.5] möglich. Die Durchführung dieser Simulation ist jedoch bei großen Systemen sehr aufwendig, da als Eingangsgröße für die Lebensdauersimulation das Ergebnis einer transienten FE-Analyse für das gesamte Signal der Belastung benötigt wird.

Aus diesem Grund wird hier eine weitere Vorgehensweise vorgestellt, mit der eine Auslegung von dynamisch angeregten Strukturen erfolgen kann.

3.3.3 Berücksichtigung des Resonanzverhaltens bei Strukturauslegung für Betriebslasten

Resonanzeffekte, die durch die Anregung von Eigenfrequenzen in einer Struktur infolge dynamischer Lasten entstehen, können derzeit nur eingeschränkt bei der Lebensdauersimulation bestimmt werden. Daher wird bei der Betriebslastauslegung in dieser Arbeit eine andere Vorgehensweise vorgeschlagen.

Bei der Konstruktion sollte zunächst grundsätzlich vermieden werden, daß globale Strukturmoden durch Frequenzanteile der Belastung angeregt werden. Dazu muß im Vorfeld der Lebensdauersimulation eine PSD-Analyse (Spektralanalyse) der Anregung durchgeführt werden, um die dominanten Frequenzanteile des Last-Signals zu bestimmen.

Parallel dazu sollte eine Modalanalyse der Struktur durchgeführt werden, um alle Strukturmoden im Frequenzbereich der Anregung zu identifizieren. Diese beiden Informationen sollten genutzt werden, um die Struktur so in ihren Eigenfrequenzen zu verstimmen, daß keine Moden durch Betriebslasten angeregt werden.

Diese Untersuchungen haben sich bei der Vorauslegung der Anbindungen schwerer Komponenten, wie z.B. der Batterie, als besonders wichtig und nützlich erwiesen. Ein weiteres sehr aussagekräftiges Hilfsmittel ist die bereits beschriebene transiente Simulation (Solution 112) in MSC/NASTRAN, da hier das dynamische Antwortverhalten der Struktur sichtbar gemacht werden kann. Diese Information kann dann genutzt werden, das System gezielt zu versteifen, um Resonanzen zu vermeiden.

Um die transiente Simulation durchführen zu können, sollte das Berechnungsmodell durch den Einsatz des Substrukturverfahrens (Superelemente) auf einen möglichst kleinen Teilausschnitt reduziert werden. Außerdem sollten repräsentative Ausschnitte des Anregungssignals ausgewählt werden, um den Aufwand bei der Simulation so gering wie möglich zu halten.

3.4 Darstellung von Betriebsbeanspruchung im Zeitbereich

Der Berechnungsingenieur muß mit Hilfe seiner Simulationen alle Schwachstellen in einer Konstruktion identifizieren und durch Änderungsvorschläge beheben.

Dieser Prozeß läuft in engem Dialog mit den Konstruktionsabteilungen ab. Deshalb ist es wichtig, daß die Ergebnisse in einer anschaulichen Form den Prozeßpartnern zur Verfügung gestellt werden.

Hier hat die Crash-Simulation einen großen Vorteil gegenüber der Betriebslastauslegung, da die Simulationsergebnisse in Form von Animationen sehr anschaulich eventuelle Schwachstellen aufzeigen. Schwachstellen lassen sich in Animationen sehr leicht identifizieren und erklären. Dadurch können Maßnahmen zur Beseitigung dieser strukturellen Schwächen sehr schnell abgeleitet werden.

Diese anschauliche Darstellungsmöglichkeit fehlt derzeit noch zur Visualisierung von Ergebnissen der Betriebs-

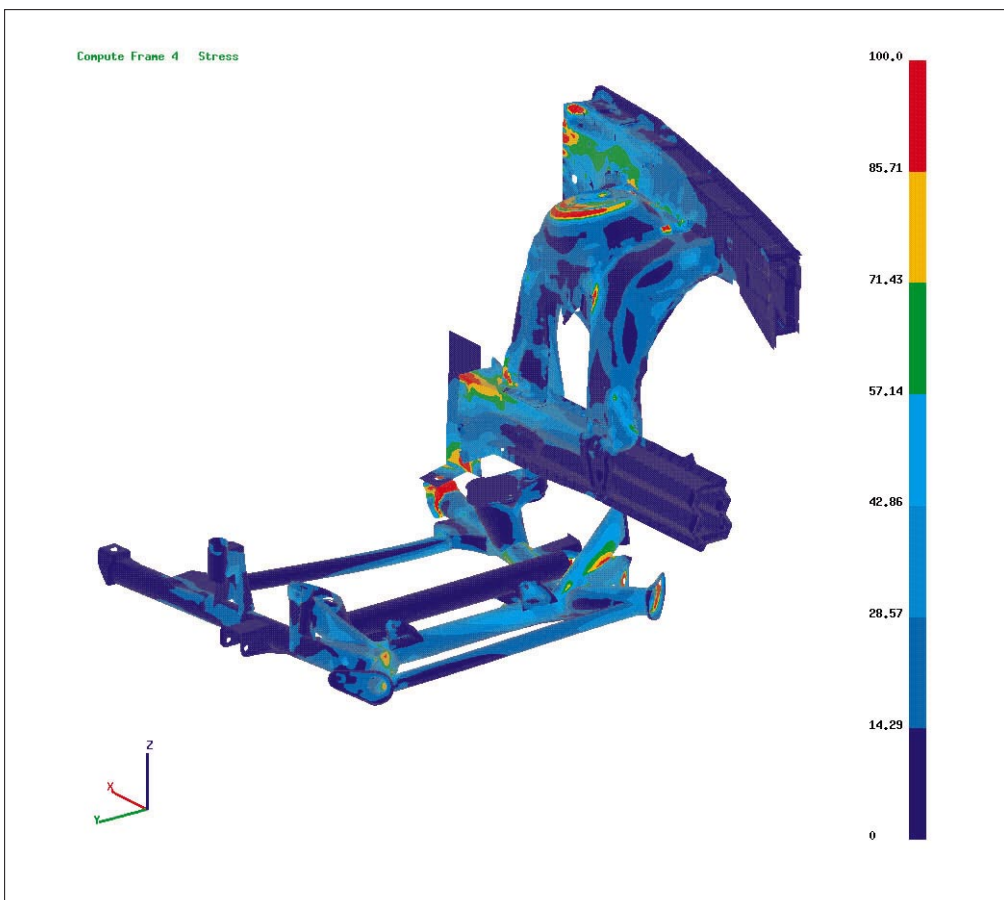
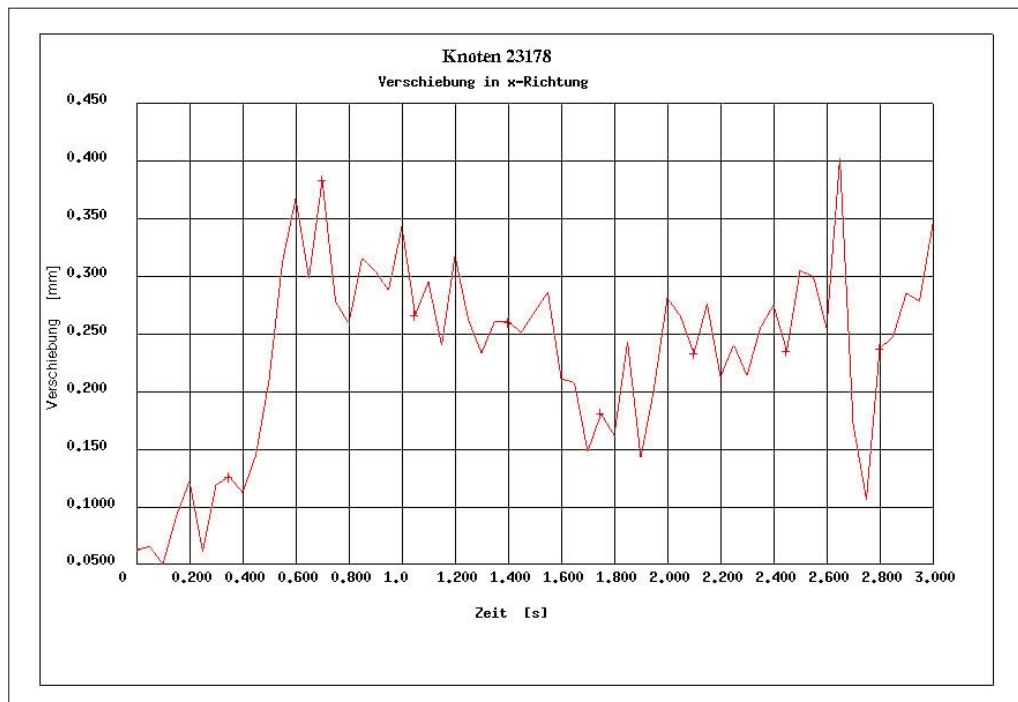


Abb. 3.17

Darstellung eines einzelnen Zeitschritts einer FE-STRUCT-Animation (von-Mises-Spannungen)

Abb. 3.18

Auswertung von Verschiebungen in FE-STRUCT



lastauslegung und hier insbesondere der Lebensdauersimulation.

Derzeit ist das Ergebnis einer Lebensdauersimulation ein statisches Bild mit der Verteilung der Schädigung in der Struktur. Diese Darstellung läßt keinen Rückschluß zu, welche Wirkmechanismen zu der dargestellten Schädigungsverteilung geführt haben. Die Ableitung von konstruktiven Änderungen auf Basis dieser Darstellung ist dadurch nur mit viel Erfahrung möglich und erfordert einiges an Vorstellungskraft.

Dies erschwert die Kommunikation von Berechnungsergebnissen an die Konstrukteure erheblich. Daher wird eine zusätzliche Darstellungsmöglichkeit benötigt, um die Ergebnisse der Lebensdauersimulation besser darstellen und erklären zu können (Abb 3.17).

3.4.1 Visualisierung der zeitlichen Beanspruchung

Um dem Konstrukteur und dem Berechnungsingenieur eine bessere Interpreta-

tion der Lebensdauersimulation zu ermöglichen, müssen ihm neben der Schädigungsverteilung aus der Betriebsfestigkeitssimulation weitere Auswertungen zur Verfügung stehen.

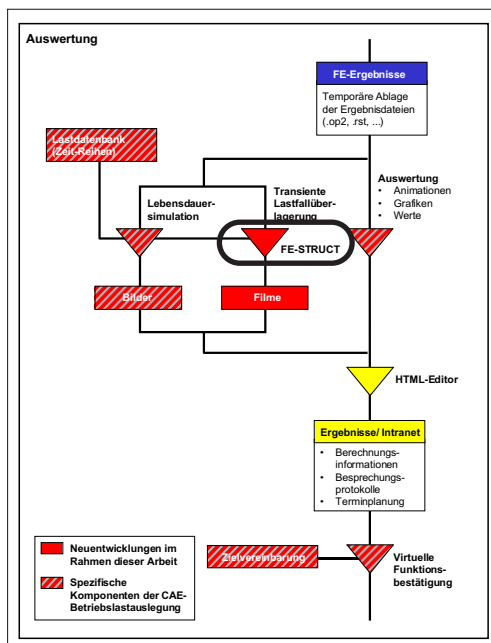
Hier ist insbesondere der zeitliche Verlauf der Beanspruchung von großem Interesse, da dieser wichtige Hinweise auf die Wirkmechanismen einer Struktur gibt. Der zeitliche Verlauf der Beanspruchungen (Abb. 3.18) kann derzeit jedoch nur mit sehr aufwendigen transienten FE-Simulationen erzeugt werden. Außerdem ist diese Simulation über längere Zeitbereiche nur mit kleinen Modellen möglich. An einem Gesamtfahrzeug würde eine solche Berechnung bereits für einen äußerst kurzen Zeitbereich (<1 sec.) an den derzeitigen Hardwareressourcen scheitern.

Es wird daher eine einfachere Vorgehensweise zur Animation großer Strukturbereiche für längere Last-Zeit-signale benötigt. Auch hier bietet das Verfahren der statischen Superposition aus der Betriebsfestigkeitssimulation

eine Grundlage für ein Darstellungsverfahren.

Durch die statische Superposition läßt sich auf Basis einer geringen Anzahl von Einheitslastfällen die zeitliche Beanspruchung einer Struktur ermitteln. Dieses Verfahren wurde in der Anwendung FE-STRUCT umgesetzt, um eine Animation der zeitlichen Beanspruchung zu erzeugen.

3.4.2 FE-STRUCT



Die Belastung der Karosseriestruktur durch Betriebslasten wird in FE-STRUCT durch die Superposition von einzelnen Lasten (Einheitslastfällen), die entsprechend einer realen Belastung (d. h. Fahrsituation) auftreten, durchgeführt.

Dazu werden die Lasten an den Koppelstellen der Karosserie aufgebracht. Diese Belastung ist in der Realität immer eine Funktion der Zeit. FE-STRUCT stellt diese zeitabhängigen Belastungen (Verformungen und Spannungen) einer Karosserie oder einzelner Bauteile in Form einer Animation dar und

ermöglicht dem Berechnungsingenieur, Schwachstellen einer Konstruktion nach Gesichtspunkten der Festigkeit aufzuzeigen.

Außerdem zeigt eine solche Animation die Kraftflüsse innerhalb der Rohkarosserie, wodurch eine Optimierung der Lastpfade der Struktur möglich wird. Des weiteren kann der Zeitpunkt der maximalen Belastung aus dem Last-Zeitsignal für jede Stelle der Struktur bestimmt werden. Damit können die kritischen Zeitschritte eines Signals gesondert berechnet werden, um die Versagensmechanismen in der Struktur zu bestimmen.

FE-STRUCT basiert nicht auf einer dynamischen Analyse, sondern rein auf statischen Berechnungen einzelner Zustände, die zeitlich hintereinander dargestellt werden. Allerdings können alle während einer Fahrsituation auf die Karosserie wirkenden Lasten berücksichtigt werden.

Die Beanspruchung für die einzelnen Zeitschritte und die Verformungen der Karosserie werden basierend auf den Ergebnissen der Einheitslasten superponiert. Diese Einheitslasten werden in der FE-Berechnung an Koppelstellen der Karosserie aufgebracht. Um eine Fahrsituation rechnerisch zu simulieren, müssen die Verschiebungen aller Lastfälle entsprechend den tatsächlich auftretenden Kräften (zu einem beliebigen Zeitpunkt) skaliert werden. Die tatsächlich auftretenden Kräfte entstammen aus Zeitreihen. Diese Zeitreihen werden gemessen oder sind das Ergebnis einer MKS-Simulation. Vor der Skalierung der Verschiebungen mit den Größen aus den Last-Zeitreihen werden die Starrkörperverschiebungen aus der Inertia-Relief-Berechnung aus der Ge-

samtverschiebung der einzelnen Freiheitsgrade entfernt.

Da es sich um ein weitgehend lineares Problem handelt, ergibt sich die tatsächliche Verschiebung aus einer Superposition aller Einzelverschiebungen. Gleiches gilt auch für Spannungen. Diese Verformungen stellt FE-STRUCT zeitabhängig dar.

Mit Hilfe dieser Animation und dem statischen Ergebnis der Lebensdauer-Simulation kann der Berechnungsingenieur zuverlässig die Versagensmechanismen der Struktur ermitteln und den verantwortlichen Konstrukteuren vermitteln.

Die in diesem Kapitel vorgestellten Methoden ermöglichen die vollständige Absicherung der Rohkarosserie für alle Betriebslastereignisse. Dabei wird abhängig vom betrachteten Lastfall entweder eine Simulation an der Gesamtstruktur oder eine Untersuchung an der Teilstruktur durchgeführt. Wichtig ist dabei, daß grundsätzlich die Rahmenbedingungen des Gesamtfahrzeugs berücksichtigt werden. Dies ist mit der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Anwendung FE-PARTCUT möglich.

Bei der Auswertung der Ergebnisse der Lebensdauer-Simulation können mit Hilfe der Anwendung FE-STRUCT ergänzende Untersuchungen durchgeführt werden, um das Strukturverhalten zu bewerten.

Die Vernetzung der in diesem Rahmen vorgestellten Methoden führten zu einem leistungsfähigem CAE-Auslegungsprozeß für die Betriebalastauslegung.

Prozeßsimulation im Umfeld der CAE-Betriebslastauslegung

Für den Entwicklungsprozeß der Karoseriestructur ist es entscheidend, die Beanspruchbarkeit eines Konstruktionsstandes zuverlässig bestimmen zu können. Dazu muß unter anderem die Grenzbelastung einer Konstruktion berechnet werden.

Eine wesentliche Unschärfe in den bestehenden Auslegungsumfängen ist dabei der Einfluß des Herstellprozesses auf die Beanspruchbarkeit der Konstruktion [4.1]. Während der Fertigung durchläuft das Rohmaterial verschiedene Prozeßschritte, die einen erheblichen Einfluß auf das Strukturverhalten haben können.

Insbesondere durch den Tiefziehprozeß werden die Eigenschaften des Blechrohmaterials stark verändert. Bei der derzeitigen CAE-Auslegung werden die durch den Umformprozeß erzeugten Veränderungen der Kennwerte des Materials noch nicht berücksichtigt.

Bei der Auslegung werden damit nur die Nennmaße aus der Konstruktionszeichnung für die Blechdicken verwendet. Auch die Eigenschaften des

Materials werden unverändert von Materialversuchen am Grundmaterial übernommen. Dies führt dazu, daß mehrere wesentliche Parameter, die einen erheblichen Einfluß auf die lokale Festigkeit haben können, außer acht gelassen werden.

Für Festigkeitsauslegungen lokaler, stark beanspruchter Strukturen sind daher genauere Material- und Geometriedaten notwendig [4.6]. Wird die Geometrie eines Bauteils durch eine Umformung erzeugt, ändert sich während des Herstellungsvorgangs das Materialverhalten. Diese Veränderung ist nicht über das ganze Bauteil konstant sondern eine Funktion der Geometrie.

Insbesondere die Abstreckung und die Verfestigung sind zwei Einflußgrößen, die das örtliche Spannungs-Dehnungsverhalten bei einer Betriebsbeanspruchung maßgeblich beeinflussen können. Werden diese Parameter außer acht gelassen, ist eine quantitative Auslegung nicht möglich.

Um den Umformprozeß virtuell zu qualifizieren, erfolgen umfassende Simulationen des Umformprozesses aller kritischen Bauteile der Karosserie. Im Rahmen dieser Untersuchungen fallen quasi als Abfallprodukt die für die Festigkeitssimulation interessanten Größen der Verfestigung und Abstreckung an.

Diese Informationen konnten allerdings bisher noch nicht im Bauteilauslegungsprozeß genutzt werden. Es fehlt derzeit ein geeigneter Prozeß, diese unterschiedlichen Simulationsumgebungen zu verknüpfen. In den folgenden Abschnitten wird ein Verfahren vorgestellt, mit dem die Simulation des Umformprozesses mit der Festigkeits- und Betriebsfestigkeitsanalyse verknüpft werden kann.

Diese Schnittstelle läßt sich für beliebige andere Fertigungsprozesse erweitern. Damit läßt sich zum Beispiel auch die bei Aluminium-Profilen weit verbreitete IHU-Umformung (Innen-Hochdruck) abdecken. Es ist einzig eine Erweiterung der Schnittstelle für weitere Datenformate von Prozeßsimulationsanwendungen nötig.

4.1 Einfluß des Umformprozesses auf die Beanspruchbarkeit von Blechen

Karosserien werden in der Regel aus umgeformten, relativ dünnen Stahlblechbauteilen zusammengesetzt. Die Blechdicken, die dabei in der Regel eingesetzt werden, schwanken zwischen 0,7 mm und 2,5 mm.

Das Rohmaterial wird dabei auf Coils in unterschiedlichen Breiten angeliefert. Aus den Coils werden in den fol-

genden Produktionsschritten Platinen für die unterschiedlichen Bauteile herausgeschnitten und in mehreren Schritten zu dem endgültigen Bauteil umgeformt. Das Tiefziehen ist dabei das am häufigsten eingesetzte Umformverfahren.

Durch den Umformprozeß werden die Eigenschaften der eingesetzten Werkstoffe örtlich teilweise erheblich beeinflusst. Die Veränderung der Eigenschaften sind in der Regel nicht homogen über das Bauteil verteilt, sondern schwanken sehr stark. Entsprechend dem Fertigungsverfahren ergeben sich zudem unterschiedlich starke Umformgrade und -verhältnisse im Bauteil.

Die größten Verformungen entstehen dabei bei der Blechumformung. Hier wird im wesentlichen zwischen den Bereichen Streckziehen und Tiefziehen unterschieden. Der Streckziehbereich zeichnet sich durch eine Verringerung der Blechdicke aus, während beim Tiefziehen die Blechdickenreduktion weitgehend gering bleibt [4.3].

Auch der Verfestigungszustand des Werkstoffes ist abhängig von der Umformung des Bauteils. Hier ist im wesentlichen die Orientierung der plastischen Hauptdehnung wichtig, da sie die Anisotropie des Materials beschreibt [4.7].

Bei einachsiger Beanspruchung wird eine Anisotropie des plastischen Dehnungszustands im Material erzeugt, während bei gleichmässiger Verformung die Richtungsabhängigkeit der Verformung weitgehend vernachlässigt werden kann (plain strain).

Bei anderen Umformverfahren können sich deutlich andere Verhältnisse im Material einstellen. Hier sind insbesondere die Verfahren von Interesse, die im Gegensatz zum Tiefziehprozeß primär

eine lokale Veränderung der Materialeigenschaften hervorrufen [4.19]. Beim Abkanten und Falzen kommt es zu einer Veränderung des Materials, die sich nur sehr lokal auf die Umformzone beschränkt [4.8].

Für die Festigkeit und Betriebsfestigkeit der Bauteile sind in diesem Zusammenhang daher zwei Effekte von besonderem Interesse, da sie einen starken Einfluß auf das Strukturverhalten bei der elasto-plastischen Festigkeitsanalyse haben [4.5, 4.18]. Dies ist die genaue Blechdickenverteilung über das Bauteil und der Grad der Verfestigung für alle Bereiche.

Es ist äußerst schwer, diese Parameter durch Näherungsformeln abzuschätzen, da während des zum Teil sehr komplizierten Herstellprozesses erhebliche Gefügeveränderungen im Material auftreten können. Diese Materialveränderungen können jedoch bereits während der Auslegungsphase in einer Umformsimulation berechnet werden. Diese Simulation ermöglicht eine sehr genaue Bestimmung der Verteilung der Verfestigung und Abstreckung im Bauteil [4.11].

Weitere Effekte, die durch den Umformprozeß auftreten können, sind Eigenspannungen im Bauteil. Durch den komplizierten Fertigungsprozeß können sich Eigenspannungen in bestimmten Strukturbereichen aufbauen. Dieser Eigenspannungszustand ist derzeit jedoch nur mit einer aufwendigen inkrementellen Simulation zu berechnen, bei der auch das Rückspringen des Bauteils berücksichtigt wird. Eine solche Simulation läßt sich jedoch erst spät im Entwicklungsprozeß durchführen [4.12].

Für die prozeßsichere virtuelle Auslegung von Dünnschichtstrukturen ist es daher wichtig, die Prozeßsimulation in

den Auslegungsprozeß Betriebslasten zu integrieren. Hierfür müssen die Ergebnisse der Tiefziehsimulation in das Berechnungsmodell der Festigkeitsauslegung übertragen werden und Verfahren zur Berücksichtigung dieser Effekte bei der Betriebslastauslegung entwickelt werden.

4.2 Verfahren der Prozeßsimulation

Durch die Prozeßsimulation können alle wesentlichen Materialveränderungen des Fertigungsprozesses berechnet werden. Dabei sind für die Betriebslastauslegung insbesondere die veränderliche Blechdickenverteilung, der plastische Dehnungstensor und die Anisotropie der Verfestigung nach dem Umformen die wesentlichen Einflußgrößen.

Derzeit kommen zwei Berechnungsverfahren für die Simulation des Tiefziehprozesses zum Einsatz. Während der frühen Entwicklungsphase werden Einschrittverfahren eingesetzt, für die noch keine detaillierte Information über die Werkzeuge und den Ziehvorgang vorliegen muß. Bei fortschreitender Reife des Bauteils und der Fertigungsplanung können genauere explizite Umformsimulationsverfahren eingesetzt werden, die den vollständigen Tiefziehprozeß schrittweise abbilden. Mit diesen Verfahren ist eine sehr genaue Bestimmung aller Prozeßparameter und -einflüsse möglich. Insbesondere der Eigenspannungszustand kann nur mit diesem aufwendigen Verfahren berechnet werden.

4.2.1 Einschrittverfahren

In der Konzeptphase der Fahrzeugentwicklung kommen überwiegend sogenannte Einschrittverfahren (Abb 4.1) zum Einsatz. Bei der Einschrittmethode erfolgt die Simulation von der ebenen Blechplatte in das fertige Bauteil in einem einzigen Berechnungsschritt.

Um die äußerst komplizierten Zusammenhänge während des Tiefziehens beschreiben zu können, wird dabei nicht der reale Vorgang mit seinen einzelnen Umformschritten berechnet, sondern der Materialfluß vom ebenen Zustand zum endgültigen Bauteil. Dabei werden alle Informationen über Zwischenschritte und eventuelle Ankonstruktionen der Platine im Prozeß nicht berücksichtigt.

Da für das Einschrittverfahren nur die Geometrie und der Werkstoff des Bauteils bekannt sein müssen, eignet es sich besonders, wenn wenig Informationen über den Fertigungsprozeß bekannt sind. Dieses Verfahren kommt daher

hauptsächlich während der frühen Projektphasen bei der Prüfung der Herstellbarkeit einer Konstruktionsvariante und für die Konzeptentwicklung zum Einsatz.

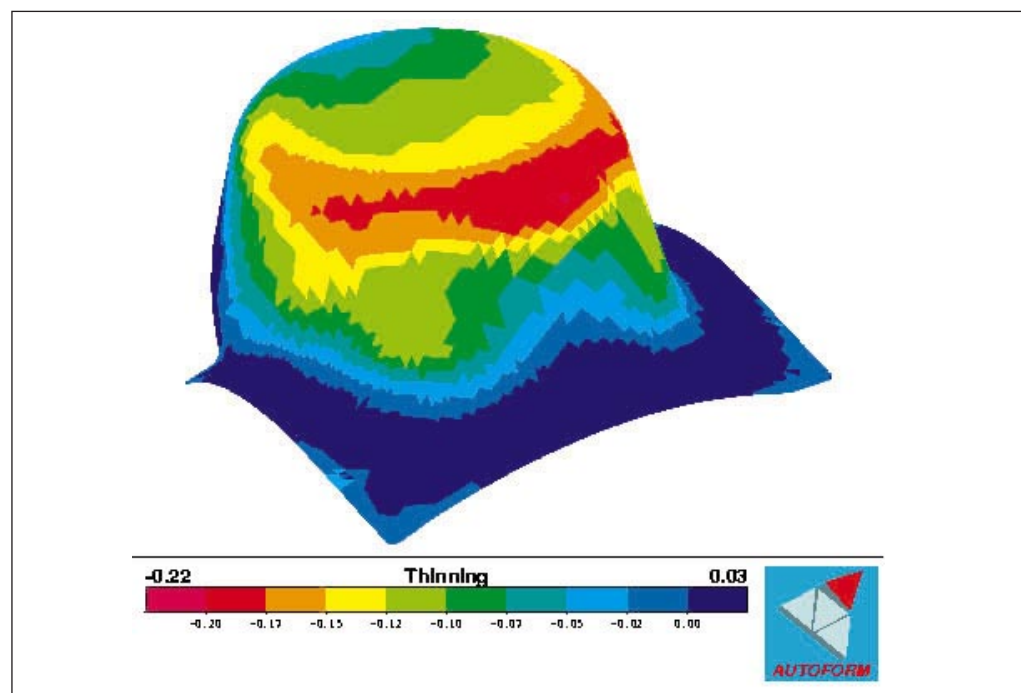
Weitere Vorteile der Einschrittverfahren sind die kurze Simulationszeit und der geringe Eingabeaufwand. Dadurch, daß für die Simulation nur die Endgeometrie und keine Werkzeugkonstruktion benötigt wird, ist auch die Modellerstellungszeit und der Aufwand sehr gering. Dennoch sind mit diesem Verfahren objektive Aussagen bezüglich der Machbarkeit möglich.

Dadurch, daß nur sehr wenig Informationen über den Umformprozeß in die Simulation einfließen, sind die Simulationssaussagen nicht so genau wie bei inkrementellen Verfahren. Außerdem können auf Basis einer Simulation mit einem Einschrittverfahren noch keine Aussagen bezüglich des Ablaufs des Umformprozesses getroffen werden.

Die Simulationsanwendung AUTOFORM wird derzeit bei der Karosserie-

Abb. 4.1

Ergebnis einer Umformsimulation mit einem Einschrittverfahren (AUTOFORM)



entwicklung während der frühen Phase eingesetzt. Hier wird das Einschrittverfahren zur Lösung der Umformsimulation eingesetzt.

4.2.2 Inkrementelle Simulationsverfahren

Bei der inkrementellen [4.2] Simulation (Abb 4.2) des Tiefziehprozesses wird der gesamte Prozeß der Blechumformung mit allen Umformoperationen vom ebenen Blechzuschnitt bis zum fertigen Karosseriebauteil abgebildet.

Dieses Verfahren erfordert daher sehr genaue Informationen über die eingesetzten Werkzeuge und Prozeßschritte. Daher werden diese Verfahren primär zur Absicherung des Umformprozesses eingesetzt.

Bei der inkrementellen Umformsimulation werden alle Vorgänge des Fertigungsprozesses in inkrementellen Schritten simuliert. Die Größe der Inkremente ist dabei abhängig vom ein-

gesetzten Lösungsverfahren und der geforderten Genauigkeit der Simulationsergebnisse. Häufig kommen dabei explizite Berechnungsverfahren wie bei der Crash-Simulation zum Einsatz.

Mit inkrementellen Verfahren läßt sich der Umformprozeß als solches simulieren. Es werden dabei alle nichtlinearen Effekte, wie z.B. Kontakt, Reibung und Verfestigung des Blechwerkstoffs berücksichtigt.

Für diese Simulation sind CAD-Flächendaten aller Aktivflächen der Umformwerkzeuge erforderlich. Des weiteren sind alle wesentlichen Prozeßparameter wie Reibung, Blechhalterkräfte und ihre Einleitung in den Blechhalter, Platinezuschnitt und Lage im Werkzeug sowie die Werkzeugkinematik zu berücksichtigen. [4.8]

Dadurch kann eine sehr hohe Genauigkeit der Ergebnisse erreicht werden. Zusätzlich ist eine detaillierte Untersuchung und Qualifizierung des Prozesses möglich. Das inkrementelle Verfahren

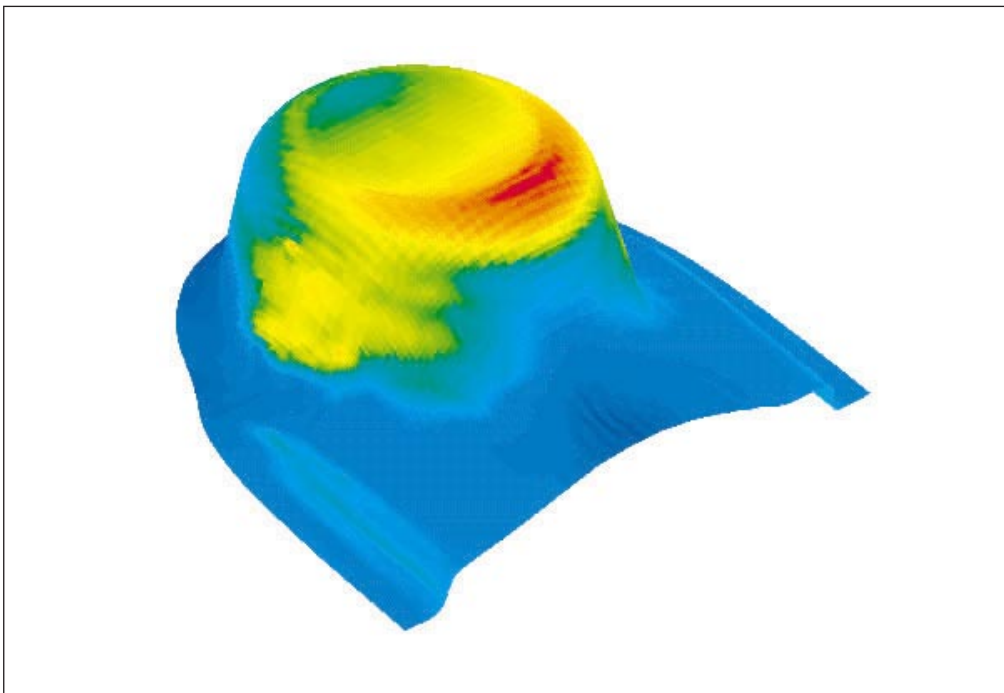


Abb. 4.2

Ergebnis einer Umformsimulation mit einem inkrementellen Verfahren (PAM-STAMP)

eignet sich auch für mehrstufige Umformprozesse.

Die höhere Genauigkeit erfordert jedoch sowohl bei der Eingabe als auch bei der Simulation ein Vielfaches des Aufwands gegenüber den Einschrittverfahren. Zudem werden Informationen benötigt, die häufig erst sehr spät im Entwicklungsprozeß verfügbar sind. Inkrementelle Verfahren werden daher hauptsächlich für die späte Absicherung und Werkzeugplanung und dort aus Kostengründen auch nur bei einzelnen besonders kritischen Bauteilen eingesetzt.

Im Softwarepaket PAM-STAMP [4.2] wird das inkrementelle Verfahren für die Umformsimulation eingesetzt. Dieses Programm ist bei der Fahrzeugentwicklung weit verbreitet.

4.2.3 Simulationsergebnisse der Umformsimulation

Bei der Umformsimulation können je nach dem verwendeten Verfahren alle wesentlichen Prozeßeinflüsse ermittelt werden. Die FEM-Simulation liefert damit sowohl Aussagen zur Machbarkeit (Herstellbarkeit) eines bestimmten Bauteils als auch Randbedingungen für den optimalen Fertigungsprozeß des betrachteten Bauteils.

Zusätzlich können eine Reihe von Eigenschaften verteilt über die Bauteilgeometrie ausgewertet werden:

- Blechdickenverteilung
- Verteilung der Orientierung und Größe der plastischen Hauptdehnungen
- Verteilung der Haupt- und Vergleichsspannungen (Eigenspannungen)

- Prognose bezüglich Reißen und Faltenbildung
- Werkzeugkräfte (Niederhalter)
- Materialfluß während der Umformung
- Auffederungsverhalten.

Nicht alle der genannten Parameter lassen sich mit einer Berechnung nach dem Einschrittverfahren zuverlässig ermitteln. Insbesondere das Auffederungsverhalten und der Materialfluß während der Umformung lassen sich nur mit einer inkrementellen Simulation berechnen.

Für die Betriebslastauslegung sind jedoch die ersten beiden Punkte entscheidend. Die Blechdickenverteilung und der Dehnungszustand eines Bauteils lassen sich von einem erfahrenen Berechner in der geforderten Güte für die meisten Bauteile auch mit einer Einschrittberechnung ermitteln.

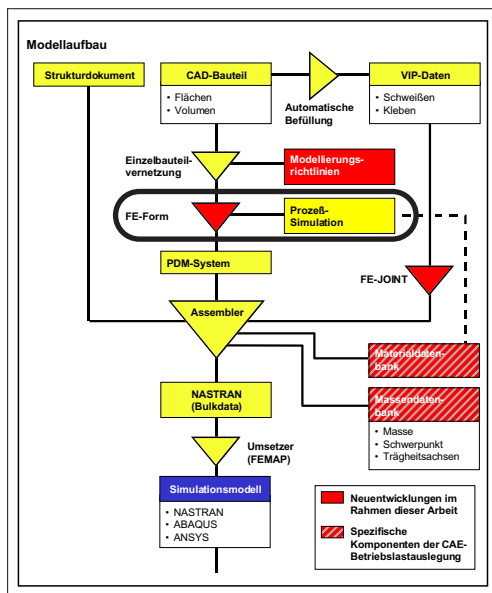
Die Anforderungen an die Berechnung der Prozeßeinflüsse muß dabei vor dem Hintergrund der Randbedingungen der Betriebslastauslegung gesehen werden. Zu dem Zeitpunkt, zu dem die Betriebslastauslegung durchgeführt wird, gibt es noch keine genauen Informationen über den Fertigungsprozeß. Außerdem müssen vielfach mehrere verschiedene Varianten innerhalb von kürzester Zeit rechnerisch beurteilt werden.

Bisher wurde bei diesen Untersuchungen keine Prozeßinformation berücksichtigt. Die Simulationen wurden bisher auf Basis der Nennblechdicken, die den Zeichnungen entnommen wurden, und dem Materialverhalten des unverformten Grundwerkstoffs durchgeführt.

Die Einschrittverfahren sind daher ein sehr gutes Hilfsmittel, um während der frühen Auslegungsphasen der Fahr-

zeugentwicklung den Fertigungsprozeß näherungsweise mit einer für diesen Prozeßabschnitt hinreichenden Genauigkeit bei der Festigkeitsauslegung zu berücksichtigen.

4.3 Integration der Tiefziehsimulation in den Prozeß Betriebslastauslegung



Um die Einflüsse des Umformprozesses bei der Betriebslastauslegung zu berücksichtigen, müssen die Ergebnisse der Tiefziehsimulation in das FE-Modell der Festigkeitsauslegung übertragen werden. Dazu müssen die bei der Umformsimulation berechneten Abstreckungen und Verfestigungen in das Modell der Betriebslastauslegung übernommen werden.

Hier kommen jedoch die großen Unterschiede zwischen den Vernetzungsstrategien der Prozeßsimulationen und der Festigkeitsberechnung zum tragen. Bei den Berechnungsmodellen der Prozeßsimulation wird eine völlig

andere Vernetzungsstrategie und Elementierung als bei der Betriebslastauslegung eingesetzt, was die direkte Übertragung der Ergebnisse aus der Prozeßsimulation erheblich erschwert.

Das FE-Netz der Tiefziehsimulation in AUTOFORM ist ein reines Dreiecksnetz. Dreiecksschalenelemente sollten jedoch bei der Festigkeitsauslegung nach Möglichkeit vermieden werden, um zuverlässige Spannungsaussagen machen zu können.

Dies bedeutet, daß unterschiedliche FE-Netze für die beiden Untersuchungen zum Einsatz kommen müssen, die für die jeweilige Simulation optimiert sind. Damit muß aber bei der Übertragung der Ergebnisse der Prozeßeinflüsse zwischen den zwei unterschiedlichen FE-Modellen interpoliert werden.

Hierfür wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Schnittstelle entwickelt, mit der die Parameter der Umformsimulation räumlich zwischen zwei unterschiedlichen FE-Netzen interpoliert werden können. Der räumliche Interpolationsalgorithmus und die Vorgehensweise, wie die Ergebnisse der Umformsimulation über bestimmte Bereiche gemittelt werden, sind die wichtigsten Bestandteile der hier vorgestellten Schnittstelle.

Das bei dieser Schnittstelle eingesetzte Interpolationsverfahren verwendet als Suchkriterium die Koordinaten der Knoten des Ziel-FE-Netzes (Festigkeitsmodell). Für jeden Knoten des Ziel-FE-Netzes wird das am nächsten gelegene Element aus der Tiefziehsimulation gesucht. Um die Materialveränderungen auf die Elemente des Ziel-FE-Netzes zu übertragen, werden die Eigenschaften des jeweiligen Elements der Umformsimulation bestimmt und können dann knotenweise in das Festigkeitsmodell übertragen werden.

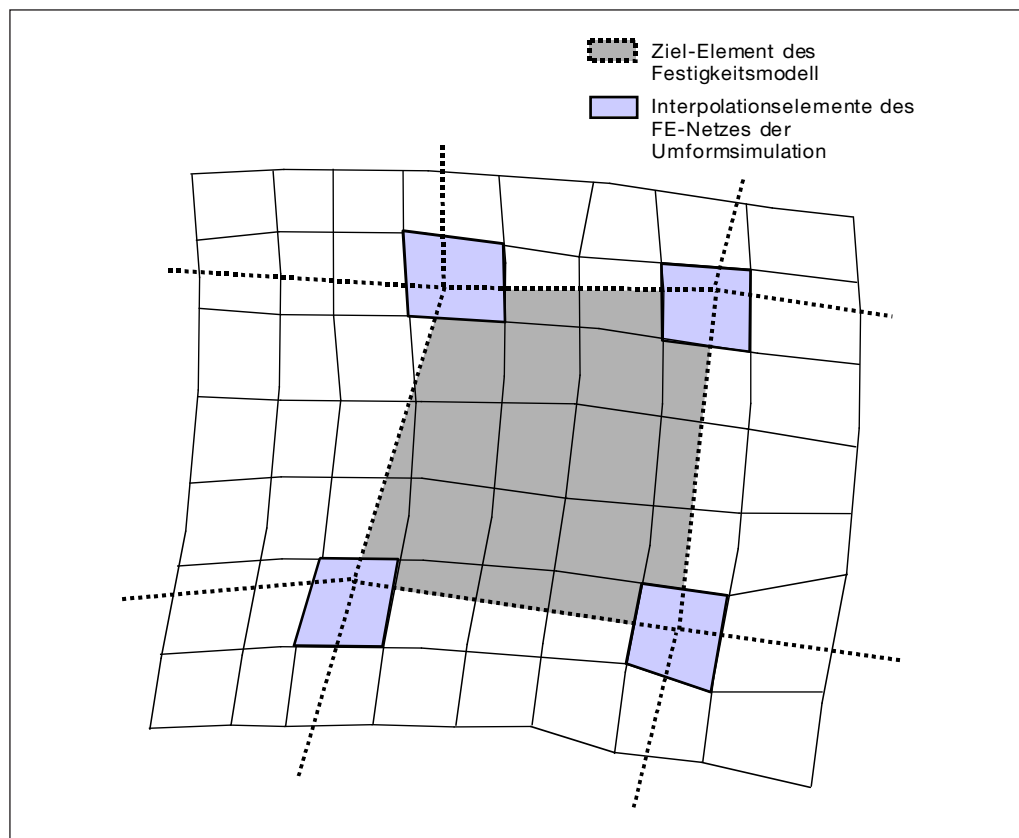
4.3.1 Anforderungen an das Schnittstellenprogramm FE-FORM

Bei der Entwicklung der ersten Version des Schnittstellenprogramms FE-FORM mußten eine Reihe von Randbedingungen festgelegt werden, um die Komplexität zunächst gering zu halten. Ein Teil dieser Randbedingungen werden für spätere Programmversionen verändert, um weitere Anforderungen bei der Betriebslastauslegung zu berücksichtigen.

- Zwischen den FE-Modellen der Prozeßsimulation und der Betriebslastauslegung müssen die Ergebnisse räumlich interpoliert werden (Abb. 4.3).
- In der frühen Entwicklungsphase wird nur die Abstreckung (Blechkickenverteilung) und Verfestigung auf das Betriebslast-FE-Modell für die elasto-plastische Simulation übertragen.
- Die Verfestigung wird durch eine Modifikation der Fließkurve bei der Festigkeitsauslegung berücksichtigt (Abb. 4.4).
- Die unterschiedlichen Verfestigungszustände werden nicht elementweise im Zielmodell angelegt, sondern in Stufen ($n=10$) zusammengefaßt, um die Anzahl der erzeugten Materialkarten zu begrenzen und die Modelle übersichtlich zu halten (Abb. 4.5).
- Analog wird die Blechdicke in Stufen im ANSYS-Modell definiert (Abb. 4.6).
- Die durch den Umformprozeß entstehende Anisotropie wird in der ersten Programmversion noch nicht berücksichtigt. (Im Zielmodell werden nur isotrope Materialien angelegt.)

Abb. 4.3

Interpolation zwischen den FE-Netzen der Festigkeitssimulation und der Umformsimulation



4.3.2 Rahmenbedingungen der Betriebslastauslegung für die Tiefziehsimulation

Der Grund, weshalb die Abstreckung und die Verfestigung in der ersten Programmversion nur in Stufen übertragen wurden, hängt mit der Übertragung und Definition der Prozeßparameter in ANSYS zusammen.

Da die Blechdicken in ANSYS nicht direkt in der Elementkarte, sondern in einem getrennten Realset definiert werden, müßte für eine stufenlose Blechdickenverteilung für jedes Element ein eigenes Realset angelegt werden. Dies würde die Modelle sehr unübersichtlich machen und die Auswahl von einzelnen Materialien oder Bauteilen sehr erschweren. Durch Einteilung in 10 Blechdickenklassen kann die Anzahl der Realsets gering gehalten werden.

Bei der Einteilung der Materialien waren ähnliche Gründe wie bei der Abstreckung entscheidend für die Einteilung in verschiedene Klassen. Auch hier kann die Zahl der Materialarten durch die Klassenbildung gering gehalten werden.

Für die nächste Ausbaustufe der Tiefziehschnittstelle wird jedoch eine deutliche Verbesserung in diesem Bereich vorgesehen. Diese Erweiterung wurde vom Verfasser bereits angedacht, aber nicht in den Umfang dieser Arbeit aufgenommen. Dabei soll durch die Erweiterung von ANSYS die knotenweise Definition von Blechdicken möglich werden. Außerdem wird bei den Elementoptionen eine Möglichkeit erstellt, den Verfestigungszustand elementweise zu definieren.

Unterstützt wurden in der ersten Programmversion Ergebnisse aus Tiefziehsimulationen von AUTOFORM und

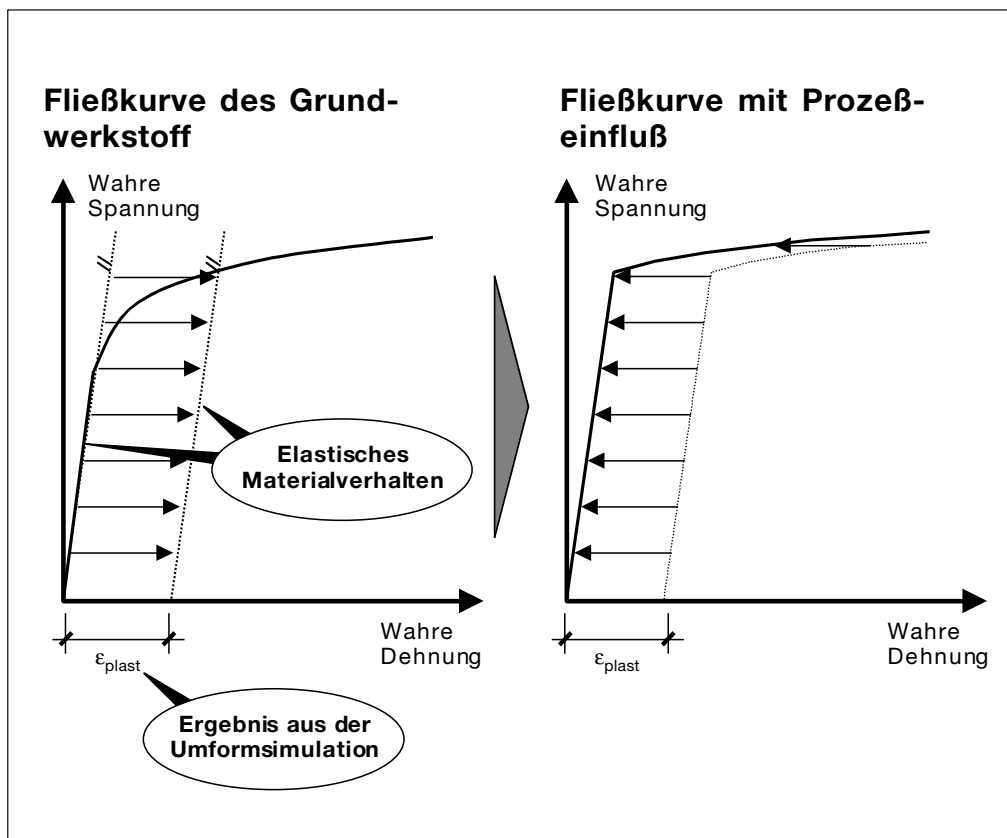


Abb. 4.4

Modifikation der Fließkurve des Grundwerkstoffs für die elasto-plastische Betriebslastauslegung

Abb. 4.5

Stufenweise Verteilung der Abstreckung in einem ANSYS-Simulationsmodell

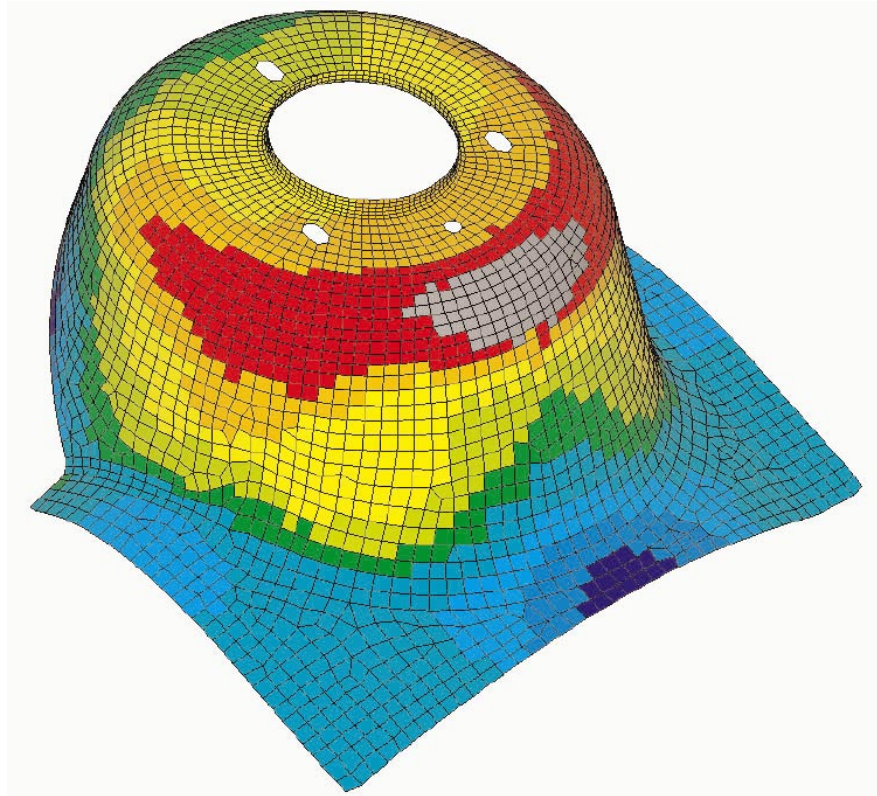
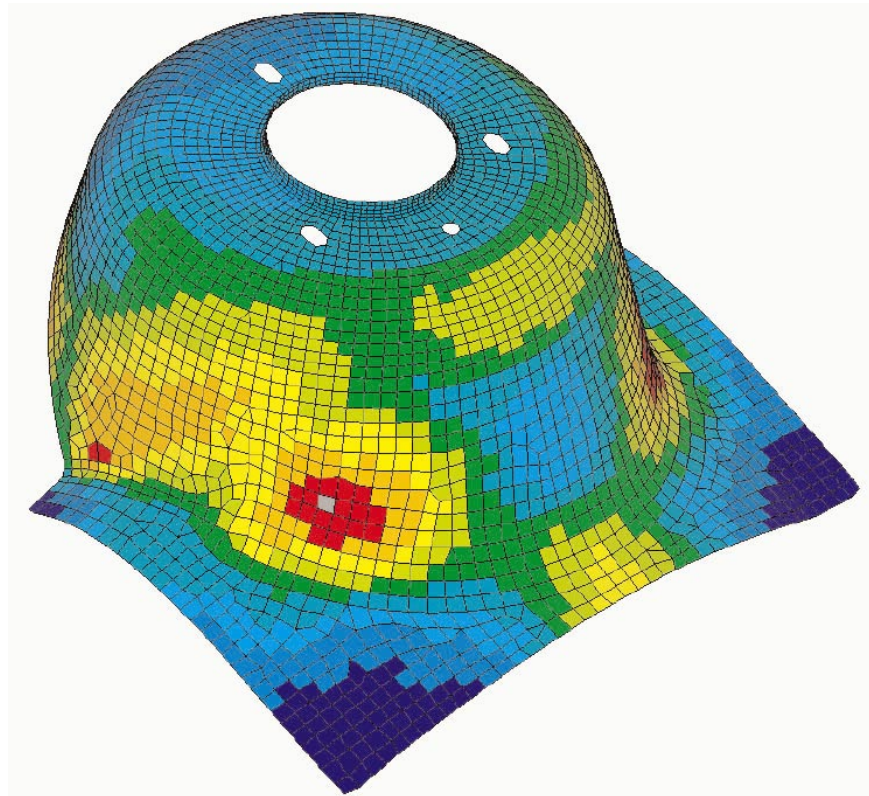


Abb. 4.6

Stufenweise Verteilung der Verfestigung in einem ANSYS-Simulationsmodell



PAM/STAMP. Damit ist die Schnittstelle sowohl für inkrementelle Verfahren als auch für Einschrittverfahren geeignet. Um FE-FORM für andere Fertigungsprozesse zu erweitern, muß einzig die Importschnittstelle für ein anderes Simulationsprogramm erweitert werden.

Für die Festigkeitssimulation wurde zunächst die Schnittstelle zu ANSYS vorgesehen, wobei die Erweiterung für ABAQUS und MSC/NASTRAN für die nächste Ausbaustufe von FE-FORM vorgesehen sind. Eine Erweiterung für andere FE-Programme ist mit geringem Aufwand möglich. Der Umfang der Daten, die dabei übertragen werden können, hängt im wesentlichen von der Verwaltung der Blechdicken und Materialien in den jeweiligen Programmen ab.

4.3.3 Modifikation der Fließkurven auf Basis der Ergebnisse der Umformsimulation

Um das Verfestigungsverhalten bei der elasto-plastischen Festigkeitssimulation zu berücksichtigen, wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem die Fließkurve des Grundwerkstoffs entsprechend der Vorbelastung/ Verfestigung aus dem Umformprozess modifiziert wird.

Die Modifikation der Fließkurven wurde auf Basis eines Effektes durchgeführt, der bei den Materialversuchen, die im Rahmen dieser Arbeit gemacht wurden (Anhang I), beobachtet wurde.

Bei statischen Zugversuchen an zyklisch vorbelasteten Proben wurde untersucht, wie sich das Spannungs-Dehnungsverhalten (Abb. 4.7) auf Grund der Vorbelastung verändert. Dazu wurden Proben durch mehrere Schläge plastisch vorbelastet und anschließend in einem Zugversuch bis zum Bruch belastet. Ziel dieser Untersuchungen war es, das durch große zyklische Belastungen

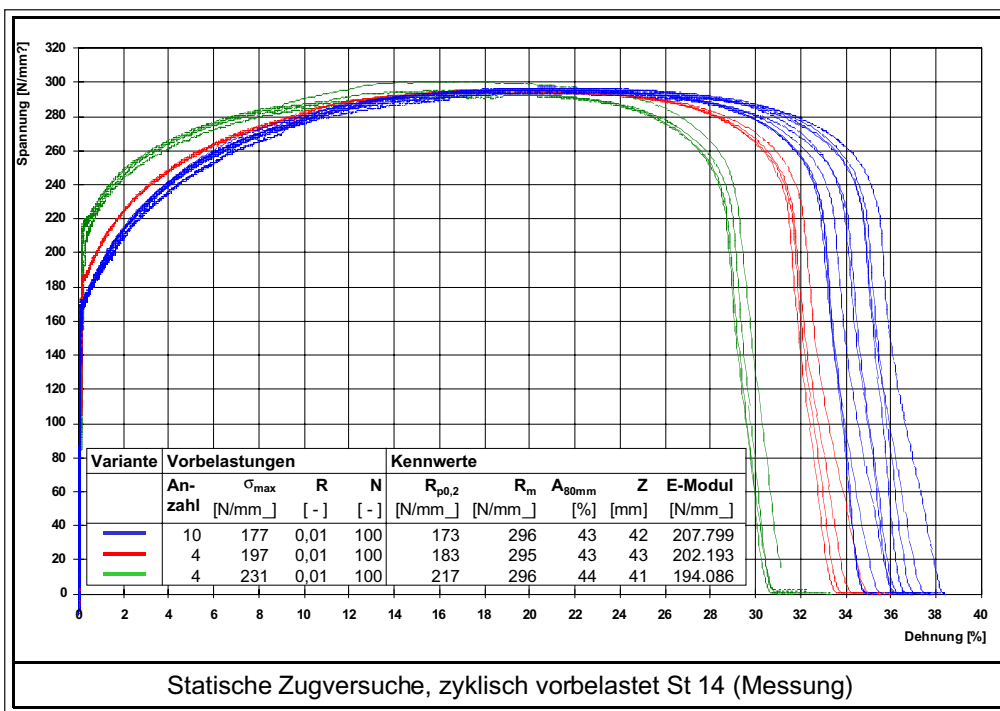
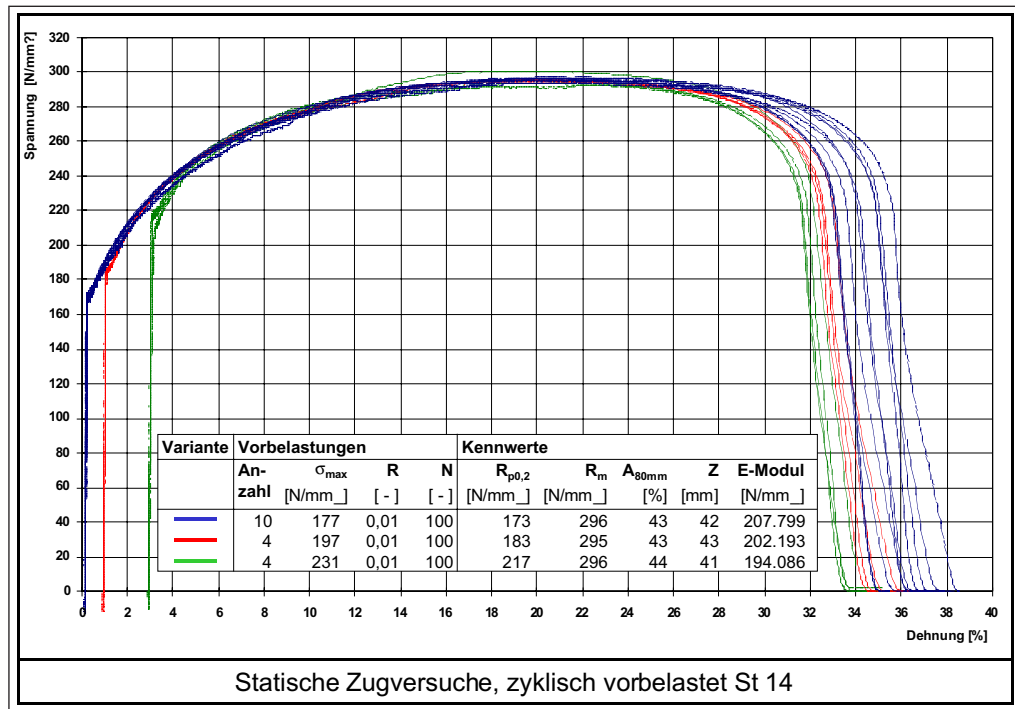


Abb. 4.7
Werkstoffverhalten nach plastischer Vorbelastung

Abb. 4.8

Werkstoffverhalten nach plastischer Vorbelastung (verschobene Darstellung der Versuchsergebnisse)



veränderte Werkstoffverhalten zu bestimmen.

Die Verläufe der Spannungs-Dehnungslinien zeigten dabei nach der zyklischen Vorbelastung einen deutlich erweiterten elastischen Bereich. Die Fließkurve verläuft dabei nach der Vorbelastung bis zum maximalen Spannungsniveau der Vorbelastung weitgehend elastisch. Wird die Belastung weiter über dieses Niveau gesteigert, gleicht sich der weitere Verlauf des Zugversuchs dem Verhalten des Grundwerkstoffs an.

Dieser Effekt ist sehr deutlich in Abbildung 4.8 zu erkennen. In dieser Auswertung wurden die gemessenen Fließkurven aus Abbildung 4.7 um den Wert der plastischen Vorbelastung auf der Dehnungs-Achse verschoben dargestellt. Hier läßt sich deutlich erkennen, wie sich das Spannungs-Dehnungsverhalten aufgrund der Vorbelastung verändert.

Wichtig für die Übertragung auf die Situation beim Umformen ist ein weiterer Effekt, der bei diesen Untersuchungen

beobachtet wurde. Bei der Durchführung der zyklischen Vorbelastung fiel auf, daß sich der Verlauf der Hysteresen und die Kraft der Prüfmaschine bereits nach der zweiten Belastung weitestgehend stabilisierte (Abb. 4.9). Dies bedeutet, daß sich das Werkstoffverhalten bereits nach einer einmaligen Belastung – wie sie bei der Umformung auftritt – so einstellt, wie bei einer wiederholten zyklischen Belastung des Werkstoffs.

Ausgehend von diesen Versuchen wurde die Modifikation der Fließkurven (Abb. 4.4) auf Basis der plastischen Dehnung nach der Umformung abgeleitet. Dabei wurde das Verfahren an die Randbedingungen des derzeit bei elasto-plastischen Berechnungen verwendeten Materialmodells angepaßt.

Momentan wird ein isotropes Materialmodell (Anhang I) bei der elasto-plastischen Berechnung eingesetzt. Dieses Materialmodell eignet sich nur für Berechnungen mit einer einmaligen Belastung. Es ist ein sehr einfaches Modell, das im wesentlichen durch eine

einzigste Geschichtsvariable beschrieben wird. Bei der plastischen Belastung wird die Veränderung der räumlichen Fließfläche einzig durch den Zylinderradius beschrieben. Der Radius der Fließfläche entspricht dabei der plastischen Dehnung.

Die Modifikation des Materialmodells (Abb. 4.4) führt zu einem vergrößerten elastischen Bereich und damit zu einer vergrößerten Fließfläche. Damit wird die Variable des isotropen Materialmodells vorab modifiziert. Im nichtlinearen FE-Programm ist damit keine weitere Eingabe erforderlich.

Als Einschränkung für den Einsatz dieses Verfahrens ist zu berücksichtigen, daß das Materialverhalten immer nur auf den einachsigen Zustand zurückgeführt wird. Effekte, die durch veränderte Beanspruchungsrichtungen bei der Umformung und der späteren Belastung auftreten können, werden hierbei nicht erfaßt. Hierfür ist sowohl das isotrope Materialmodell als auch die Verwendung einer einzigen Geschichtsvariablen nicht ausreichend. Bei der Betriebslastaus-

legung werden jedoch im wesentlichen nur einzelne Lastereignisse betrachtet und nur selten Belastungsfolgen.

Um das Verhalten bei mehrachsigen plastischen Dehnungszuständen zu erfassen, müßte ein Materialmodell verwendet werden, das die Belastungsrichtung mit verfolgt.

4.4 Die Tiefziehschnittstelle FE-FORM

FE-FORM wurde als Schnittstelle zwischen der Simulation des Fertigungsprozesses und der Betriebslastsimulation entwickelt. Das Programm wurde bei der Entwicklung modular aufgebaut, um zukünftige Erweiterungen für weitere Materialmodelle und Simulationsanwendungen mit geringem Aufwand integrieren zu können. Die Entwicklung von FE-FORM lief in mehreren Ausbaustufen, die sich aus der produktiven Arbeit mit dem Tool entwickelten.

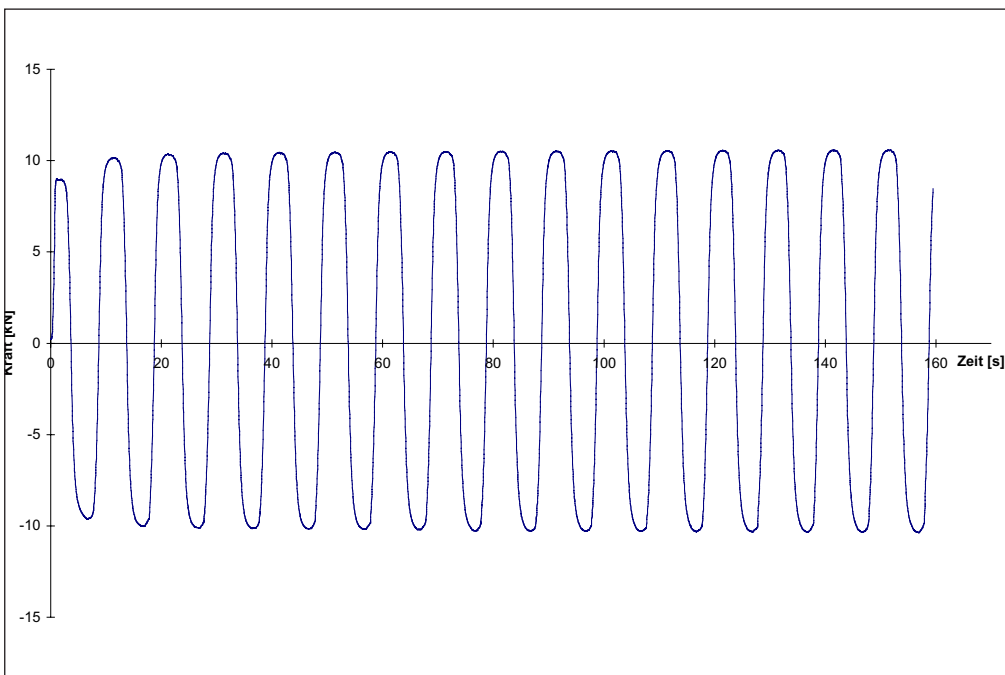


Abb. 4.9

Stabilisierung des Werkstoffverhaltens bei wiederholter plastischer Belastung

Der wesentliche Grund, warum diese Schnittstelle überhaupt erforderlich war, leitet sich aus der unterschiedlichen Modellierungsphilosophie bei der Simulation des Fertigungsprozesses und der Betriebslastauslegung her. Da sich die FE-Modelle für die Tiefziehsimulation und für die nichtlineare FE-Berechnung, in mehreren entscheidenden Punkten stark unterscheiden, ist eine räumliche Interpolation zwischen den beiden Modellen erforderlich.

AUTOFORM verwendet ausschließlich 3-Knoten Schalenelemente, während bei der nichtlinearen FE-Berechnung gemischte Netze, bestehend aus 4- und 3-Knoten Schalenelementen, zum Einsatz kommen. Zudem unterscheidet sich die Netzfeinheit, d. h. die Zahl der verwendeten Elemente, in unterschiedlichen Strukturbereichen zum Teil deutlich, da sie für beide Anwendungen beanspruchungsorientiert angepaßt werden muß.

Die beiden Modelle haben außerdem in den seltensten Fällen identische Koordinatensysteme, in denen die Modelle beschrieben und positioniert sind. Für die räumliche Interpolation ist es jedoch wichtig, daß sich die beiden Modelle in der gleichen räumlichen Lage und Orientierung befinden, da sonst keine Dateninterpolation möglich ist.

Das Modell der Prozeßsimulation entspricht zudem in der Regel auch nicht der Geometrie des Festigkeitsmodells, da für die Umformsimulation häufig Ankonstruktionen erzeugt werden und später vorhandene Öffnungen noch geschlossen sind. Außerdem erfolgt bei vielen Bauteilen nach der Umformung noch ein Faltvorgang, um die endgültige Geometrie zu erzeugen, der bei der Umformsimulation noch nicht berücksichtigt wird.

All diese Unterschiede müssen durch die Schnittstelle abgedeckt werden, um die Prozeßparameter in das Festigkeitsmodell übertragen zu können.

4.4.1 Vorgehensweise und Datenfluß in FE-FORM

Die Vorgehensweise bei der Übertragung von Prozeßdaten der Tiefziehsimulation in das FE-Modell der Betriebslastauslegung ist in Abbildung 4.10 dargestellt. Ausgangsbasis sind dabei immer die CAD-Daten des Bauteils, aus denen ein Modell für die Tiefziehsimulation und eines für die Festigkeitsberechnung mit den oben angesprochenen unterschiedlichen Elementkriterien erzeugt wird.

Danach erfolgt die Umformsimulation, um die Prozeßeinflüsse zu bestimmen. Die Ergebnisdatei dieser Simulation ist Basis für die weitere Verarbeitung in FE-FORM. Des Weiteren wird die Fließkurve, die bei der Umformsimulation zu Grunde gelegt wurde, zur Übertragung der unterschiedlichen Verfestigungen benötigt.

Beide Modelle werden als nächstes in FE-FORM eingelesen. Die Ergebnisdatei der Tiefziehsimulation beinhaltet das Modell und die Ergebnisse aus der Umformsimulation. Als Eingabedatensatz für das Modell der Betriebslastauslegung dient ein MSC/NASTRAN Bulkdatafile.

Da das Bauteil für die Umformsimulation aus seiner geometrischen Position im Fahrzeug verschoben und in die Ziehrichtung bei der Umformung orientiert wird, muß im nächsten Schritt das Modell der Umformsimulation wieder in die ursprüngliche Position im Fahrzeug verschoben werden. Dieser Schritt ist manuell sehr aufwendig und nimmt in der

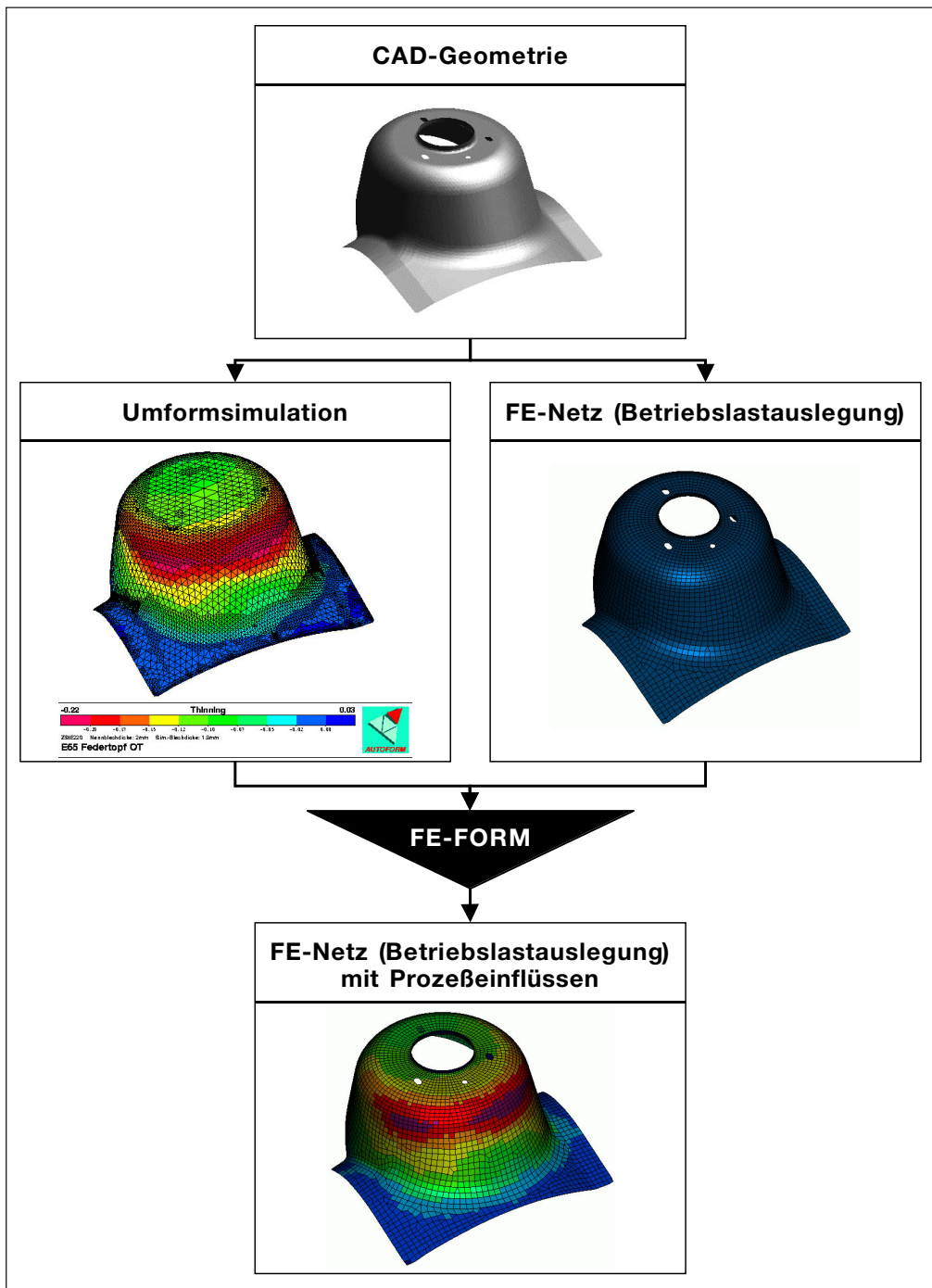


Abb. 4.10

Datenfluß in FE-FORM

Regel zu viel Zeit in Anspruch. Daher wurden mehrere Verfahren in FE-FORM integriert, die abhängig vom eingesetzten Programm der Umformsimulation diesen Prozeßschritt vereinfachen:

1. Iteratives Verfahren, bei dem der Anwender die Modelle schrittweise durch manuelles Verschieben deckungsgleich übereinander legt. Hier erfolgt die

Verschiebung durch Kontrolle am Bildschirm. Dieses Verfahren ist am aufwendigsten und kann je nach Bauteil sehr viel Zeit in Anspruch nehmen.

2. FE-FORM bestimmt automatisch eine Transformationsmatrix, um die Modelle in eine identische geometrische Position zu bringen. Dieses Verfahren läuft voll automatisch ab. Die Transfor-

mationsmatrix für die Verschiebung wird dazu auf Basis der unterschiedlichen Schwerpunktlagen und der Orientierung der Trägheitsachsen berechnet. Mit diesem Verfahren können allerdings nur dann gute Ergebnisse erzielt werden, wenn die Geometrien der Modelle identisch sind. Da dies nur sehr selten der Fall ist, kann dieses Verfahren nicht oft eingesetzt werden.

3. Die Transformationsmatrix wird direkt aus Autoform in FE-FORM eingelesen, um damit die geometrische Verschiebung durchzuführen. Dazu muß nach der Definition der Ziehrichtung in Autoform die Transformationsmatrix gespeichert werden. Dieses Verfahren ist das zuverlässigste Verfahren und erfordert den geringsten Eingabeaufwand. Allerdings läßt es sich derzeit nur in Kombination mit Autoform einsetzen.

Anschließend werden von FE-FORM die Prozeßeinflüsse aus der Tiefziehsimulation auf das Berechnungsmodell für die nichtlineare Festigkeitsberechnung mit Hilfe des Interpolationsverfahrens übertragen.

4.4.2 Übertragung der Abstreckung

Die Abstreckung (Blechdickenverteilung) läßt sich auf unterschiedliche Weise in die Simulationsmodelle der Betriebslastauslegung übertragen. Hier muß die Definition der Blechdicke in dem jeweiligen Simulationsprogramm beachtet werden. Dabei gibt es im wesentlichen zwei Definitionsmöglichkeiten.

Zum einen kann die Blechdicke knotenweise in der Elementkarte definiert werden (MSC/NASTRAN, ABAQUS) oder zum anderen getrennt in einem Realset festgelegt werden, das dann bestimmten Elementgruppen zugeord-

net wird. In ANSYS wird die Blechdicke in einem getrennten Realset definiert. Um die Übersichtlichkeit im Simulationsmodell zu erhalten, sollte die Anzahl der Realsets dabei nicht zu groß werden.

Um die Blechdicke element- bzw. knotenweise unterschiedlich zu definieren, müsste für jedes Element ein eigenes Realset angelegt werden. Die große Anzahl der Realsets würde dabei die Handhabung der Modelle sehr unhandlich machen. Außerdem würde die Auswahl von einzelnen Bauteilen über die Realsetnummer schwierig.

Daher wurde in der ersten Version von FE-FORM, die dieser Arbeit zu Grunde liegt, die Blechdicke in zehn Stufen auf das Festigkeitsmodell übertragen. Dazu wird die Bandbreite der Abstreckungen in zehn gleiche Stufen eingeteilt. Die Elemente, die in eine dieser Klassen fallen, erhalten dann die mittlere Blechdicke dieser Klasse zugewiesen. Die dabei entstehende Unschärfe gegenüber der genauen Blechdickenverteilung hat in Vergleichsrechnungen nur geringe Einflüsse auf die Ergebnisse gehabt.

Für die zweite Version von FE-FORM wird vom Verfasser eine Erweiterung von ANSYS angedacht, die eine knotenweise Übertragung der Blechdicken ermöglicht. Dabei wird die Blechdicke nicht mehr in einem Realset definiert, sondern direkt in der Elementkarte. Das Realset hat damit für Schalenelemente in ANSYS keine Funktion mehr. Zusätzlich muß die ANSYS-Schnittstelle in FE-FORM für diese Erweiterung angepaßt werden.

4.4.3 Übertragung der Verfestigung

Auch für die Übertragung der Verfestigung wird in dieser Arbeit eine Lösung vorgesehene, die keine Anpassung von ANSYS erfordert (Kapitel 4.3.3). Die Verfestigung wird dazu in der ersten Programmversion durch modifizierte Fließkurven abgebildet. Dabei werden ähnlich wie bei der Abstreckung zehn Elementgruppen gebildet, die eine ähnliche Verfestigung aufweisen.

Vom Verfasser ist bereits eine Erweiterung von ANSYS angedacht, die es ermöglicht, ein wesentlich leistungsfähigeres Materialmodell für die Schnittstelle FE-FORM zu verwenden. Dabei wird ein Materialmodell, das nach der kinematischen Verfestigung arbeitet, eingesetzt werden.

Dies ermöglicht es, deutlich mehr Parameter aus dem Umformprozeß in das FE-Modell der Betriebslastauslegung zu übertragen. So kann zum Bei-

spiel die bei der Umformung entstehende Anisotropie im Material berücksichtigt werden. Außerdem ist es dann möglich, Belastungsfolgen zu untersuchen.

Zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit, hat der Verfasser die beschriebene Erweiterung von ANSYS noch nicht fertiggestellt, so daß sich die weiteren Untersuchungen auf die zuerst beschriebene Vorgehensweise beschränken. Dies erscheint unbedenklich, da im derzeitigen Auslegungsprozeß nur einmalige statische Belastungen untersucht werden. Für diese Inhalte genügen die Annahmen der hier vorgestellten ersten Version von FE-FORM.

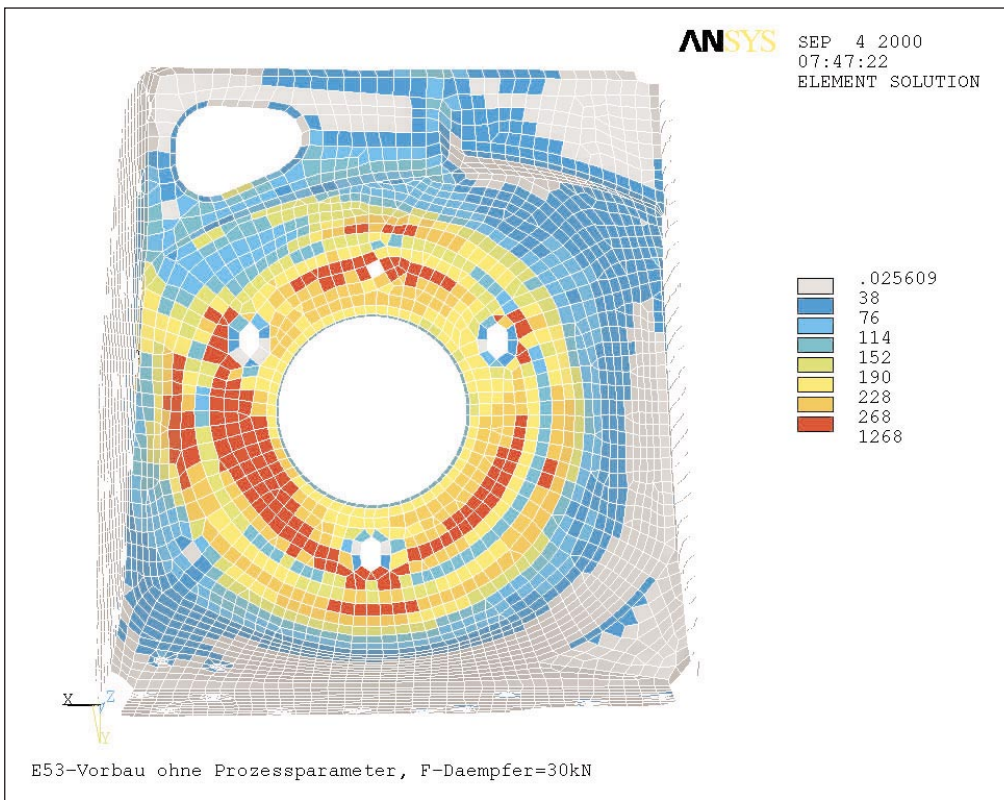


Abb. 4.11

Ergebnis der elasto-plastischen Simulation ohne Prozeßeinflüsse (von-Mises-Vergleichsspannungen)

Abb. 4.12

Ergebnis der elasto-plastischen Simulation mit Prozesseinflüssen (von-Mises-Vergleichsspannungen)

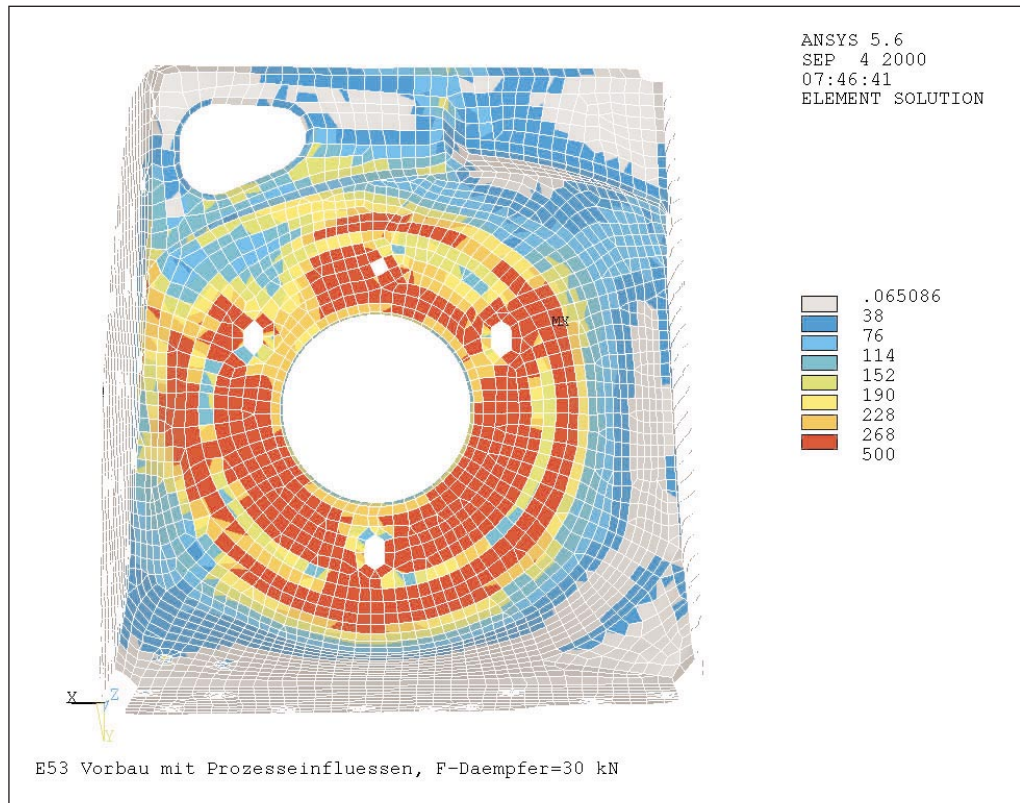
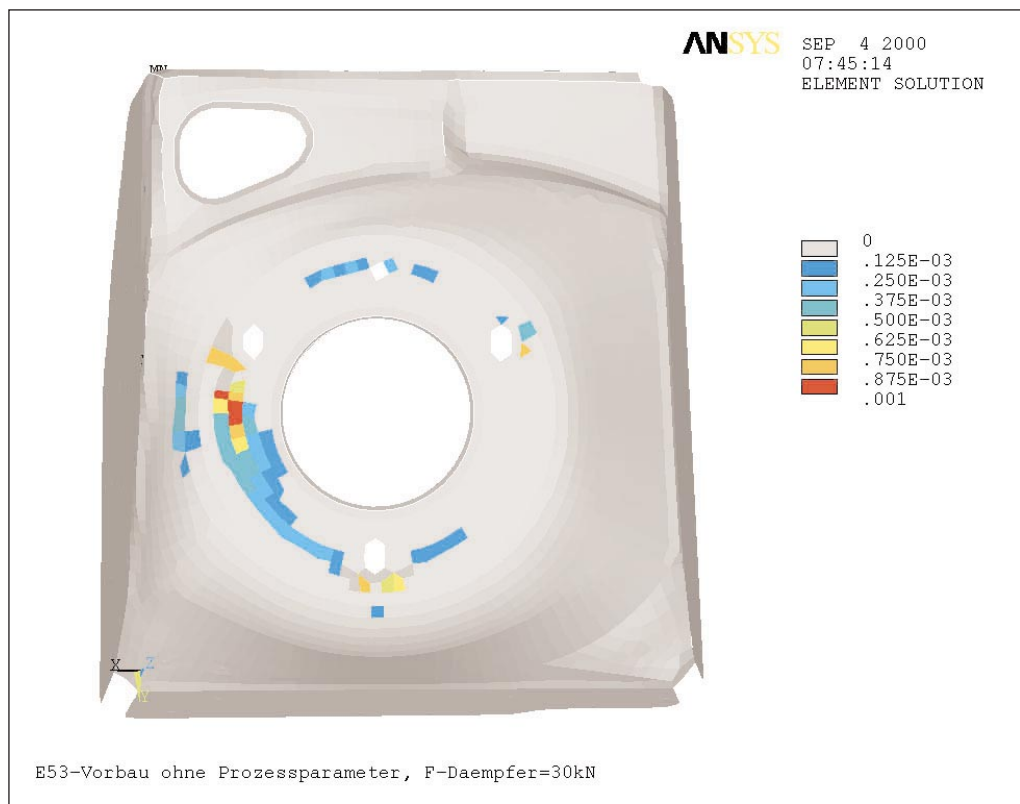


Abb. 4.13

Ergebnis der elasto-plastischen Simulation ohne Prozesseinflüsse (plastische Vergleichsdehnungen)



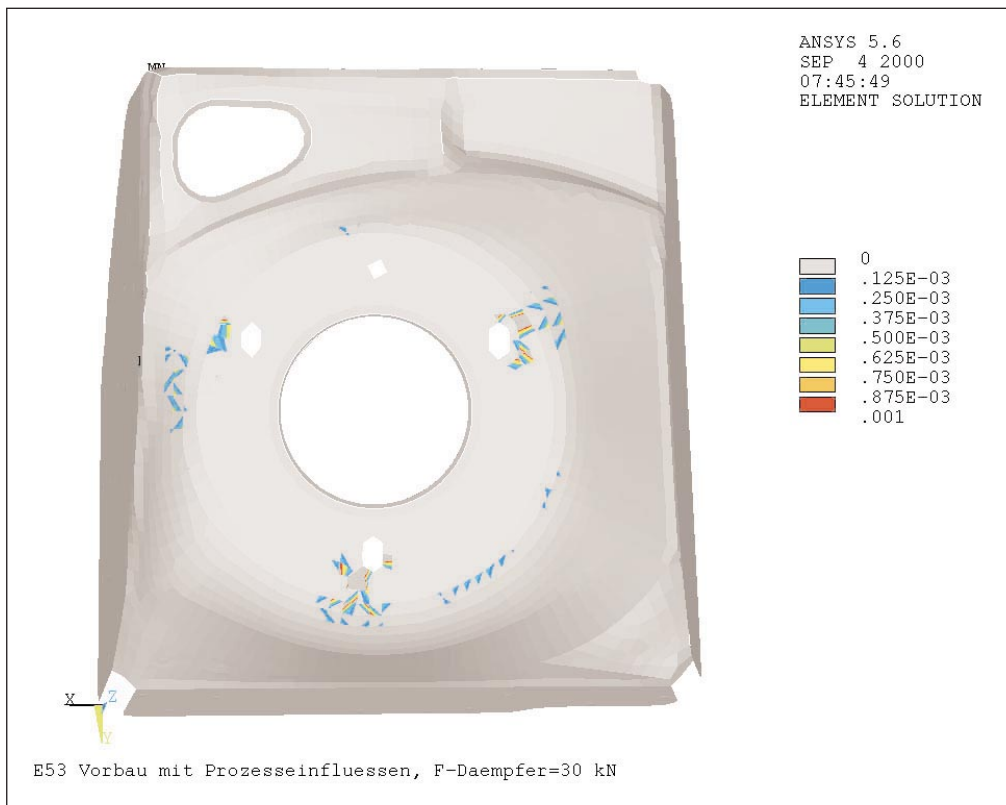


Abb. 4.14

Ergebnis der elasto-plastischen Simulation mit Prozeßeinflüssen (plastische Vergleichsdehnungen)

4.5 Einfluß des Umformprozesses bei statischen Betriebsbeanspruchungen

Um den Einfluß der veränderten Materialparameter aus dem Umformprozeß zu untersuchen, wurden Vergleichsrechnungen am halben Vorderwagen durchgeführt. Dazu wurden zwei elasto-plastische FE-Simulationen für einen Extremlastfall gemacht.

Dieser Lastfall wurde bewußt höher als die bei diesem Fahrzeug real auftretenden Belastungen gewählt, um eine deutliche plastische Beanspruchung in den Bauteilen zu erzeugen. Bei niedrigen, im wesentlichen elastischen Belastungen, war nur mit geringen Unterschieden zwischen den beiden Varianten zu rechnen.

Es zeigte sich, daß durch die höhere Verfestigung im Modell mit Prozeßeinflüssen die Spannungen gegenüber der Basisvariante ansteigen (Abb.

4.11, 4.12). Die plastischen Dehnungen (Abb. 4.13, 4.14) sinken jedoch.

Dieser Effekt wird im wesentlichen durch den bei der Verfestigung vergrößerten elastischen Bereich des Materials erzeugt. Interessant in diesem Zusammenhang ist, daß sich die durch die Abstreckung und Verfestigung entstehenden Veränderungen in bestimmten Bereichen kompensieren. Für die prognosesichere Festigkeitsauslegung sollte jedoch der Umformprozeß berücksichtigt werden.

Die Steifigkeit des Systems bleibt dabei nahezu unverändert. Hier wirken die Effekte aus Verfestigung und Abstreckung gegeneinander und heben sich bei diesem Beispiel auf.

Zusammenfassung und Ausblick

Eine CAE-basierte Entwicklung der Karosseriestruktur bietet erhebliche Vorteile gegenüber der rein versuchsbasierten Auslegung. Erst durch den durchgängigen Einsatz der Simulation während des gesamten Auslegungsprozesses können die Entwicklungsabläufe an die veränderten Rahmenbedingungen in der Automobilindustrie angepaßt werden. Gerade im Umfeld der Karosserieentwicklung ist der Einsatz von CAE-Werkzeugen entscheidend für das Erreichen der gesetzten Entwicklungsziele.

Aus diesem Grund werden bereits seit einigen Jahren CAE-Methoden im Umfeld der Crash-, Steifigkeits- und NVH-Auslegung eingesetzt. Bei der Festigkeits- und Betriebsfestigkeitsauslegung war die Reife der CAE-Werkzeuge jedoch bislang noch nicht genügend um einen produktiven Einsatz im Bereich der Karosserieentwicklung zu ermöglichen.

In diesem Bereich wurde jedoch im Laufe der letzten Jahre die Aussagegüte der Berechnungsmethoden deutlich verbessert und verschiedene neue Simulationsanwendungen entwickelt. Was bisher noch immer fehlte war ein abgestimmter Auslegungsprozeß der sämtliche Inhalte der Festigkeits- und Betriebsfestigkeitsanalyse abdeckt.

Wichtig in diesem Zusammenhang war, daß die verschiedenen Berechnungsmethoden an die Rahmenbedingungen und Anforderungen der Karosserieauslegung angepaßt und in den bestehenden Entwicklungsprozeß integriert wurden. Ohne die Vernetzung der CAE-Betriebslastauslegung mit dem Konstruktionsprozeß und der Fertigungsplanung können die neuen Simulationsmethoden nicht wirksam in einem Fahrzeugprojekt eingesetzt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher ein neuer CAE-Auslegungsprozeß

Abb. 5.1
Modellaufbau

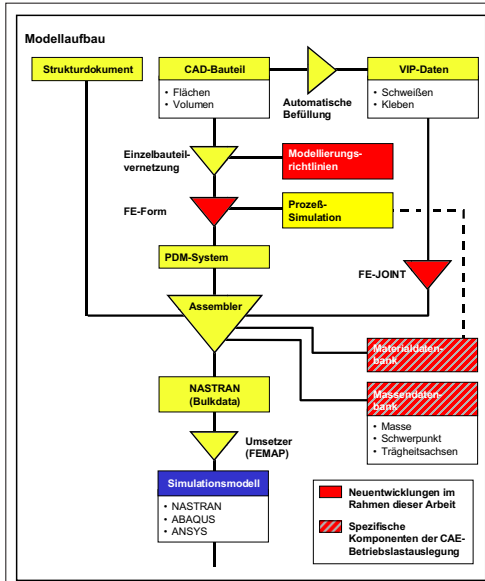


Abb. 5.2
Simulation

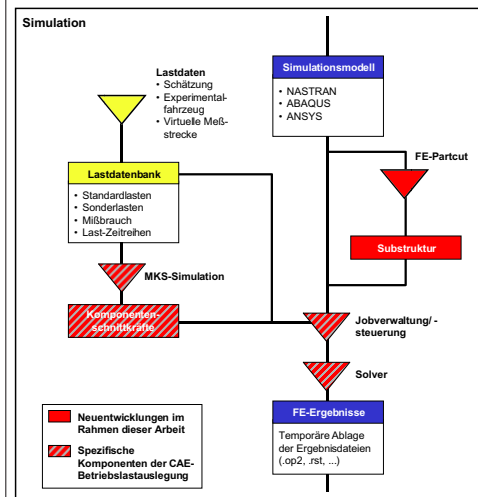
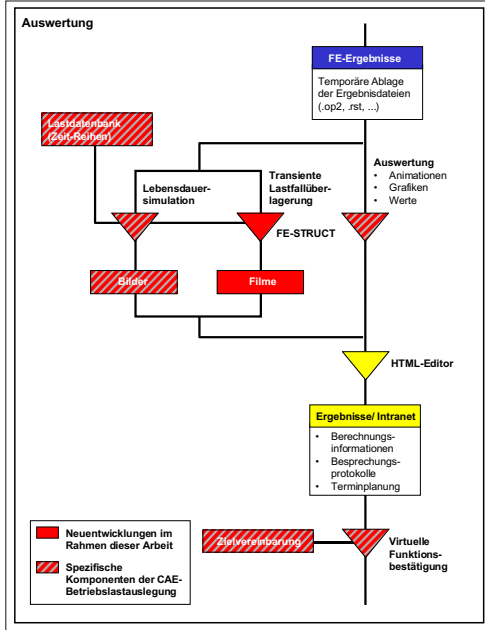


Abb. 5.3
Auswertung



(CAE-Bench Betriebslastauslegung) entwickelt. Die wichtigsten Bestandteile, die hierfür entwickelt werden mußten, waren:

- Modellaufbau (Abb. 5.1)
- Simulation (Abb. 5.2)
- Auswertung (Abb. 5.3)

Dieser Prozeß setzt sich aus bereits bestehenden Komponenten der benachbarten Auslegungsdisziplinen (Crash, NVH, Steifigkeit), die an die Anforderungen der CAE-Betriebslastauslegung der Karosseriestruktur angepaßt wurden, und aus neu entwickelten Verfahren zusammen.

Alle im Rahmen dieser Arbeit entwickelten neuen Inhalte des CAE-Bench Betriebslastauslegung wurden in Form von Softwaretools umgesetzt:

- FE-JOINT
- FE-PARTCUT
- FE-FORM

Mit Hilfe der in diesem Rahmen neu entwickelten Gössing-Schweißpunkt- abbildung (Abschnitt 2.6) wird die Kraftüber- leitung in einem Schweißpunkt realistisch abgebildet. Damit sind rechnerische Aussagen bzgl. der Festig- keit auch im Bereich von Schweißpunkten möglich. Dies ist entscheidend, um die zyklische Beanspruchungen von Bauteilflanschen bei der Lebensdauersimulation zu beurteilen. Das neue Schweißpunktersatzmodell kann mit Hilfe des Tools FE-JOINT automatisch erzeugt werden.

Für die Auslegung von lokalen Strukturbereichen ist eine möglichst geringe Größe der Berechnungsmodelle entscheidend um den Rechenaufwand zu reduzieren. Hierfür wurde ein neues Verfahren entwickelt, mit dem die Rand- bedingungen des Gesamtfahrzeugs bei der Betrachtung von Teilstrukturen

berücksichtigt werden können. Dieses Verfahren wurde in einem Softwaretool (FE-PARTCUT) umgesetzt (Abschnitt 3.2).

Es zeigte sich im Rahmen der Untersuchungen dieser Arbeit, daß für zuverlässige Aussagen bei der elasto-plastischen Simulation, der Fertigungsprozeß (Tiefziehen) bei der Simulation berücksichtigt werden muß. Hierfür wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Verfahren entwickelt und in einem Schnittstellenprogramm (FE-FORM) integriert (Abschnitt 4.3).

Diese Schnittstelle läßt sich in Zukunft für weitere Fertigungsprozesse ausbauen. Eine zusätzliche Erweiterung dieser Schnittstelle, die vom Verfasser bereits angedacht wird, ist die Berücksichtigung der Anisotropie, die während des Umformprozesses im Material auftritt. Außerdem ist die Übertragung der Eigenspannung für zukünftige Programmversionen von FE-FORM vorgesehen.

Der hier vorgestellte Prozeß stellt ein Rahmengerüst dar, das für zukünftige Erweiterungen offen gestaltet wurde. Hier ist insbesondere die Berücksichtigung von weiteren Fügeverfahren (Kleben, Nieten, Punktschweißkleben) von Interesse. Für diese Fügeverfahren müssen neue Ersatzmodelle entwickelt werden, die eine Festigkeitsauslegung ermöglichen.

Diese Arbeit hat gezeigt, daß der Einsatz der CAE-Betriebslastauslegung im Umfeld der Karosserieentwicklung möglich ist, wenn alle CAE-Methoden in einen abgestimmten CAE-Prozeß einfließen. Erst mit diesem Prozeß ist die Entwicklung eines neuen Fahrzeugs innerhalb der neuen zeitlichen Rahmenbedingungen des Reengineering möglich.

Teile der hier vorgestellten Untersuchungen (alle Softwaretools) werden bereits produktiv in Fahrzeugprojekten eingesetzt und haben ihre Leistungsfähigkeit bestätigt.

Anhang II

Literaturverzeichnis

1. Virtuelle Auslegung der Karosseriestruktur für Betriebsbeanspruchungen

- [1.1] Koewius A.
Aluminium-Spaceframe-Technologie: Der Leichtbau des Serienautomobils erreicht eine neue Dimension.
Düsseldorf: Aluminium-Verlag, Sonderdruck, 1994
- [1.2] VDI Bericht Nr. 1153, 1994
Möglichkeiten der Berechnung in der Betriebsfestigkeitsanalyse
- [1.3] Steven C. Wheelwright, Kim B. Clark
Revolutionizing Product Development – Quantum Leaps in Speed, Efficiency and Quality
- [1.4] Müller G., Groth C.
Die Methode der Finiten Elemente mit dem FE-Programm ANSYS
- [1.5] Balasubramanian, Karzenbach
Simulation im Automobilbau – von der Idee zum Kundenfahrzeug
- [1.6] Schmidt H., Lenze F.-J.
Karosserie-Leichtbau mit höherfesten Stählen
Bänder, Bleche, Rohre, Vogel Verlag, Würzburg (1997) Heft 9

2. Modellaufbau für den CAE-Prozeß

- [2.1] Gössing H.
Methodenentwicklung Betriebsfestigkeit
Diplomarbeit 1998

- [2.2] Das Projekt CAE-Bench:
Ein Web-basierendes Daten-, Dokumentations- und Informationssystem zur Verbesserung der Berechnungsabläufe
Schlenkrich M., Hägele J., Hänle U., Streit M., Kuschfeldt S., Kropp A.
- [2.3] Pippert H.
Karosserietechnik
Vogel Fachbuch
- [2.4] Radaj D.
Wärmewirkung des Schweißens – Temperaturfeld, Eigenspannungen, Verzug
SpringerVerlag Berlin, 1995
- [2.5] Spur G., Stöferle Th.
Handbuch der Fertigungstechnik, Band 5
- [2.6] Rupp A.
Ermittlung ertragbarer Beanspruchungen am Schweißpunkt auf der Basis der übertragenen Schnittkräfte
FAT-Schriftenreihe Nr. 111
- [2.7] Hahn O.
Untersuchungen zur Übertragbarkeit von Kennwerten einer punktgeschweißten Enelementprobe auf Mehrelementkörper und Bauteile
AiF-Forschungsvorhaben-Nr.: 9891
- [2.8] Amborn P.
Untersuchungen zur Schwingfestigkeit einreihiger Punktschweißverbindungen
Clausthal: Technische Universität, Diss., 1988
- [2.9] Boldt M.
Mechanisches Verhalten von Durchsetzfuge- und Punktschweißverbindungen bei quasistatischer und dynamischer Beanspruchung
Paderborn: Univesität-GH, Fachbereich Maschinentechnik, Dis., 1992
- [2.10] Eichhorn F., Kunsmann A.
Das Tragverhalten von Widerstands-Punktschweißungen, Teil 1. Mitteilungen aus dem Institut für Schweißtechnische Fertigungsverfahren der RWTH Aachen
Fertigung 60 (1970), Nr. 4, S. 179-185
- [2.11] Gieske D., Hahn O.
Neue Enelementprobe zum Prüfen von Punktschweißverbindungen unter kombinierten Belastungen
Schweißen und Schneiden 46 (1994), Nr. 1, S. 9-12
- [2.12] Knothe K., Wessels F.
Finite Elemente. 2. Aufl.
Berlin: SpringerVerlag, 1992
- [2.13] Mayer A., Preis N.
Berechnungsverfahren zur Spannungsbeurteilung von Punktschweißverbindungen
Konstruktion 46 (1994), S. 287-291

- [2.14] Radaj D.
Strukturspannungserhöhung an Punktschweißverbindungen
Konstruktion 38 (1986) Nr. 2 S. 41-47/ Nr. 10 S. 397-404
- [2.15] Wirth C.
Statische Versagenskriterien für Schweißpunktersatzmodelle bei der
rechnerischen Betriebslastauslegung
Diplomarbeit, TU München (2000)

3. Analyse- und Auswerteverfahren

- [3.1] Günter Müller, Clemens Groth
FEM für Praktiker – Die Methode der Finiten Elemente mit dem FE-Pro-
gramm ANSYS
- [3.2] Senger W.
Superelemente/ Submodelltechnik
Workshopunterlagen 10.3.2000
- [3.3] LMS
Falangs User Manual (Version 2.8)
- [3.4] MacNeal-Schwendler Corporation (1998)
MSC/NASTRAN User's Guide
- [3.5] Barkey M. E., Hack M.
LMS/FALANCS Theory Manual
LMS Durability Technologies GmbH
- [3.6] Gudehus H., Zenner H.
Leitfaden für eine Betriebsfestigkeitsrechnung
Verlag Stahleisen mbH, Düsseldorf. 3. Auflage
- [3.7] Beitz W., Küttner K.-H.
Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau
Springer-Verlag Berlin, 15. Auflage
- [3.8] Wetzel R. M.
Fatigue Under Complex Loading
SAE, Volume 6
- [3.9] Stanner M.
Rechnerische Lebensdauerbestimmung komplex beanspruchter Bau-
teile – Ein Vergleich der Leistungsfähigkeit verschiedener Softwretools
Diplomarbeit 25.5.2000, Fachhochschule München

4. Prozeßsimulation im Umfeld der CAE-Betriebslastauslegung

- [4.1] Scholz S., Schöne C.
Berücksichtigung des Umformprozesses in der Crashberechnung
VDI-Bericht 1411, Seite 195-214 (1998)
- [4.2] PAM-STAMP Solver Notes Manuel Version 1997
PAM System International S.A.
- [4.3] Dressler B., Hahn Th., Sielaff J.
Festigkeitsberechnung von Dünoblechkonstruktionen unter Berücksichtigung von Prozeßparametern
VDI-Bericht 1411, Seite 215-225
- [4.4] Roch Y.
Coupled sheet metal forming and fatigue Simulation
- [4.5] Hibon G., Marron G., Patou P.
Light car wheels in high strength steel
IDDRG, 1996
- [4.6] Gössing H.
Einsatz der Prozeßsimulation im Umfeld der rechnerischen Betriebslastauslegung von Dünoblechkonstruktionen
Zeitschrift Stahlbau, Februar-Heft 2000
- [4.7] Schönbach Th.
Blechumformung in der Praxis – Grundkurs Tiefziehen
Schulungsunterlagen AutoForm
- [4.8] Lange K.
Umformtechnik für Industrie und Wissenschaft
Band 3: Blechbearbeitung, SpringerVerlag, 1990
- [4.9] Entwicklungen im Karosseriebau
VDI Berichte 1134, VDI Verlag, 1994
- [4.10] Schuler
Handbuch der Umformtechnik
SpringerVerlag, 1996
- [4.11] Szücs E.
Einsatz der Prozeßsimulation bei der Entwicklung eines neuen Umformverfahrens – der Hochdruckblechumformung
ShakerVerlag Aachen, 1997
- [4.12] Buxbaum, O.
Über den Einfluß des Umformens auf das Festigkeitsverhalten metallischer Bauteile
„Innovationspotential Umformtechnik“; 1. Sächsische Fachtagung Umformtechnik
- [4.13] Eberlein L., Feldmann P., Ry V.Th.
Visioplastische Deformations- und Spannungsanalyse beim Fließpressen
Umformtechnik 26 (1992) 2, S. 113-118

- [4.14] Haibach E.
Betriebsfestigkeit
VDI-Verlag, Düsseldorf (1998)
- [4.15] Marciniak Z., Kurzcynski K.
Limit strains in the processes of stretchforming sheet metal
Int. J. Mch. Sci. Pergamon Press Ltd. (1967) Vol. 9, S. 609-620
- [4.16] Melander A., Gustavsson A.
Fatigue of a highly prestrained dual-phase steel
Swedish Institute for Metals Research (1995) S. 201-210
- [4.17] Sonsino C. M.
Einfluß von Kaltumformungen bis 5% auf das Kurzschwingfestigkeitsverhalten metallischer Werkstoffe
Dissertation, TH Darmstadt (1982)
- [4.18] Masendorf R.
Einfluß der Umformung auf die zyklischen Werkstoffkennwerte von Feinblech
Dissertation, 31.5.2000, TU Clausthal
- [4.19] König W., Klocke F.
Fertigungsverfahren Blechbearbeitung
Düsseldorf: VDI Verlag (1995)
- [4.20] Lange K.
Umformtechnik Band 1: Grundlagen
SpringerVerlag Berlin (1984)

I. Anhang 1: Materialkennwerte

- [I.1] Smith K.N., Watson P., Topper T. H.
A Stress-Strain Function for the Fatigue of Metals
Journal of Materials, IMLS, Vol. 5 No. 4, 1970
- [I.2] Manson S. S.
Fatigue A Complex Subject – Some Simple Approximations
Experimental Mechanics, Vol. 5, 1965
- [I.3] Morrow J. D.
Cyclic Plastic Strain Energy and Fatigue of Metal
ASTM STP 378, 1965
- [I.4] Coffin L. F.
A study of the Cyclic Thermal Stresses
ASME, Vol. 76, 1954

- [I.5] Simbürger A.
Festigkeitsverhalten zäher Werkstoffe bei einer mehrachsigen und phasenverschobenen Schwinbeanspruchung in körperfesten und veränderlichen Hauptspannungsrichtungen
Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit FB-121, Darmstadt 1975
- [I.6] Prof. Dr. Gräfen
Lexikon der Werkstofftechnik
VDI Verlag
- [I.7] DIN EN 10 002 Teil 1-5
Metallische Werkstoffe; Zugversuch
- [I.8] DIN EN 10 130
Kaltgewalzte Flacherzeugnisse aus weichen Stählen zum Kaltumformen
- [I.9] Krüger K. G.
Einführung in die DIN-Normen
11. Auflage 1993
- [I.10] ISO 6507-1
Metallic materials – Vickers hardness test – Part 1: Test method
- [I.11] AutoForm User's Manual
AutoForm Engineering GmbH Zürich/Switzerland
- [I.12] Spittel M., Neubauer S.
Betrachtung zur mathematischen Fließkurvenformulierung
Neue Hütte 28 (1983), H.1, 21-25
- [I.13] Helms R., Ledworuski S.
Zu Ermittlung der Fließkurve und deren Darstellung durch empirische Funktionen
Stahl und Eisen 96 (1976) Nr. 2, 79-80
- [I.14] Neubauer A., Meyer P., Osterburg U.
Untersuchungen zur Approximation von Kaltfließkurven metallischer Werkstoffe
Draht 34 (1983) H. 10, 483-487
- [I.15] Bogen P., Kandler T., Wagener H. W.:
Anwendungsbezogene mathematische Beschreibung von Fließkurven metallischer Werkstoffe.
Draht 34 (1983) H. 10, 483-487
- [I.16] Seth B. R.
Generalized strain measure with application to physical problems
In Proc. Intern. Symposium, Haifa 1962
- [I.17] Imtiaz Safeed
Untersuchungen über die Streuung und Anwendung von Fließkurven
Diss. Universität Hannover 1984
- [I.18] Kovacs I., Vörös G.
On the Mathematical Description of the Tensile Stress-Strain Curves of Polycrystalline Face Centered Cubic Metals
International Journal of Plasticity V. 12 (1996) No. 1, 35-43

- [I.19] Schwarz H. R.
Numeische Mathematik
Stuttgart, TeubnerVerlag 1993
- [I.20] Fischer L.
Sicherheitskonzept für neue Normen – ENV und DIN-neu
Teil 1: Normungen im konstruktiven Ingenieurbau
Bautechnik 75 (1998), Heft 11
- [I.21] Fischer L.
Sicherheitskonzept für neue Normen – ENV und DIN-neu
Teil 3: Statistische Auswertung von Stichproben im eindimensionalen Fall
Bautechnik 76 (1999), Heft 2
- [I.22] Fischer L.
Sicherheitskonzept für neue Normen – ENV und DIN-neu
Teil 7: Versuchsgestützte Bemessung
Bautechnik 76 (1999), Heft 8
- [I.23] Papula L.
Mathematische Formelsammlung für Ingenieure und Naturwissen-
schaftler
Friedrich Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 4. Auflage
- [I.24] Walther E.
Technische Formeln
Fachbuchverlag Leipzig, 30. Auflage
- [I.25] FAT Schriftenreihe Nr. A131 (2. Entwurf)
Betriebsfestigkeit von Karosseriestählen
- [I.26] Bauer D.
Bestimmung des E-Moduls über Resonanzfrequenzmessung
Metall 53 (1999) S. 669-671
- [I.27] Bleck W.
Anforderungen an Karosseriewerkstoffe
Stahl und Eisen 115, (1995) S. 55-64
- [I.28] Boller Chr, Seeger T.
Materials Data for Cyclic Loading
Amsterdam Elsevier Science Publishers B. V. (1987)
- [I.29] Frenz H.
Der Zugversuch
Materialprüfung 40 (1998) S. 11-12
- [I.30] Gronostajski A. D.
Determination of forming limit curve by means of Maciniak punch
Memoires Sci. Revue Metall. 1980, S. 570-578
- [I.31] Muralidharan U., Manson S. S.
A modified universal slopes equation for fatigue characteristics of metals
J. of Engineering Materials and Technology 110 (1998) S. 55-58
- [I.32] Ramberg W., Osgood W. R.
Description of stress-strain curves by three parameters
Technical Report Technical Note No. 902, NACA (1943)

- [I.33] ASTM E606-92
Standard practice for strain-controlled fatigue testing
Annual book of ASTM standards (1998) section 3, vol. 03.01
- [I.34] BS 7270:1990
Method for constant amplitude strain controlled method
British Standards Institution (1990)
- [I.35] ISO/DIS 12106
Metallic materials – Fatigue testing – Axial strain-controlled method
International Organisation for Standardisation (1999)
- [I.36] Graf T., Zenner H.
Lebensdauervorhersage – Vorhersagefehler aufgrund ungenauer Kenntnis der erforderlichen Kenngrößen
Materialprüfung 36 (1994) 3, S. 71-76
- [I.37] Neuber H.
Theory of stress concentration for shear-strained prismatical bodies with arbitrary nonlinear stress-strain law
Trans. ASME, Journal of Applied Mechanics 28 (1961)
- [I.38] Spindel J. E., Haibach E.
Some considerations on the statistical determination of the shape of S-N-curves
ASTM STP 744 (1981) S. 89-113
- [I.39] VDEh-Projekt
AK-Kennwerte für Feinbleche
Zwischenbericht 8.2.1999

Anhang III

ANSYS-Makros

1. SPNEU.MAC

Umwandlung der „Single-Beam“-Schweißpunktabbildung in die Gössing-Schweißpunktabbildung.

```
!
! Makro erstellt von Hans Goessing
!
! Stand 21.10.1999
!
! Das Schweisspunktersatzmodell (Single-Beam) wird durch
! das Goessing-Schweisspunktersatzmodell ersetzt
!
! Vorgehensweise:
! 1. Das Makro "senkr.mac" sollte zunaechst ueber alle relevanten
! Balken laufen
! 2. Auswahl aller relevanten Balkenelemente (Schweisspunkte) die
! veraendert werden sollen
! 3. Einstellen der Parameter:
!   FKTDSP = Skalierungsfaktor fuer Linsendurchmesser
!           Linsendurchmesser = FKTDSP * SQRT(SMIN)
!   FKTWEZ = Skalierungsfaktor fuer WEZ-Radius (RWEZ)
!           RWEZ = FKTWEZ * Linsendurchmesser
! 4. Aufruf des Makros spneu.mac
!
! Makros die in diesem Makro aufgerufen werden:
! prop201.mac
! balken.mac
! mat-nl.mac
! a-uselsh.mac
!
/PMACRO
/USER,1
/UIS,MSGPOP,3
*GET,tes,ACTIV,,ROUT
*IF,tes,EQ,17,THEN

! *** Variablen fuer Schweisspunkterstellung
! Durchmesser : DSP = FKTDSP * SQRT(min(d)) / Standard = 4.2
FKTDSP = 4.2000000
! Radius der WEZ ist FKTWEZ * DSP / Standard = 0.8
FKTWEZ = 0.8000000
! *** Variablen fuer Schweisspunktmakro
! Minimale Zahl der angrenzenden Schalenelemente
minelem = 3

! Initialisierung/Anlegen von Attributen fuer Aussteifungselemente
prop201
```

```

! Anlegen einer Gruppe mit allen Knoten der ausgewaehlten Balken
NSLE
*GET,zahlnd,NODE,,COUNT,
CM,ndloop,NODE
! Gruppe der ausgewaehlten Balkenelemnte
CM,eloop,ELEM
! Gruppe mit allen veraenderten Elementen
CM,eresult,ELEM

! Anlegen einer Gruppe mit allen Elementen die keine Schalen oder
! Schweisspunktbalken sind
ESEL,ALL
a-uselsh
CMSEL,U,eloop
CM,eunsel,ELEM

! Initalisierung der Abbruchkriterien
index_ok=0
! Abbruch wegen zu grosser Unebenheit
index_dv=0
! Abbruch weil ein weiterer Schweisspunkt in unmittelbarer Naehe ist
index_sp=0
! Abbruch weil Knoten ein Orientierungsknoten ist
index_na=0
! Abbruch weil Balken an Solids angebunden ist
index_so=0
! Abbruch weil weniger als 3 Schalen an den Balken angebunden sind
index_sh=0
! Abbruch weil zu wenig Platz fuer Ersatzmodell vorhanden ist
index_mb=0

! Schleife ueber alle Knoten der Gruppe ndloop
*DO,schleif,1,zahlnd,1

! Auswahl des Knotens und Anpassung der Gruppe ndloop
CMSEL,S,NDLOOP
*GET,naktu,NODE,,NUM,MIN
NSEL,U,,naktu
CM,ndloop,NODE
NSEL,S,,naktu

! Pruefen ob eine Verbindung ueber 3 Bleche vorliegt (dreibl=2)
ESLN
CMSEL,R,eloop
*GET,dreibl,ELEM,,COUNT,

! Einlesen der Knoten des ersten Balken
*GET,eball,ELEM,,NUM,MIN
*GET,nd11,ELEM,eball,NODE,1
*GET,nd12,ELEM,eball,NODE,2

! Pruefen ob der ausgewaehlte Knoten ein Orientierungsknoten (NASTRAN) ist
*GET,nd13,ELEM,eball,NODE,3
*IF,nd13,EQ,naktu,THEN
    index_na=index_na+1
*CYCLE
*ENDIF

! Vertauschen der Knoten 1 und 2 wenn Knoten 2 des Balkens ausgewaehlt ist
! (Tausch der Balkenrichtung)
*IF,nd12,EQ,naktu,THEN
    nd12=nd11
    nd11=naktu
*ENDIF

! Einlesen der Knoten des zweiten Balken (dreibl=2)
*IF,dreibl,EQ,2,THEN
    *GET,ebal2,ELEM,,NUM,MAX
    ESEL,S,,ebal2
    NSLE
    *GET,nd23,ELEM,ebal2,NODE,3
    NSEL,U,,nd11
    NSEL,U,,nd12
    *IF,nd23,GT,0.5,THEN
        NSEL,U,,nd23
    *ENDIF
    *GET,nd22,NODE,,NUM,MIN

```

```

ESEL,A,, ,eball
NSLE
*ENDIF

! Neues Zylinder-Koordinatensystem (11) wird im Knoten nd11 angelegt
! und mit dem ersten SP-Balken ausgerichtet
NMPAVE,nd11
NUMOFF,KP,2,
NUMOFF,LINE,1,
KNODE,1,nd11
KNODE,2,nd12
L,1,2
LWPL,-1,1,0
LDEL,1
KDEL,1,2,1
CSWPLA,11,1,1,1,

! Pruefen ob Kontakt oder Solid-Elemente im Bereich der Verbindung
! vorhanden sind
NSEL,S,, ,nd11
ESLN
CMSEL,U,eloop
NSLE
CM,etmp,ELEM
NSEL,U,, ,nd11
CM,ntmp,NODE
*GET,check_n,NODE,,COUNT,
CMSEL,R,eunsel
*GET,check_e,ELEM,,COUNT,
*IF,check_e,GT,0,THEN
  index_so=index_so+1
*CYCLE
*ENDIF

! Pruefen ob ein weiterer Schweisspunkt an einem Nachbarelement liegt
NSEL,A,, ,nd11
ESLN
CMSEL,R,eloop
*GET,check_e,ELEM,,COUNT,
*IF,check_e,GT,dreibl,THEN
  index_sp=index_sp+1
*CYCLE
*ENDIF
CMSEL,S,etmp
CMSEL,S,ntmp

! Pruefen der Anzahl der Schalen-Elemente (< minelem)
*GET,check_e,ELEM,,COUNT,
*IF,check_e,LT,minelem,THEN
  index_sh=index_sh+1
*CYCLE
*ENDIF

! Pruefen der maximalen Unebenheit des Blechs
maxd=3
*GET,maxdev,NODE,,MXLOC,Z,
*GET,mindev,NODE,,MNLOC,Z,
*IF,ABS(maxdev)+ABS(mindev),GT,maxd,THEN
  index_dv=index_dv+1
*CYCLE
*ENDIF

! Einlesen der Properties der Blechebene 1
*GET,minrad,NODE,,MNLOC,X,
*GET,zahl,ELEM,,NUM,MIN
*GET,aele1,ELEM,zahl,ATTR,TYPE
*GET,amat1,ELEM,zahl,ATTR,MAT
*GET,areall,ELEM,zahl,ATTR,REAL
*GET,blec1,RCON,areall,1
blec2=100
blec3=100

! Einlesen der Knotennummern der Randknoten
CM,ntmp2,NODE
*DO,key,1,check_n,1
  drck%key%=0
  *GET,minlcy,NODE,,MNLOC,Y
  NSEL,R,LOC,Y,minlcy,
  *GET,zahl,NODE,,NUM,MIN

```

```

        ndrand%key%=zahl
        ange%key%=minlcy
        CMSEL,S,ntmp2
        NSEL,U,,zahl
        CM,ntmp2,NODE
    *ENDDO

! Einlesen der Properties der Elemente der zweiten Blechebene
    NSEL,S,,nd12
    ESLN
    CMSEL,U,eunsel
    CMSEL,U,eloop
    *GET,zahl,ELEM,,COUNT,
    *IF,zahl,GT,2,THEN
        *GET,zahl,ELEM,,NUM,MIN
        *GET,areal2,ELEM,zahl,ATTR,REAL
        *GET,blec2,RCON,areal2,1
    *ENDIF

! Einlesen der Properties der Elemente der dritten Blechebene
    *IF,dreibl,EQ,2,THEN
        NSEL,S,,nd22
        ESLN
        CMSEL,U,eunsel
        CMSEL,U,eloop
        *GET,zahl,ELEM,,COUNT,
        *IF,zahl,GT,2,THEN
            *GET,zahl,ELEM,,NUM,MIN
            *GET,areal3,ELEM,zahl,ATTR,REAL
            *GET,blec3,RCON,areal3,1
        *ENDIF
    *ENDIF

! Soll-Abstand der Mittelknoten
    ndlz=(blec1+blec2)/2

! Bestimmung des relevanten Linsendurchmessers
    durchsp=fktdsp*SQRT(blec1)
    *IF,blec2,LT,blec1,THEN
        durchsp=fktdsp*SQRT(blec2)
    *ENDIF
    *IF,dreibl,EQ,2,THEN
        zahl=fktdsp*SQRT(blec3)
        *IF,durchsp,GT,zahl,THEN
            durchsp=zahl
        *ENDIF
    *ENDIF

! Anpassung des Netzes bei zu feiner Vernetzung
! minb = Toleranzbereich
    minb=1
    zahls=0
    *IF,minrad,LT,durchsp*fktwez+minb,THEN
        *DO,key,1,check_n,1
            NSEL,S,,ndrand%key%
            *GET,zahl,NODE,ndrand%key%,LOC,X,
            drck%key%=0
            *IF,zahl,GE,durchsp*fktwez-minb,THEN
                *IF,zahl,LT,durchsp*fktwez+minb,THEN
                    drck%key%=1
                *ENDIF
            *ELSE
                a-cknode,ndrand%key%
                *IF,_check,EQ,0,THEN
                    NMODIF,ndrand%key%,durchsp*fktwez,,
                    drck%key%=1
                *ELSE
                    zahls=1
                    *EXIT
                *ENDIF
            *ENDIF
        *ENDDO
    *IF,zahls,EQ,1,THEN
        index_mb=index_mb+1
        *CYCLE
    *ENDIF
*ENDIF

```

```

! Einbau des neuen Schweisspunktersatzmodells
! Verschiebung des Mittelknotens
  *IF,dreibl,EQ,1,THEN
    NSEL,S,,nd11
    NMODIF,nd11,0,0,blec1*0.08,
  *ENDIF
! Loeschen der alten Elemente
  CMSEL,S,etmp
  EDEL,ALL
! Einbau der Elementringe
  CMSEL,A,ntmp
  *DO,key,1,check_n,1
    N, ,durchsp*0.5,ange%key%,0,,,
    N, ,durchsp*fktwez,ange%key%,0,,,
  *ENDDO
  *GET,ndmax,NODE,,NUM,MAX
  zahln=check_n*2-1
! Einbau der Schalen des Grundwerkstoffs
  TYPE,aele1
  MAT,amat1
  REAL,areall
  ESYS,0
! Aeusserer Elementring
  *IF,drck%1%+drck%check_n%,LT,1,THEN
    E,ndmax-zahl+1,ndrand1,ndrand%check_n%,ndmax
  *ELSEIF,drck%1%+drck%check_n%,EQ,1,THEN
    *IF,drck%1%,EQ,1,THEN
      E,ndmax-zahl+1,ndrand%check_n%,ndmax,
    *ELSE
      E,ndmax-zahl+1,ndrand1,ndmax,
    *ENDIF
  *ENDIF
  *DO,key,0,check_n-2,1
    zahl1=check_n-key
    zahl2=check_n-1-key
    *IF,drck%zahl1%+drck%zahl2%,LT,1,THEN
      E,ndmax-key*2,ndrand%zahl1%,ndrand%zahl2%,ndmax-2-key*2
    *ELSEIF,drck%zahl1%+drck%zahl2%,EQ,1,THEN
      *IF,drck%zahl1%,EQ,1,THEN
        E,ndmax-key*2,ndrand%zahl2%,ndmax-2-key*2,
      *ELSE
        E,ndmax-key*2,ndrand%zahl1%,ndmax-2-key*2,
      *ENDIF
    *ENDIF
  *ENDDO
! Innerer Elementring (WEZ)
  MAT,amat1      ! Material der WEZ
  E,ndmax-zahl,ndmax-zahl+1,ndmax,ndmax-1
  *DO,key,0,check_n-2,1
    E,ndmax-1-key*2,ndmax-key*2,ndmax-2-key*2,ndmax-3-key*2
  *ENDDO
! Elementkreis der Schweisslinse
  MAT,amat1      ! Material der Schweisslinse
  rest=MOD(check_n,2)
  *IF,rest,EQ,0,THEN
    E,nd11,ndmax-check_n*2+3,ndmax-check_n*2+1,ndmax-1
    zahl=check_n-2
  *ELSE
    E,nd11,ndmax-check_n*2+1,ndmax-1
    zahl=check_n-1
  *ENDIF
  *DO,key,0,zahl/2-1,1
    E,nd11,ndmax-1-key*4,ndmax-3-key*4,ndmax-5-key*4
  *ENDDO
! Aussteifung der Schweisslinse
  TYPE,201
  MAT,1
  REAL,201
  ESYS,0
  *DO,key,1,check_n*2-1,2
    E,nd11,ndmax-key
  *ENDDO

! Einbau der Dreieckselemente
  *DO,key,1,check_n,1
    *IF,drck%key%,GT,0,THEN
      NSEL,S,,ndrand%key%
      NSEL,A,,ndmax-zahl-1+key*2

```

```
NUMMRG,NODE,10000,,HIGH
*ENDIF
*ENDDO

CMSEL,A,eresult
CM,eresult,ELEM
index_ok=index_ok+1
index_ko=schleif-index_ok
*MSG,UI,index_ok,index_ko,zahlnd-schleif
Erfolgreich %I, Nicht OK %I, Rest %I
*ENDDO

CMSEL,A,eresult
CM,eresult,ELEM
SAVE
ori-shl
SAVE
*ELSE
*MSG,UI
Nur im Preprozessor verfuegbar !
*ENDIF
```

2. SUB-SYS.MAC

Implementierung der „dynamischen Submodelltechnik“ in ANSYS

```

!
! Makro erstellt von Hans Goessing
!
! Stand 11.01.2000
!
! Es werden alle Randverschiebungen fuer einen neuen Lastfall
! entsprechend der Verschiebungen der Einheitslastfaelle (aus
! FEPARTCUT-Datei "cons.ans") auf die Struktur aufgebracht
! (Array "wegr")
!
! Verwendung:
! 1. Geometrie einlesen (part.ans)
! 2. Parameter-Datei einlesen (cons.ans)
! 3. Makro ausfuehren
!
/PMACRO
/USER,1
FINISH
/PREP7
CSYS,0
NSEL,ALL
DDELE,ALL

! Bestimmung der Knoten-Anzahl
*GET,dimx,'PARM',WEGR,DIM,X
! Bestimmung der Anzahl der Lastfaelle
*GET,dimz,'PARM',WEGR,DIM,Z
! Einlesen der Skalierungsfaktoren
*DO,key,1,dimz,1
  *ASK,fakt%key%,Bitte geben Sie einen Skalierungsfaktor fuer den %key%. Last-
fall ein:,1000
*ENDDO

! Aufbringen der Randverschiebungen
*DO,key,1,dimx,1
  uxl=0
  uyl=0
  uzl=0
  rxl=0
  ryl=0
  rzl=0
  *DO,key2,1,dimz,1
    uxl=wegr(key,4,key2)*fakt%key2%+uxl
    uyl=wegr(key,5,key2)*fakt%key2%+uy1
    uzl=wegr(key,6,key2)*fakt%key2%+uzl
    rxl=wegr(key,7,key2)*fakt%key2%+rxl
    ryl=wegr(key,8,key2)*fakt%key2%+ryl
    rzl=wegr(key,9,key2)*fakt%key2%+rzl
  *ENDDO
  NSEL,ALL
  nran=NODE(wegr(key,1,1),wegr(key,2,1),wegr(key,3,1))
  CSYS,0
  NROTAT,nran
  D,nran, ,uxl, , , ,UX,,,,
  D,nran, ,uy1, , , ,UY,,,,
  D,nran, ,uzl, , , ,UZ,,,,
  D,nran, ,rxl, , , , ,ROTX,,
  D,nran, ,ryl, , , , , , ,ROTY,
  D,nran, ,rzl, , , , , , , ,ROTZ
*ENDDO

*ASK,numls,Welche LS-Nummer soll angelegt werden?,1
LSWRITE,numls

```

3. PARTCUT.MAC

Die Randbedingungen aus dem FE-PARTCUT-Array werden durch lineare Supperposition auf die Teilsturktur aufgebracht.

```

!
! Makro erstellt von Hans Goessing
!
! Stand 01.09.1999
!
/PMACRO
/USER,1
FINISH
/POST1
CSYS,0
RSYS,0

! Anzahl Loadsets wird bestimmt
SET, LAST
*GET, setmax, ACTIVE, , SET, LSTP

! Subsystem wird deffiniert
*ASK, numsub, Welches Subsystem soll gebildet werden?, 1
CMSEL, S, nredu%numsub%

! Randknoten des Subsystems werden ermittelt
ESLN
NSLE
CMSEL, U, nredu%numsub%
*GET, nloop, NODE, , COUNT,
CM, NTMP, NODE

! Parameter wegr wird initialisiert
a-delpar, 'WEGR'
*DIM, wegr, ARRAY, nloop, 9, setmax

! Randweggroessen werden fuer alle Randknoten und Lastfaelle bestimmt
*DO, key2, 1, setmax, 1
  CMSEL, S, NTMP
  *GET, nextn, NODE, , NUM, MIN,
  SET, key2
  *DO, key, 1, nloop, 1
    NSEL, S, , nextn
    ESLN
    wegr(key, 1, key2)=NX(nextn)
    wegr(key, 2, key2)=NY(nextn)
    wegr(key, 3, key2)=NZ(nextn)
    wegr(key, 4, key2)=UX(nextn)
    wegr(key, 5, key2)=UY(nextn)
    wegr(key, 6, key2)=UZ(nextn)
    wegr(key, 7, key2)=ROTX(nextn)
    wegr(key, 8, key2)=ROTY(nextn)
    wegr(key, 9, key2)=ROTZ(nextn)
    CMSEL, S, NTMP
    nextn=NDNEXT(nextn)
  *ENDDO
*ENDDO

! Parameter werden in der Datei Submodell-x.param gespeichert
PARSAV, ALL, Submodell, param,

! Das Submodell wird aus dem Gesamtmodell herausgeschnitten und
! als Submodell-x.db gespeichert
FINISH
/PREP7
CMSEL, S, NREDU%numsub%
ESLN
NSLE
sel-inv
EDELE, ALL
NDELE, ALL
ALLSEL, ALL
FINISH
/FILNAM, Submodell-%numsub%
/TITLE, Submodell
SAVE
EPLOT

```