

Dipl.-Ing. Harald Schluder

Herausforderungen und Lösungsansätze
für die numerische Entwicklung am
Beispiel des Fußgängerschutzes

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der technischen Wissenschaften (Dr.techn.)

durchgeführt an der
Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Graz
am Institut für Fahrzeugsicherheit

Gutachter:

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hermann Steffan

Prof. Dr.-Ing. Martin Eigner

Mai 2010

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

Inhaltsverzeichnis

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG	I
ABKÜRZUNGEN	VII
DANKSAGUNG	XI
KURZFASSUNG	XIII
ABSTRACT	XV
1 EINLEITUNG	1
1.1 PROBLEUMUMRISS	1
1.2 FORMULIERUNG DER FORSCHUNGSFRAGE	2
1.3 AUFBAU DER ARBEIT	3
2 DER FAHRZEUGSEITIGE FUßGÄNGERSCHUTZ	5
2.1 DER FUßGÄNGERUNFALL IM STRAßENVERKEHR	5
2.1.1 Fußgängerunfallstatistik	7
2.1.2 Phasen des Fußgängerunfalls.....	13
2.2 PRÜFVERFAHREN FÜR DEN FUßGÄNGERSCHUTZ.....	16
2.2.1 Methoden zur Bewertung des fahrzeugseitigen Fußgängerschutzes	17
2.2.2 Europäische Gesetzeslage zum Fußgängerschutz.....	21
2.3 DER FUßGÄNGERSCHUTZ ALS TECHNISCHE HERAUSFORDERUNG	35
2.3.1 Allgemeine Betrachtung	36
2.3.2 Passive Lösungsansätze	45
2.3.3 Crash-aktive Systeme beim Fußgängerschutz	46
2.3.4 Sensoren und Aktive Sicherheit beim Fußgängerschutz	48
2.3.5 Ausblick auf zukünftige Fußgängerschutzsysteme	50
3 EINSATZ VIRTUELLER TECHNIKEN IM ENTWICKLUNGSPROZESS	52
3.1 GEGENWÄRTIGE HERAUSFORDERUNGEN IN DER AUTOMOBILINDUSTRIE.....	52
3.2 DER ENTWICKLUNGSPROZESS IN DER AUTOMOBILBRANCHE.....	53
3.2.1 Gliederung des Entwicklungsprozesses.....	54
3.2.2 Besonderheiten der Konzeptentwicklung	55
3.2.3 Trends in der Serienentwicklung	57
3.2.4 Vergleich der in den Entwicklungsphasen angewandten Methoden.....	58
3.3 DIE ROLLE DER NUMERISCHEN SIMULATION IM PRODUKTPROZESS	59
3.3.1 Integration der Simulation in den Produktentwicklungsprozess	61
3.3.2 Virtuelle Prototypen in der Entwicklung.....	62
3.3.3 Integrierte Absicherung	63
3.4 HERAUSFORDERUNGEN IM VIRTUELLEN ENTWICKLUNGSPROZESS	65
3.4.1 Weiterentwicklung der CAx Prozesse und Methoden	65

3.4.2	<i>Herausforderungen durch mechatronische Systeme</i>	66
3.4.3	<i>Verknüpfung von Produktentwicklung und Produktentstehung</i>	67
4	PROZESSE, METHODEN UND SYSTEME FÜR EIN INTEGRIERTES ENGINEERING	69
4.1	DER WEG ZUM INTEGRIERTEN ENGINEERING	70
4.1.1	<i>Entwicklung des CAE Einsatzes im Entwicklungsprozess</i>	70
4.1.2	<i>Aufbau einer integrativen Entwicklungsplattform</i>	73
4.1.3	<i>Herausforderung an eine integrierte Entwicklungsumgebung</i>	76
4.2	PROGNOSEFÄHIGE METHODEN FÜR DIE VIRTUELLE FUßGÄNGERSCHUTZENTWICKLUNG	79
4.2.1	<i>Weiterentwicklung der Prognosefähigkeit in der Crashesimulation</i>	79
4.2.2	<i>Modellierung und Validierung der Kopfimpaktoren</i>	80
4.2.3	<i>Verifikation der numerischen Modelle mit Gesamtfahrzeugversuchen</i>	91
4.3	PROZESS- UND SIMULATIONSDATENMANAGEMENT	95
4.3.1	<i>Die Rolle des Simulationsdatenmanagements</i>	96
4.3.2	<i>Einordnung des Simulationsdatenmanagements</i>	97
4.3.3	<i>Systematische Prozess- und Simulationsdatenmanagement</i>	99
4.4	CO-SIMULATION ZUR DISZIPLINÜBERGREIFENDEN ENTWICKLUNG	102
4.4.1	<i>Aspekte der Co-Simulation</i>	103
4.4.2	<i>Unabhängige Co-Simulationsplattformen für die Entwicklung</i>	104
4.4.3	<i>Anwendung der Co-Simulation bei der integrierten Sicherheit</i>	107
4.4.4	<i>Herausforderungen bei der Entwicklung innovativer Sicherheitssysteme</i>	112
4.5	EINSATZ MULTIDISZIPLINÄRER OPTIMIERUNGSMETHODEN IM ENTWICKLUNGSPROZESS	114
4.5.1	<i>Einführung in die disziplinübergreifende Optimierung</i>	114
4.5.2	<i>Die Rolle der multidisziplinären Optimierung</i>	116
4.5.3	<i>Integration der MDO in den Produktentwicklungsprozess</i>	118
4.5.4	<i>Komplexitäts- und Modellreduktion bei der MDO</i>	121
4.5.5	<i>Herausforderungen und Ausblick</i>	124
4.6	ENGINEERING COCKPIT UND DIE ROLLE DES ENTWICKLUNGSINGENIEURS	124
5	INTEGRATION DER SIMULATION IN DEN ENTWICKLUNGSPROZESS	128
5.1	DARSTELLUNG DES USE-CASES	128
5.2	AUTOMATISIERTER MODELLAUFBAU	131
5.2.1	<i>Prinzipieller Aufbau eines Berechnungsmodells</i>	132
5.2.2	<i>Bausteine für den Modellaufbauprozess</i>	133
5.2.3	<i>Prozessablauf-Workflow</i>	138
5.3	LASTFALLSPEZIFISCHES PRE-PROCESSING	139
5.4	SOLVING UND DATENHANDLING	148
5.5	LASTFALLSPEZIFISCHE AUSWERTUNG	148
5.6	BEWERTUNGS- UND VISUALISIERUNGSMETHODIK FÜR DEN FUßGÄNGERSCHUTZ	152
5.7	DATENORGANISATION	157
5.8	MÖGLICHE ERWEITERUNGEN DES PROZESSES	161

6	FAZIT UND AUSBLICK	162
6.1	ZUSAMMENFASSUNG	162
6.2	BEANTWORTUNG DER FORSCHUNGSFRAGEN.....	164
6.3	AUSBLICK	165
	LITERATURVERZEICHNIS	167
	VERÖFFENTLICHUNGEN	176

Abkürzungen

ABS	Antiblockiersystem
ACEA	Association des Constructeurs Européens d'Automobiles, europäischer Automobilherstellerverband
ADAS	Advanced Driver Assistance System
ADM	Altair Data Manager
AIS	Abbreviated Injury Scale
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BAS	Bremsassistent
BOM	Bill of Material
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAT	Computer Aided Testing
CAx	Computer Aided x
CFC	Computational Fluid Dynamics
CPU	Central Processing Unit
DOE	Design of Experiments, statistische Versuchsplanung
EC	European Council
EEVC	European Enhanced Vehicle-safety Committee
EG	Europäische Gemeinschaft
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
EU	Europäische Union
EURO-NCAP	European New Car Assessment Programme
FEM	Finite Elemente Methode
FGS	Fußgängerschutz
FlexPLI	Flexible Pedestrian Legform Impactor
FMVSS	Federal Motor Vehicle Safety Standard
GIDAS	German In-Depth Accident Study
GRSP	Working Party on Passive Safety (GRSP)
GTR	Global Technical Regulation

GUI	Graphical User Interface
HIC	Head Injury Criterion
HPC	Head Protection Criterion
H-Punkt	Hüftpunkt
HUMOS	Human Model for Safety
ICOS	Independent Co-Simulation
ID	Identifikator
IHRA/PS-WG	International Harmonized Research Activities Pedestrian Safety Working Group
JARI	Japan Automobile Research Institute
MAIS	Maximum Abbreviated Injury Scale
MDO	Multidisziplinäre Optimierung
MKS	Mehrkörpersysteme
NCAP	New Car Assessment Program
NEDC	New European Driving Cycle
NVH	Noise, Vibration, Harshness
OEM	Original Equipment Manufacturer
PCDS	Pedestrian Crash Data Study
PDM	Produktdatenmanagement
PLM	Product Lifecycle Management
PMHS	Post Mortem Human Surrogate
PMTO	Post Mortem Test Object
PS	Pedestrian Safety
PVC	Polyvinylchlorid
RQM	Requirement Management
SDM	Simulation Data Management
SOP	Start of Production
STEP	STandard for the Exchange of Product model data
SUV	Sport Utility Vehicle
TCL/TK	Tool Command Language / Toolkit
TEG	Technical Evaluation Group

THUMS	Total HUmAn Model for Safety
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
VPT	Virtual Prototype
WG	Working Group
XML	Extensible Markup Language

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Kompetenzzentrum – Das virtuelle Fahrzeug Forschungsgesellschaft mbH in Graz. Die Hauptaspekte der Arbeit wurden in mehreren Projekten in der Area Mechanics behandelt und finanziell mit Mitteln des Kplus Kompetenzzentrum-Programmes des Österreichischen Bundesministeriums für Verkehr und Technologie, der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft mbH, des Landes Steiermark und der Steirischen Wirtschaftsförderung unterstützt.

Durch Teilnahmen an Konferenzen, durch Veröffentlichungen und die laufende Projektarbeit war es mir möglich, das Thema der numerischen Entwicklung am Beispiel des Fußgängerschutzes aus unterschiedlichen Blickwinkeln zu betrachten.

Nach dem Abschluss des Studiums Wirtschaftsingenieurwesen – Maschinenbau an der Technischen Universität Graz habe ich mich dazu entschlossen, mich im Rahmen eines Doktoratsstudiums mit dem Themenbereich der virtuellen Entwicklung auseinanderzusetzen. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hermann Steffan bot mir die Gelegenheit, meine Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet am Kompetenzzentrum durchzuführen und erklärte sich darüber hinaus auch bereit, meine Arbeit auf dem Gebiet der Fahrzeugsicherheit als Doktorvater zu betreuen. Er stand mir während meines Doktoratsstudiums stets mit Rat und Tat zur Seite, auch bei Fragestellungen außerhalb des Forschungsschwerpunktes. Hierfür und für alle fachlichen Diskussionen und Anregungen möchte ich mich herzlich bedanken.

Prof. Dr.-Ing. Martin Eigner danke ich dafür, dass er die Zweitbetreuung meiner Arbeit übernahm, und mich bei unseren konstruktiven Gesprächen auf neue Aspekte im Bereich der virtuellen Produktentwicklung aufmerksam machte.

Großer Dank gilt auch meinen Kollegen Dipl.-Ing. Dr.techn. Bernd Fachbach und Dipl.-Ing. Dr.techn. Arno Eichberger für ihre Unterstützung in den letzten Jahren, insbesondere für die zahlreichen wissenschaftlichen Diskussionen und die wertvollen Ratschläge, wodurch sie maßgeblich zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben.

Des Weiteren möchte ich mich bei den Firmen und Projektpartnern MAGNA STEYR Fahrzeugtechnik AG & CO KG, Continental Safety Engineering International GmbH (vormals Siemens Restraint Systems GmbH), Altair Engineering Inc. sowie der TU Graz (Institut für Fahrzeugsicherheit, Institut für Fahrzeugtechnik) für die konstruktive Zusammenarbeit und Unterstützung bedanken.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Freundin Sabine. Sie unterstützte mich stets mit allen Kräften und ermöglichte es mir so, das Doktoratsstudium neben meiner beruflichen Tätigkeit durchzuführen.

Kurzfassung

Sowohl die Anzahl als auch im selben Maße die Komplexität der Anforderungen an moderne Fahrzeuge sind ständig im Steigen begriffen. Um diesen neuen Herausforderungen gerecht zu werden, müssen innovative Entwicklungsmethoden und -strategien erarbeitet werden. Die Erfordernis zur Reduktion der Entwicklungszeiten und -kosten sowie die geringer werdende Anzahl von experimentellen Versuchen und Prototypen stellen zwei Umstände dar, welche dafür sorgen, dass numerische Entwicklungsmethoden verstärkt an Bedeutung gewinnen.

Diese Arbeit greift die zuvor geschilderte Problematik auf und geht auf neue Methoden und Prozesse während der Fußgängerschutzentwicklung ein. Der Fokus wird dabei sowohl auf fahrzeugsicherheitsrelevante Aspekte als auch auf disziplinübergreifende Fragestellungen der numerischen Entwicklung gelegt.

Im Lauf der letzten Jahre hat der Fußgängerschutz als neue Anforderung innerhalb der Fahrzeugentwicklung zunehmend an Einfluss gewonnen. Davon betroffen sind vorrangig die Komponenten der Fahrzeugfront, welche nun unter Beachtung der fußgänger-schutzrelevanten Anforderungen entwickelt werden müssen. Zusätzlich müssen diese Komponenten weiterhin die bereits bestehenden Anforderungen der einzelnen technischen Disziplinen, welche jedoch sehr häufig konträr zu jenen des Fußgängerschutzes sind oder sich gegenseitig stark beeinflussen, erfüllen.

Ein essentielles Entwicklungswerkzeug im Bereich der passiven Sicherheit ist die Finite Elemente Methode (FEM). Auf diesem Gebiet gilt es vor allem, die Prognosefähigkeit der numerischen Methoden konsequent zu erhöhen, um so die Anzahl der Hardwareversuche zu reduzieren. Durch exakte Modellierung und eine qualitativ hochwertige Validierung der einzelnen Modelle kann ein entscheidender Beitrag zum Ausbau der numerischen Entwicklung geleistet werden. Dennoch wird in Zukunft eine Vielzahl von Herausforderungen im Zuge der Verbesserung der virtuellen Entwicklungsmethoden zu bewältigen sein.

Um die Entwicklungszeit weiter zu reduzieren, sind vor allem neue Ansätze im Bereich Prozess- und Simulationsdatenmanagement nötig. Dafür müssen strukturierte Entwicklungsabläufe für die einzelnen Disziplinen und Lastfälle definiert werden. Dies ist eine Voraussetzung für die Automatisierung von Simulationsabläufen während der Entwicklung, wodurch einerseits ein enormer Speed-up in den Entwicklungsabläufen erzielt und gleichzeitig die Qualität der Simulationsergebnisse gesteigert wird.

Elektrik und Elektronik nehmen im modernen Fahrzeug einen zunehmend hohen Stellenwert ein. Für die Entwicklung und Absicherung der mechatronischen Systeme müssen neue Methoden erarbeitet werden. Hierzu müssen insbesondere disziplinübergreifende Simulationsabläufe in Form einer Co-Simulation realisiert werden, wie es bereits bei einer gesamthaften Betrachtung aktiver Fußgängerschutzlösungen der Fall ist.

Um den Anforderungen zukünftiger Entwicklungsaktivitäten gerecht zu werden, ist eine Weiterentwicklung der im Einsatz befindlichen Systeme, Methoden und Prozesse erforderlich. Eine Optimierung dieser Abläufe kann mithilfe des in dieser Arbeit vorgestellten Konzepts einer integrativen Entwicklungsumgebung bewerkstelligt werden, wodurch eine holistische Betrachtung des Gesamtfahrzeuges sichergestellt wird, erreicht werden.

Abstract

The requirements on modern vehicles are constantly about to increase in number and complexity. In order to meet these new challenges innovative development methods and strategies need to be developed. Demands to save development times and costs as well as the decreasing number of experimental tests and physical prototypes both are additional facts ensuring that virtual development methods are gaining in importance.

This doctoral thesis picks up the afore-described problems and enlarges upon novel methods and processes in the field of pedestrian protection development. Both vehicle safety relevant aspects and discipline-spreading issues in the field of numerical development are in the focus of interest.

In the course of the last years pedestrian protection accrued as a new safety requirement for vehicle development. Parts of the vehicle's front end are primarily affected when looking at pedestrian protection issues. During the design process these parts now have to conform to the requirements of pedestrian protection. Additionally the currently existing requirements of individual technical disciplines which are often in conflict or in interaction with the pedestrian protection demands need to be considered.

The most important development tool for passive safety is the Finite Element Method (FEM). Regarding the predictability of the different numerical methods in this field it is necessary to reach a higher level in order to reduce the number of physical tests. Detailed and accurately validated models will make a major contribution to the expansion of numerical development. Nevertheless there are numerous challenges for the further improvement of the virtual development methods.

For an additional reduction of the development time novel approaches in the field of process and simulation data management are necessary. Therefore well structured development processes for the different engineering disciplines and load cases need to be defined. These workflows provide a basis for the realization of fully automated simulation processes, thus an enormous speed-up of the development process and an improvement of the quality of the simulation results can be achieved.

In modern vehicles the priority of electric and electronic systems is increasing constantly. For the development and the backup of such mechatronic systems new methods and strategies are necessary. Additional tools like the coupled simulation are essential to realize discipline spreading simulation techniques. Such innovative methods are relevant for the development of future integrated safety systems, for example active safety solutions for pedestrian protection.

In order to satisfy the requirements of future vehicles, the further development of the established systems, methods and processes is of importance. An optimization of these procedures can be realized by means of an integrated engineering framework concept presented at this doctoral thesis and ensuring a holistic consideration of the full vehicle.

1 Einleitung

In den vergangenen Jahren wurde mit dem Fußgängerschutz eine neue, zunehmend an Bedeutung gewinnende Anforderung an die Sicherheit eines Fahrzeuges definiert. Zur Erfüllung der hierfür gesetzlich vorgeschriebenen Kriterien sind neue Entwicklungsmethoden und Strategien erforderlich. Forderungen nach verkürzten Entwicklungszyklen und einer Reduktion von physischen Prototypen sowie zunehmend komplexe Anforderungen an die einzelnen Fahrzeugdisziplinen resultieren in einer Fokussierung auf virtuelle Entwicklungsmethoden während der gesamten Fahrzeugentwicklung. Die Betrachtung dieses Themenkomplexes und das Erarbeiten neuer Lösungsansätze auf dem Gebiet der virtuellen Entwicklung mit dem Schwerpunkt Fußgängerschutz zählen zum Inhalt der vorliegenden Arbeit.

1.1 Problemumriss

Auf Basis von zahlreichen Untersuchungen zum Thema Fußgängerschutz wurden Testvorschriften für die Automobilindustrie erarbeitet. Im Oktober 2005 trat die erste Phase des neuen Gesetzes als Bestandteil der Prozedur des Zulassungsverfahrens für alle neuen Fahrzeugtypen in Kraft. Das vom Europäischen Parlament definierte Testverfahren basiert auf Komponentenversuchen. Dabei werden Prüfkörper, welche die Körperteile Kopf, Oberschenkel und Bein darstellen, zur lokalen Prüfung des Fahrzeugvorderwagens eingesetzt. Diese werden auf definierte Anprallbereiche an der Fahrzeugfront geschossen. Die dabei zu befolgenden Vorschriften sowie die Integration der Lösungen in das Gesamtfahrzeug stellen neue Anforderungen an die Fahrzeugsicherheit dar, die von den Ingenieuren in unterschiedlichen Phasen des Entwicklungsprozesses berücksichtigt werden müssen.

Numerische Methoden werden während der gesamten Fahrzeugentwicklung, beginnend von der Konzeptphase bis hin zur Serienentwicklung und Produktfreigabe, eingesetzt. Durch die Forschungsaktivitäten in den letzten Jahren konnte die Prognosefähigkeit der Berechnungsmethoden in den einzelnen Disziplinen auf ein sehr hohes Niveau gebracht werden, der infolgedessen maßgeblich erhöhten Rechenkapazität wird mit Supercomputern und Rechenclustern entgegengewirkt. Neben der Bereitstellung der notwendigen Berechnungsmethoden und Ressourcen sind vor allem die dafür notwendigen Daten eine wichtige Voraussetzung für eine prognosefähige Simulation. Dazu zählen neben den geometrischen Bauteildaten insbesondere ein umfassendes Wissen über die verwendeten Materialien, Verbindungstechniken sowie Produktionsprozesse und -technologien.

Um zukünftigen Anforderungen an den virtuellen Entwicklungsprozess gerecht zu werden, müssen die numerischen Methoden verbessert werden, vor allem aber muss ein durchgängiger CAE-Prozess für die einzelnen Disziplinen geschaffen werden, um diese in weiterer Folge miteinander zu vernetzen. Die Sicherstellung der Datenintegrität sowie ein effizientes Datenmanagement während des gesamten Entwicklungsprozesses stellen einen weiteren zentralen Aufgabenbereich bei der Schaffung eines integrierten Entwicklungsablaufes dar.

1.2 Formulierung der Forschungsfrage

Die Integration des Fußgängerschutzes in die Gesamtfahrzeugentwicklung stellt Entwicklungsingenieure vor neue Herausforderungen, welche durch neue numerische Methoden und Entwicklungsabläufe bewältigt werden müssen. Dazu zählen die Algorithmen für das Pre-Processing im Simulationsablauf, Methoden zur Handhabung der Simulationsläufe sowie die Integration von disziplinübergreifenden Entwicklungsmethoden zur Erfüllung der technischen Anforderungen. Darüber hinaus wird mit den Methoden zur Visualisierung einer Vielzahl von Simulationsergebnissen, der Dokumentation und dem Controlling der Entwicklungstätigkeiten sowie dem Vergleich mit den Testresultaten ein weiterer Aufgabenbereich geschaffen, welcher im Zuge der integrierten Fußgängerschutzentwicklung zu behandeln ist.

Eine wesentliche Aufgabe der numerischen Simulation im Entwicklungsprozess besteht darin, dem Ingenieur in seiner Rolle als technischer Entwickler eine Unterstützung zu bieten. Neben den eingesetzten numerischen Methoden gilt es vor allem das dafür notwendige Management der Simulationsdaten und die Abläufe während des Entwicklungsprozesses zu systematisieren. Mit Hilfe durchgängiger Prozesse kann der Entwicklungsprozess der einzelnen Disziplinen auf virtueller Basis realisiert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird durch eine übergreifende und vernetzte Betrachtung der drei Bereiche IT-Systeme, verwendete Methoden und Prozesse im Entwicklungsablauf die Rolle der Fußgängerschutzentwicklung in einem übergeordneten CAE-Entwicklungsumfeld dargestellt.

Im Detail sollen folgende Fragen im Rahmen der vorliegenden Arbeit behandelt werden:

Welche Rolle spielt der Fußgängerschutz in der Fahrzeugentwicklung? Welchen Einfluss hat der Fußgängerschutz auf die einzelnen Bereiche des Fahrzeuges, und welche Disziplinen sind dabei betroffen?

Welche Methoden müssen in den unterschiedlichen Entwicklungsphasen eingesetzt werden? Mit welchen Schwierigkeiten und Problem ist bei der Fußgängerschutzentwicklung zu rechnen, und wie kann man diese Herausforderungen in den modernen Entwicklungsablauf integrieren? Durch welche Maßnahmen und Werkzeuge kann man die Prognosefähigkeit der Simulationen im Bereich des Fußgängerschutzes erhöhen?

Wie kann die Integration des Fußgängerschutzes in einen übergeordneten disziplinübergreifenden Entwicklungsprozess dargestellt und umgesetzt werden? Welche innovativen Ansätze und Lösungen kann man beim Prozess- und Simulationsdatenmanagement verfolgen?

1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit lässt sich in vier wesentliche Teile gliedern. Im ersten Teil wird der Fußgängerschutz im Allgemeinen betrachtet, wobei hier der fahrzeugseitige Fußgängerschutz im Vordergrund steht. Der zweite Teil behandelt den modernen Entwicklungsprozess in der Automobilindustrie, dabei spielen die numerischen Methoden eine wesentliche Rolle. Im dritten Teil werden neue Ansätze einer integrativen Entwicklungsumgebung vorgestellt. Zu den Schwerpunkten in diesem Bereich zählen die unterschiedlichen Methoden und Prozesse in den einzelnen Phasen der Entwicklung. Im letzten Teil der Arbeit wird die Integration der Fußgängerschutzentwicklung in einen übergeordneten Entwicklungsprozess dargestellt. Dabei wird exemplarisch das Zusammenspiel einzelner IT-Systeme und innovativer Simulationen in einem durchgehenden Entwicklungsprozess für den Fußgängerkopfanprall demonstriert.

Fahrzeugseitiger Fußgängerschutz

Primäres Ziel aller technischen Maßnahmen zur Verbesserung des Fußgängerschutzes muss es sein, die Aufprallenergie sanfter und über einen längeren Zeitraum hinweg zu absorbieren. Harte Schläge und Impulse, die zu schwerwiegenden Verletzungen führen können, müssen so weit wie möglich vermieden werden. Während der Entwicklung kann die Fahrzeugsicherheit nicht isoliert betrachtet werden, sondern sie ist als ein integrierter Bestandteil der Produktentwicklung mit einem hohen Potential, Zielkonflikte in Verbindung mit anderen Anforderungen zu verursachen, zu sehen.

Ein genereller Überblick über die Rolle des Fußgängerunfalls im Straßenverkehr wird in Abschnitt 2.1 der vorliegenden Arbeit gegeben. In Abschnitt 2.2 wird auf die auf Basis der Unfallforschung und der unterschiedlichen internationalen Gremien definierten Gesetzesvorschriften eingegangen. Dabei werden auch erwartete Verbesserungen durch die gesetzlichen Änderungen dargestellt und diskutiert.

Die größten Herausforderungen beim Thema Fußgängerschutz entstehen dadurch, dass die Anforderungen zur Erfüllung der gesetzlichen Vorschriften in das Gesamtfahrzeug integriert werden müssen. Ein Überblick über die fahrzeugtechnischen Maßnahmen und die Auswirkungen auf andere ingenieurtechnische Disziplinen wird in Abschnitt 2.3 präsentiert. Dabei werden die betroffenen Fahrzeugbereiche dargestellt und Lösungsvorschläge für den fahrzeugseitigen Fußgängerschutz erörtert. Das Erarbeiten neuer technischer Lösungen ist jedoch nicht Inhalt dieser Arbeit, vielmehr sollen hier nur prinzipielle technische Wege aufgezeigt werden.

Die Rolle der virtuellen Methoden im modernen Entwicklungsprozess

Die Wettbewerbsfähigkeit der einzelnen Unternehmen und Automobilhersteller muss ständig unter Beweis gestellt werden. Von entscheidender Bedeutung ist hier die Entwicklungszeit, welcher neben den Produkt- und Entwicklungskosten eine zunehmend wichtigere Rolle zuzuschreiben ist. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, werden verstärkt virtuelle Methoden zur Auslegung des Fahrzeuges eingesetzt. Unterschiedliche digitale Prototypen

helfen dem Entwicklungsteam, den Produktreifegrad möglichst rasch auf ein hohes Niveau zu bringen.

Die Darstellung des gesamten Entwicklungsablaufes wird in Abschnitt 3 veranschaulicht. Im Speziellen wird auf Trends und Herausforderungen im Bereich der virtuellen Entwicklung eingegangen, vor allem wird die Eingliederung der virtuellen Methoden in den übergeordneten Entwicklungsprozess dargestellt.

Aspekte zum integrierten Engineering

Der kosten- und zeitoptimierte Einsatz der unterschiedlichsten CAx Werkzeuge erfordert eine gänzlich neue Entwicklungsmethodik sowie dafür notwendige Entwicklungsumgebungen. Vor allem neue Methoden wie beispielsweise die Co-Simulation, die disziplinübergreifende Entwicklung und Optimierung, die Kombination von physikalischer und virtueller Funktionsabsicherung oder die Automatisierung von Entwicklungsabläufen müssen dabei berücksichtigt werden. Entscheidend dabei sind das Zusammenspiel der einzelnen Systeme und Methoden sowie die Einbindung in durchgängige Prozesse. Bei einer integrativen Entwicklungsumgebung müssen diese Bausteine aufeinander abgestimmt sein, um eine optimierte virtuelle Produktentwicklung sicherzustellen.

In Abschnitt 4 werden Aspekte einer integrativen Entwicklungsumgebung dargestellt. Neben einer Engineeringplattform werden neue Methoden zur Unterstützung der Entwicklungstätigkeit im Bereich Fußgängerschutz präsentiert. Im Mittelpunkt stehen primär Methoden, welche dazu dienen, disziplinübergreifende Fragestellungen zu betrachten und zu beantworten sowie das komplexe Produkt Automobil zeit- und kostengünstiger zu entwickeln.

Integration des Fußgängerschutzes in den Entwicklungsprozess

Das Management der CAE Prozesse ist eine der zukünftigen Herausforderungen bei der virtuellen Fahrzeugentwicklung. Durch vorangegangene Aktivitäten sind die Qualität und die Performance der CAE Lösungen und Solver bereits auf einem sehr hohen Niveau. Durch Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in den unterschiedlichen Themenbereichen steht heute eine Vielzahl an Tools und Methoden zur virtuellen Produktentwicklung zur Verfügung. Die Herausforderungen für die Zukunft bestehen darin, diese Tools zu kombinieren, Prozessketten zu bilden und diese zu steuern. Dazu gehören insbesondere die Integration von CAE in den Entwicklungsprozess und das Management der gesamten CAE Daten.

Anhand des Beispiels *Kopfanprall in der Serienentwicklung* werden durch den Einsatz von innovativen Methoden und Werkzeugen neue Möglichkeiten und Perspektiven aufgezeigt. Schwerpunkte sind dabei die Integration von Datenmanagementlösungen und Methoden zur Automatisierung von Prozessabläufen, welche den Einsatz übergeordneter Entwicklungs- und Steuerungsmethoden ermöglichen. Im Abschnitt 5 wird der davon im Rahmen dieser Arbeit umgesetzte Teil detailliert dargestellt, im letzten Abschnitt der Arbeit wird ein Ausblick auf die Potenziale solch neuartiger Werkzeuge gegeben.

2 Der fahrzeugseitige Fußgängerschutz

2.1 Der Fußgängerunfall im Straßenverkehr

Seit dem ersten Aufkommen von motorisierten Kraftfahrzeugen im Straßenverkehr steht auch die Sicherheit der einzelnen Straßenbenutzer im Mittelpunkt des öffentlichen Interesses. Die zunehmende Aufmerksamkeit, welche dem Verkehrsunfall insbesondere in den letzten Jahrzehnten entgegengebracht wurde, sorgte dafür, dass auch die Sicherheit der Straßenbenutzer ein Schwerpunkt nationaler und internationaler Forschungsaktivitäten wurde. Durch Maßnahmen am Fahrzeug und an der Infrastruktur, vor allem aber durch Änderungen in der Gesetzgebung konnte die Sicherheit der einzelnen Verkehrsteilnehmer deutlich erhöht werden. Diese Auswirkungen sind in Abbildung 2.1 deutlich zu erkennen, die Anzahl der Verkehrstoten nimmt europaweit sukzessive ab. Nichtsdestotrotz hat sich die Europäische Union (EU-25¹) im Jahr 2001 das Ziel gesetzt, die Anzahl der Verkehrstoten bis zum Jahr 2010 zu halbieren [COM01]. Um dieses ambitionierte Ziel zu erreichen ist eine Vielzahl an Maßnahmen nötig. Der aktuelle Trend zeigt eine deutliche Verbesserung hinsichtlich der getöteten Personen im europäischen Straßenverkehr, wenn auch die ursprünglich geplanten Ziele nicht vollständig erfüllt werden konnten. In einem Midterm Review im Jahr 2006 wurden in [COM06] die bisherigen Maßnahmen analysiert und den ursprünglichen Bestrebungen der Europäischen Union gegenübergestellt, Abbildung 2.1. Durch weitere Vorkehrungen soll die Lücke zwischen den tatsächlich getöteten Verkehrsteilnehmern und den ambitionierten Zielen der Europäischen Union geschlossen werden.

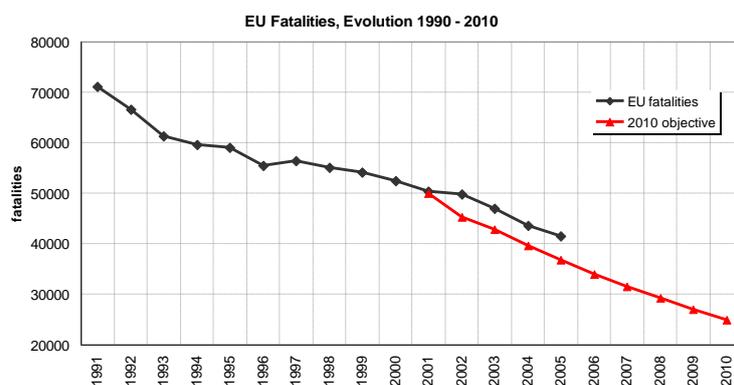


Abbildung 2.1: EU Fatalities, Evolution 1990 - 2010

In Abbildung 2.2 ist die Verteilung der getöteten Verkehrsteilnehmer (EU-15²) hinsichtlich des Alters und deren Rolle im Straßenverkehr dargestellt [COM06]. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Fahrzeuginsassen bei dieser Analyse die dominante Rolle spielen, die zweite große

¹ Die 25 Staaten der Europäischen Union, die bis einschließlich 2006 Mitglieder waren.

² Die 15 Staaten der Europäischen Union, die bis einschließlich 2004 Mitglieder waren.

Gruppe sind jedoch bereits die getöteten Fußgänger. Bei der Altersverteilung fällt vor allem der tendenzielle Anstieg der getöteten Fußgänger mit zunehmendem Alter auf, dies ist primär auf das erhöhte Verletzungsrisiko und den generell schlechteren Gesundheitszustand von älteren Personen zurückzuführen. Bei den Fahrzeuginsassen treten besonders zwei Altersgruppen in den Vordergrund: Personen zwischen 18 und 24 - also jene mit geringer Fahrpraxis - und die Gruppe von 25 bis 49, wobei diese Ergebnisse vor allem auf die breite Altersspanne in der Statistik zurückzuführen sind.

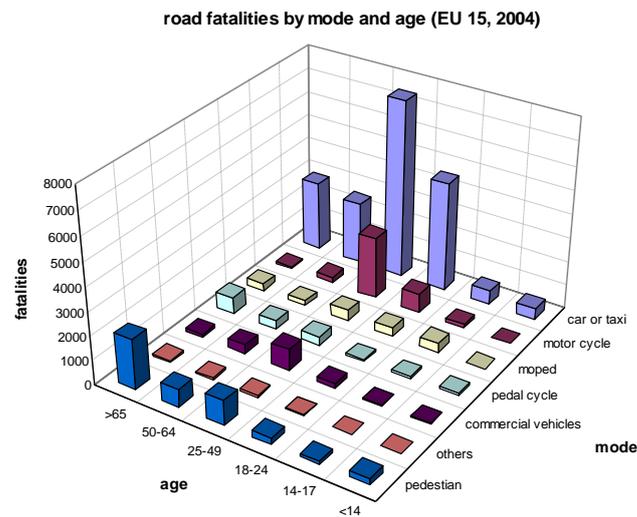


Abbildung 2.2: road fatalities by mode and age

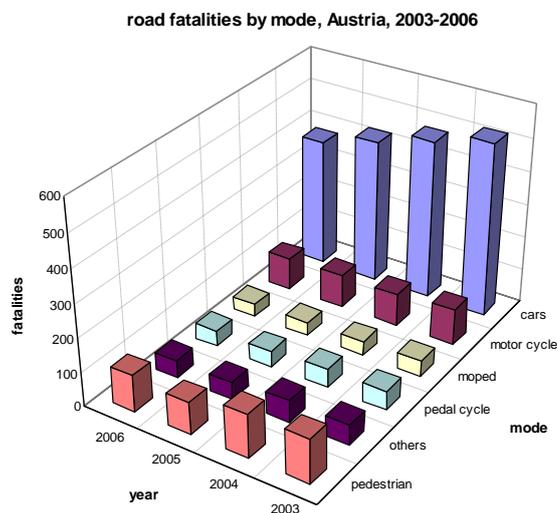


Abbildung 2.3: road fatalities by mode, Austria

Ähnliche Trends sind auch in Österreich zu beobachten, wie es in Abbildung 2.3 deutlich zu erkennen ist [STA07]. Im Jahr 2006 gab es in Österreich insgesamt 730 Verkehrstote, dies ist das niedrigste Ergebnis seit Beginn der bundesweiten Aufzeichnungen im Jahr 1961. In Summe wurden in Österreich im Jahr 2006 rund 40.000 Verkehrsunfälle mit

Personenschaden verzeichnet, dabei wurden 52.000 Personen verletzt [STA07]. Wie aber zu erkennen ist, nimmt die Anzahl der getöteten Insassen in den letzten Jahren deutlich ab, die Anzahl der Getöteten bei den anderen Straßenbenutzern stagniert hingegen.

Dieser Trend ist zu einem großen Teil auf verbesserte Fahrzeuge und einen moderneren Fuhrpark zurückzuführen. Die Sicherheit der Fahrzeuginsassen wurde insbesondere in den letzten Jahren vorwiegend durch Maßnahmen im Fahrzeug deutlich erhöht. Hier sind beispielsweise der Airbag, der vor kurzem sein 25-jähriges Jubiläum feierte, die Rückhaltesysteme mit Gurtstraffer und Gurtkraftbegrenzer sowie die sehr komplexen und umfangreichen Sicherheitsmaßnahmen an der Karosserie auf der Seite der passiven Sicherheit zu nennen. Durch Fahrwerkregel- und Fahrerassistenzsysteme wie etwa ABS oder ESP nimmt die Sicherheit der Fahrzeuge weiterhin zu. Der Schutz der ungeschützten Straßenbenutzer ist im Gegensatz dazu bisher noch nicht so umfangreich betrachtet und in die Entwicklung von Sicherheitssystemen integriert worden. Der Erlass neuer Gesetze, auf welche im nachfolgenden Kapitel näher eingegangen wird, führt jedoch dazu, die Bestrebungen in diesem Bereich voranzutreiben. Durch diese Anstrengungen ist eine Reduktion der verletzten und getöteten Fußgänger zu erwarten.

2.1.1 Fußgängerunfallstatistik

Im Jahr 2004 wurden in der Europäischen Union (EU-15) rund 32.000 Menschen bei Verkehrsunfällen getötet, etwa 4.600 davon waren Fußgänger, das ist ein Anteil von rund 14% an der Gesamtanzahl der Getöteten [EUR07]. Aufgrund der hohen Anzahl an verletzten und getöteten Fußgängern wurden im Rahmen nationaler und internationaler Forschungsaktivitäten zahlreiche Studien und Auswertungen durchgeführt. Detaillierte Analysen auf diesem Gebiet erfordern zum einen die Vollständigkeit der Daten des Unfalls, zum anderen eine umfangreiche Unfallrekonstruktion.

Für weitere Auswertungen im Zuge dieser Arbeit wurden vorwiegend die von IHRA/PS-WG¹ zur Verfügung gestellten Statistiken verwendet [IHR01]. Darin wurden Daten aus detaillierten Studien von Fußgängerunfällen aus Japan², Deutschland³, den Vereinigten Staaten von Amerika⁴ und Australien⁵ miteinander vereint, wodurch Informationen von insgesamt 1.605 Unfällen mit 9.463 Verletzungen in Form einer umfangreichen Datensammlung vorliegen. Dabei wurden die Fußgängerunfälle detailgetreu rekonstruiert und hinsichtlich einzelner Angaben untersucht, um damit aufschlussreiche Auswertungen der Unfalldaten zu ermöglichen. Analysiert und in die Datenstruktur aufgenommen wurden Unfallgeschwindigkeit, Alter des Fußgängers, Verletzungsschwere mit AIS⁶ Bewertung, Verletzungsregion am Körper und die Fahrzeugkomponente, die die Verletzung hervorgerufen hat.

¹ International Harmonized Research Activities Pedestrian Safety Working Group

² Daten der JARI, 1987 bis 1988; Daten einer "in-depth case study" von ITARDA, 1994 bis 1998

³ Daten der German In-Depth Accident Study (GIDAS), 1985 bis 1998

⁴ Pedestrian Crash Data Study (PCDS) der Vereinigten Staaten von Amerika, 1994 bis 1999

⁵ Daten der "at-the-scene" Untersuchung in Australien, 1999 bis 2000

⁶ Abbreviated Injury Scale, medizinische Klassifizierung der Verletzungen in einer Ordinalskala von 0 bis 6 mit zunehmender Verletzungsschwere.

Einfluss der Unfallgeschwindigkeit auf die Verletzungsschwere

Die Kollisionsgeschwindigkeit ist einer der wichtigsten Einflussfaktoren für die Verletzungsschwere bei Fußgängerunfällen. Wie in Abbildung 2.4 zu sehen ist, finden mit über 80% die meisten der Unfälle mit Kollisionsgeschwindigkeiten unterhalb von 45 km/h statt. Unfälle mit höheren Kollisionsgeschwindigkeiten sind hauptsächlich Außerorts zu verzeichnen. Die Verletzungsschwere ist bei geringeren Geschwindigkeiten niedriger, was in Abbildung 2.5 klar zu erkennen ist. Ebenso ist darin ersichtlich, dass Fußgängerunfälle mit Todesfolge vor allem bei höheren Kollisionsgeschwindigkeiten zu vermerken sind.

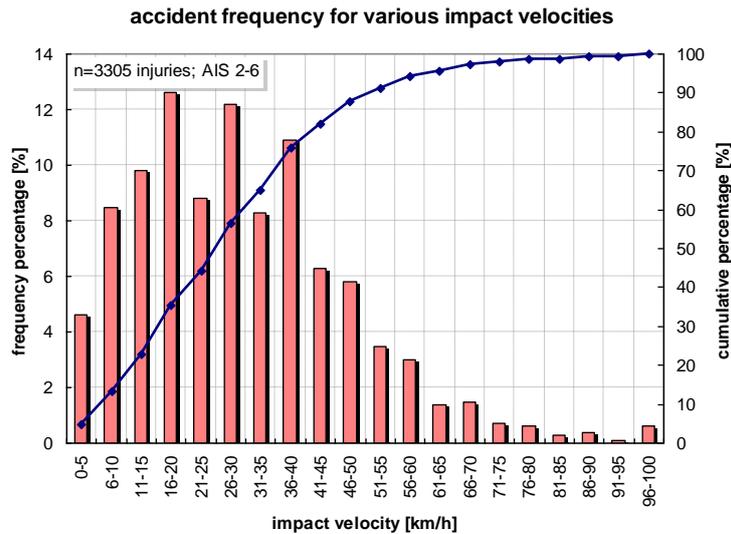


Abbildung 2.4: accident frequency for various impact velocities

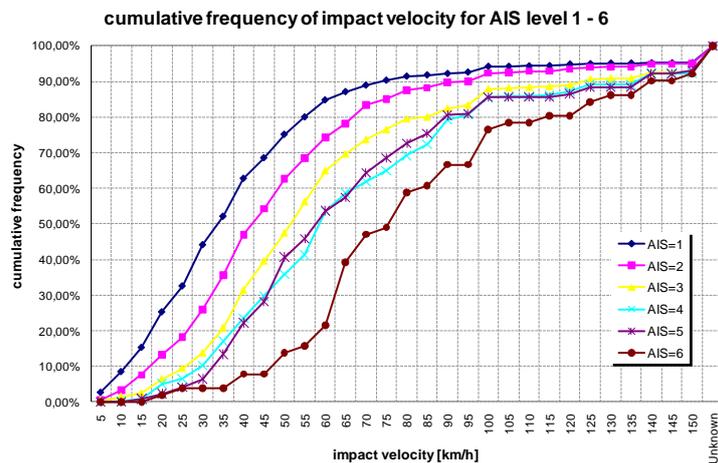


Abbildung 2.5: cumulative frequency of impact velocity, AIS 1 -6

Bei Kollisionsgeschwindigkeiten unterhalb von 50 km/h kann durch relativ einfache Maßnahmen eine Reduktion der Verletzungsschwere oder die Vermeidung des Unfalls erzielt werden. Hingegen reichen bei Kollisionsgeschwindigkeiten jenseits der 50 km/h Maßnahmen am Fahrzeug alleine nicht aus, um die Verletzungsschwere deutlich zu reduzieren – hier

müssen verstärkt alternative Wege beschriftet werden, um Unfälle solchen Ausmaßes gänzlich zu vermeiden. Innovative Ansätze, die sowohl das Sicherheitspotential des einzelnen Fahrzeuges, die Verkehrssituation inklusive dem Fußgänger, die Infrastruktur sowie die Kommunikation zwischen den einzelnen Beteiligten berücksichtigen, können hier zu einer Vermeidung des Unfalles beitragen.

Einfluss des Alters bei Fußgängerunfällen

Die Analyse der verunglückten Fußgänger bezüglich der unterschiedlichen Altersklassen zeigt eine relativ harmonische Verteilung. Lediglich bei den Altersklassen bis 20 Jahre liegen die Werte deutlich über dem Durchschnitt, wie in Abbildung 2.6 zu erkennen ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Personen in dieser Altersgruppe überdurchschnittlich oft mit dem Fahrrad oder zu Fuß unterwegs sind. Außerdem ist bei der Betrachtung der Verletzungen ein deutlicher Unterschied zwischen Jugendlichen bis zu einem Alter von 16 Jahren und Erwachsenen zu sehen. So zeigt Abbildung 2.7, dass bei den Jugendlichen rund 75% der Verletzungen (AIS 2+) bei Kollisionsgeschwindigkeiten kleiner 50 km/h zu vermerken sind – bis zur selben Kollisionsgeschwindigkeit hingegen nur rund 50% der Verletzungen (AIS 2+) bei Erwachsenen zu verzeichnen sind.

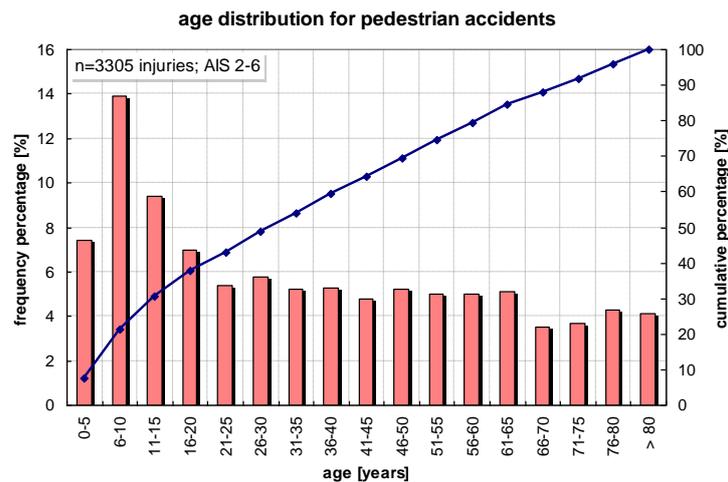


Abbildung 2.6: age distribution for pedestrian accidents

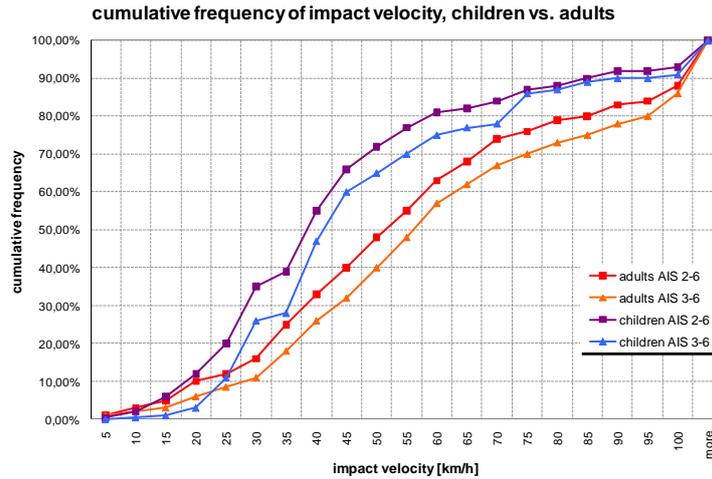


Abbildung 2.7: cumulative frequency of impact velocity, children vs. adults

Analyse der Körperregion

Bei Fußgängerkollisionen treten Verletzungen der unteren Extremitäten und des Kopfes am häufigsten auf. So betreffen nach [KUE04] 35% der Verletzungen die unteren Extremitäten, 33% den Kopf. In Abbildung 2.8 ist die Verteilung der Verletzungen auf die einzelnen Körperregionen basierend auf Daten aus [IHR01] dargestellt. Darin sind ebenfalls untere Extremitäten und Kopf als diejenigen Bereiche mit den häufigsten Verletzungen zu erkennen. Aus diesem Grund stehen diese beiden Körperregionen sehr häufig im Zentrum von Forschungsaktivitäten und einschlägiger Studien, beispielsweise bei der Analyse von Unfalldaten aber auch bei Testmethoden oder bei konstruktiven Maßnahmen.

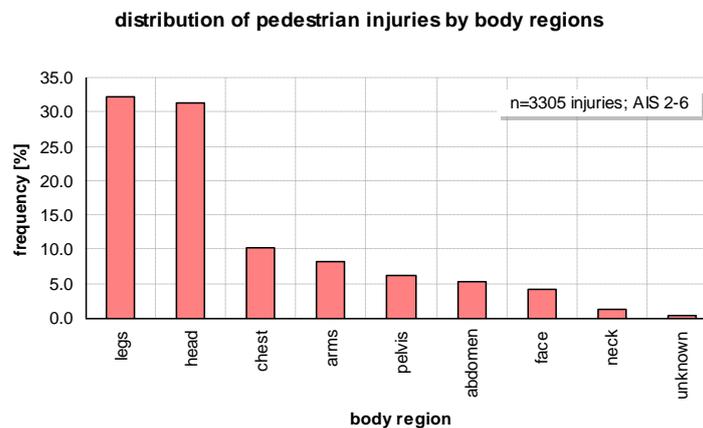


Abbildung 2.8: distribution of injuries by body region

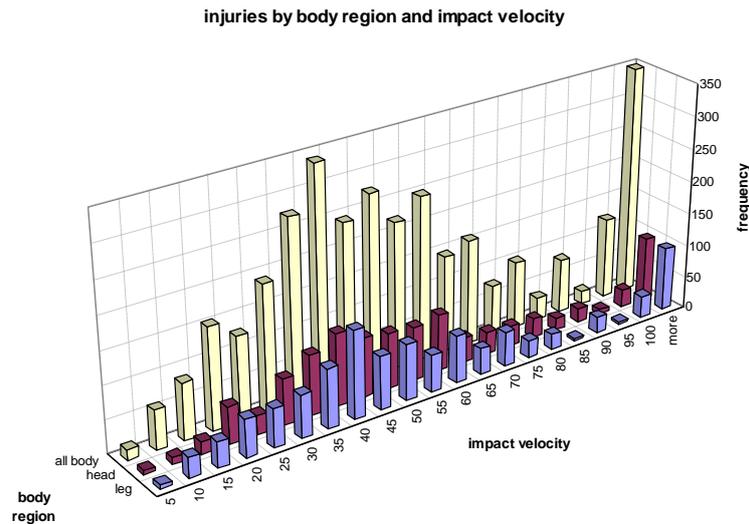


Abbildung 2.9: injuries by body region and impact velocity

In Abbildung 2.9 ist zu sehen, dass Verletzungen am Bein bereits bei relativ niedrigen Kollisionsgeschwindigkeiten eine große Rolle spielen – hingegen sind Kopfverletzungen im untersten Geschwindigkeitsbereich von geringerer Bedeutung, da es hier eher selten zu einem Aufprall des Kopfes auf harte Strukturen des Fahrzeugs oder der Fahrbahn kommt. Dabei ist auch zu beobachten, dass es einen deutlichen Unterschied zwischen leichten und schweren Kopfverletzungen in Abhängigkeit von der Kollisionsgeschwindigkeit gibt [MIZ05]. Schwere Kopfverletzungen treten vor allem bei höheren Geschwindigkeiten auf - dies ist einerseits auf den harten Anprall auf die Fahrzeugstruktur zurückzuführen, andererseits spielt hier der Sekundärkontakt mit der Fahrbahn eine sehr große Rolle. Die Abhängigkeit der Verletzungsschwere von der Kollisionsgeschwindigkeit ist bei den Beinverletzungen ebenfalls zu erkennen, jedoch sind die Unterschiede nicht so stark ausgeprägt.

Unterschiedliche Fahrzeugkomponenten als Verletzungsursachen

Der allererste Aufprall ist für den weiteren Verlauf des Unfalls und somit für dessen Folgen von entscheidender Bedeutung. Dabei ist der Frontalzusammenstoß des Fußgängers mit dem Fahrzeug mit Abstand die häufigste Kollisionsart. Aus diesem Grund sind auch die zur Reduktion der Fußgängerverletzungen im Bereich der Fahrzeugstruktur umgesetzten sowie geplanten Maßnahmen vorwiegend auf den Frontbereich gerichtet.

Die am häufigsten zum Einsatz kommenden Kontaktbereiche sind Stoßstange, Windschutzscheibe, Motorhaubenoberfläche und die vordere Motorhaubenkante. In Abbildung 2.10 ist die Verteilung von Fußgängerschutzverletzungen in Abhängigkeit von der zur Verletzung führenden Komponente des Fahrzeuges dargestellt. Die vier häufigsten Kontaktbereiche werden in den gesetzlichen Anforderungen berücksichtigt, auf weitere Kontaktstellen wird darin nicht eingegangen. Bei detaillierten Analysen der für Verletzungen verantwortlichen Fahrzeugbereiche, wie sie in Abbildung 2.11 dargestellt sind, ist deutlich zu erkennen, dass die vier wichtigsten verletzungsrelevanten Bereiche am Fahrzeug – Stoßfänger, Motorhaube,

Windschutzscheibe und Vorderkante – wie auch der Sekundärkontakt mit der Straße für rund 75% der Verletzungen maßgebend sind.

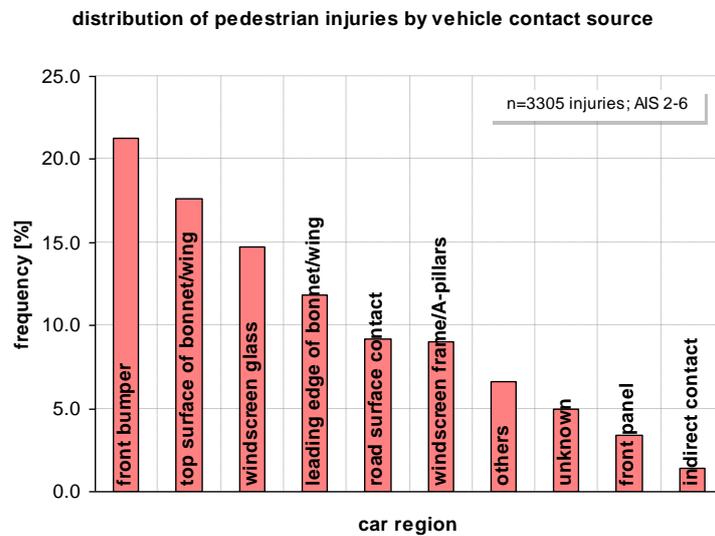


Abbildung 2.10: injury distribution by car regions

Bei den Kopfverletzungen dominieren als Verletzungsquelle Fronthaubenfläche und Windschutzscheibe inklusive Windschutzscheibenrahmen sowie die A-Säule, des Weiteren werden Verletzungen des Kopfes sehr häufig durch den Sekundärkontakt mit der Fahrbahn hervorgerufen. Diese Anprallbereiche werden ebenso wie die Windschutzscheibe, welche bei höheren Geschwindigkeiten speziell im Nahbereich des Rahmens für einen Großteil der Kopfverletzungen mitverantwortlich ist, in den derzeitigen europäischen Gesetzen nicht ausreichend berücksichtigt.

Der Sekundäraufprall, der einen erheblichen Anteil an den schweren Verletzungen insbesondere bei höheren Kollisionsgeschwindigkeiten hat, wird in den meisten Studien nur am Rande berücksichtigt. Er wird auch in den derzeit gültigen und nach wie vor diskutierten Gesetzen, welche im nachfolgenden Kapitel detaillierter behandelt werden, nicht beachtet. Hierfür eine geeignete Testmethode zu definieren stellt sich zudem als extrem schwierig heraus. Vor allem die Dynamik des menschlichen Körpers und das Zusammenspiel der einzelnen Körperteile können durch den Einsatz von Komponententests nicht ausreichend berücksichtigt werden.

Durch den harten Anprall auf der Fahrbahn können jedoch sehr schwere Kopfverletzungen hervorgerufen werden. Bei biomechanischen Studien wurde der Primärkontakt am Fahrzeug dem Sekundärkontakt auf der Fahrbahn gegenübergestellt. Dabei stellte sich heraus, dass beim Fahrbahnkontakt im Gegensatz zum Fahrzeugkontakt nahezu dreimal so hohe Belastungen auftreten können [HAH07].

Bei den Beinverletzungen spielt der Stoßfänger die dominante Rolle als Verletzungsquelle. Die Hauptursachen für Beckenverletzungen beim Primärkontakt sind Haubenvorderkante und Fronthaubenfläche sowie weitere Bereiche der Fahrzeugfront. Bei Fahrzeugen neueren Baujahres verliert die Haubenvorderkante als Verletzungsquelle für Beckenverletzungen auf

Grund des modernen Designs zunehmend an Bedeutung [KUE04]. In Abbildung 2.11 ist sehr deutlich zu erkennen, dass die Fronthaubenfläche für Verletzungen unterschiedlichster Körperregionen verantwortlich ist. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass bei den verwendeten Daten Fußgänger unterschiedlicher Größe analysiert wurden und somit die auf die Motorhaube anprallenden Körperregionen nicht immer dieselben waren.

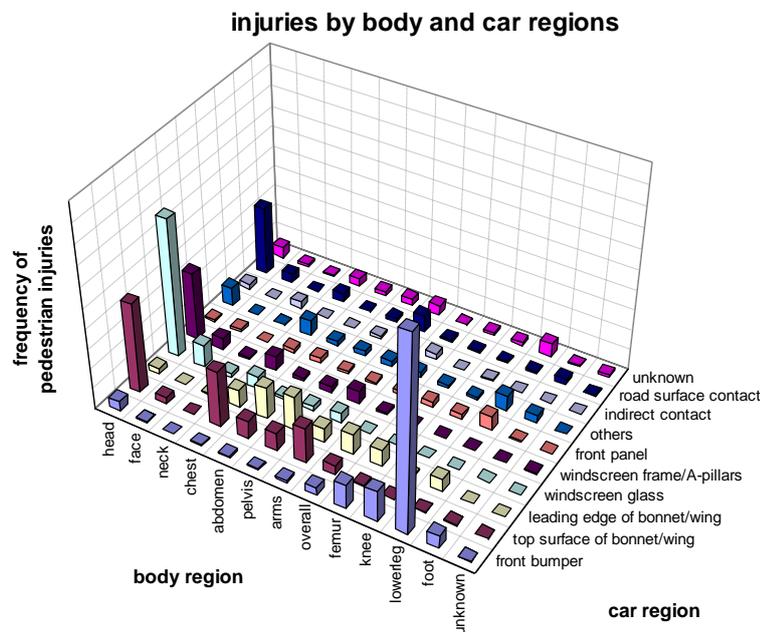


Abbildung 2.11: injuries by body and car regions

2.1.2 Phasen des Fußgängerunfalls

Jeder Verkehrsunfall kann prinzipiell in eine Pre-Crash, eine In-Crash und in eine Post-Crash Phase unterteilt werden. Die In-Crash Phase beim Fußgängerunfall kann man dabei wiederum in drei Phasen - Primäranprallphase, Flugphase und Sekundäranprallphase - unterteilen.

Pre-Crash Phase

Für die Pre-Crash Phase sind vor allem das Verhalten des Fußgängers, des Fahrers und des Fahrzeuges – hier speziell die Fahrerassistenzsysteme – von entscheidender Bedeutung. Durch geeignete Maßnahmen, beispielsweise Bremsassistenten¹, kann ein Unfall vermieden oder zumindest die Unfallfolgen deutlich reduziert werden. Nur durch die Kombination von solchen aktiven Sicherheitsfunktionen mit strukturellen Maßnahmen am

¹ Ein Bremsassistent (BAS) ist ein Fahrerassistenzsystem in einem Automobil, welches den Fahrer in einer Gefahrensituation unterstützt, indem es dafür sorgt, dass bei einem durch eine Gefahr induzierten Bremsmanöver der dafür notwendige Pedaldruck drastisch reduziert wird. Im Rahmen der zur Anwendung kommenden Algorithmen werden vor allem die Kennlinien des Bremskraftverstärkers verändert. Grundlage dafür sind beispielsweise die Geschwindigkeit, mit welcher das Bremspedal niedergedrückt wird, die Zeit zwischen dem letzten Gasimpuls und der Betätigung des Bremspedals (Gefahrenbremsung) oder die Geschwindigkeit, mit welcher das Gaspedal losgelassen wurde.

Fahrzeug kann man den Fußgänger ganzheitlich schützen. Zusätzlich zu diesen fahrzeugseitigen Maßnahmen muss insbesondere die Infrastruktur wie etwa Fußgängerübergänge, Haltestellen, Fußgängerzonen oder Beleuchtungsstrategien für einen verbesserten Schutz der Fußgänger entsprechend adaptiert werden.

In-Crash Phase

Der Frontalzusammenstoß zwischen Fußgänger und Fahrzeug ist die häufigste Anprallkonstellation bei Pkw-Fußgängerunfällen. In [KUE07] wird der Anteil dieser Konstellation am gesamten Unfallgeschehen mit Zahlen von 66% bis zu 77% angegeben. Unfälle mit einem Anprall auf der Fahrzeugseite sind mit rund 20 bis 25% der zweithäufigste Tatbestand bei Fußgängerunfällen. Gestützt durch diese Resultate wird in einer Vielzahl von Studien vor allem der Frontalzusammenstoß bei Fußgängerunfällen näher betrachtet. Im Mittelpunkt stehen Untersuchungen hinsichtlich der Anprallkonstellation, der Form der Fahrzeugfront und der daraus resultierenden Kinematik des Fußgängerunfalls [KUE07, KUE04, IHR01, HAH07, MIZ05, MIZ03, MOS00, SCH07a, SCH04, KRA99, STE01, ROE01].

Eine Vielzahl an Faktoren hat auf die Kinematik beim Fußgängerunfall großen Einfluss, hier muss man zwischen fußgängerbezogenen Faktoren und fahrzeugspezifischen Faktoren unterscheiden. Zu den fußgängerbezogenen Faktoren zählen die Masse und die Größe des Fußgängers, das Alter und der körperliche Zustand, des Weiteren der Bewegungsablauf während des Anpralls – insbesondere Gehgeschwindigkeit und Richtung, genaue Position mit Gewichtsverteilung sowie die Haltung des Körpers. Nicht zu vernachlässigen bei den menschlichen Faktoren sind die bewussten und unbewussten Reaktionen des Menschen vor und während des Unfalls - dadurch kann die Kinematik des Fußgängerunfalls erheblich beeinflusst werden. Aus diesem Grund ist auch eine detaillierte Simulation des Fußgängerunfalls und der resultierenden Kinematik sehr schwierig. Um dies in der Simulation nachzustellen sind digitale Menschmodelle mit Reaktionen und Muskelaktivitäten nötig, diese sind aber zurzeit am Markt noch nicht erhältlich, [HAH07].

Zu den fahrzeugspezifischen Faktoren zählen gewiss die Fahrgeschwindigkeit, der Fahrzustand (ungebremst – gebremst) sowie die gesamte Form und Gestaltung der Fahrzeugaußenkontur. Hierbei stehen vor allem Form und Gestalt des Stoßfängers, der Haube und des Windschutzscheibenbereichs im Mittelpunkt der Studien. Um vergleichbare und aussagekräftige Resultate zu erzielen, werden die Fahrzeuge bei den einzelnen Studien in unterschiedliche Kategorien unterteilt. In [IHR01, MIZ03] werden beispielsweise drei unterschiedliche Fahrzeugkategorien gebildet, wobei für die Analysen jeweils der obere und der untere Korridor sowie der Mittelwert der Fahrzeugfronten nachgebildet wurden. Für die einzelnen Studien wurden unterschiedliche Menschmodelle verwendet, um auch hier die Einflüsse der numerischen Simulation und der Diskretisierung aufzuzeigen.

Als Resultat der Simulationen können die unterschiedlichen Trajektorien der einzelnen Körperregion extrahiert sowie Rückschlüsse auf Anprallgeschwindigkeit und -winkel am Fahrzeug gezogen werden. Durch die voneinander abweichenden Einflussgrößen des Fahrzeuges und des Fußgängers werden die Randbedingungen für die Anprall- und Flugphase bestimmt. Durch die Krafteinleitungen am menschlichen Körper werden einzelne Körperteile oder auch der gesamte Körper verzögert und in Rotation versetzt. Je nach Form

der Fahrzeugfront werden speziell die Beine oder der Beckenbereich sehr stark in Rotation versetzt. Abhängig von der Anprallgeschwindigkeit und Krafteinleitung auf den menschlichen Körper kommt es zu unterschiedlichen horizontalen und vertikalen Ablösegeschwindigkeiten. Durch diese Faktoren werden Flugphase, Flugweite und -höhe und schließlich die aus dem Sekundäranprall resultierenden Verletzungen stark beeinflusst.

Post-Crash Phase

Relevant für die Post-Crash Phase sind vorrangig sichernde Maßnahmen. Dazu zählen einerseits die Vermeidung von weiteren Einwirkungen auf den Verunglückten wie, beispielsweise das Überrollen durch andere Fahrzeuge, andererseits die medizinische Versorgung des Verunglückten. Diese beginnt bei der Notversorgung des Verunglückten, Absetzen eines Notrufs, Leisten von erster Hilfe vor Ort und wird durch die Versorgung durch Rettung oder Krankenhaus fortgesetzt.

2.2 Prüfverfahren für den Fußgängerschutz

Die Sicherheit im Straßenverkehr kann in Aktive Sicherheit (Unfallvermeidung und Reduktion der Unfallschwere) und in Passive Sicherheit (Unfallfolgenreduzierung) unterteilt werden, wobei wiederum drei Ebenen unterschieden werden können, nämlich Mensch, Straße und Fahrzeug. Bezogen auf den Fußgängerschutz kann man diese Matrix mit adäquaten Maßnahmen füllen. In Tabelle 2.1 sind Vorkehrungen zum Schutz von Fußgängern basierend auf [KUE07], dargestellt. Um die Wirksamkeit der einzelnen Maßnahmen zu prüfen, müssen entsprechende Bewertungsmethoden entwickelt werden. Neben den Bewertungsmethoden zur Passiven Sicherheit von Fahrzeugen sind die Verfahren für straßenseitige Verbesserungsmaßnahmen am weitesten fortgeschritten. Die *fahrzeug-spezifischen Maßnahmen* werden meist durch die vom Staat oder der Europäischen Union vorgeschriebenen gesetzlichen Anforderungen an Fahrzeuge geregelt und von technischen Prüfinstituten auf ihre Erfüllung hin kontrolliert. Parallel dazu beschäftigen sich auch Verbraucherschutzorganisationen unterschiedlicher Länder mit diesen Themen. Maßnahmen an der *Infrastruktur* können gezielt beeinflusst werden, beispielsweise durch Stadt- und Landschaftsplanung oder gesetzliche Vorschriften die Schutzmaßnahmen auf der Straße betreffend. Am schwierigsten zu kontrollieren und zu beeinflussen sind Maßnahmen zur Reduzierung von Fußgängerverletzungen auf der Ebene *Mensch*. Hier muss man auf Vorkehrungen der öffentlichen Organe sowie gezielte Aus- und Weiterbildungen setzen.

Tabelle 2.1: Maßnahmen zur Unfallvermeidung und Unfallfolgenreduzierung

Maßnahmen	Fahrzeug	Infrastruktur	Mensch
Aktive Sicherheit (Unfallvermeidung)	Abbiegeassistent Aktives Kurvenlicht Sichtassistent (Infrarot, Radar, Lidar)	Lichtsignalanlagen Sichtkontakt Querungshilfen Beleuchtungsstrategien	Schulwegsicherung Ausbildung Weiterbildung
	ABS, ESP Geschwindigkeitsregelung Bremsassistent ADAS	Bauliche Geschwindigkeitsdämpfung (Kreisverkehr, Aufpflasterungen, Radarkasten)	Maßnahmen durch öffentliche Organe, z.B. Legislative (Bußgelder, Strafen)
Passive Sicherheit (Unfallfolgenreduzierung)	Fahrzeugfronten (Konstruktion, technische Maßnahmen) Notfallassistenten	Entschärfung des Straßenrandes Schutzplanken Sicherheitsaudits	Notfallmedizin Rettungswesen

2.2.1 Methoden zur Bewertung des fahrzeugseitigen Fußgängerschutzes

Die Frage, wie man Maßnahmen zum fahrzeugseitigen Fußgängerschutz auslegt und wie man diese dann entsprechend bewerten kann, beschäftigt schon seit geraumer Zeit Experten rund um die Arbeitsschwerpunkte Biomechanik und Fahrzeugtechnik. Im Laufe der Zeit haben sich zwei unterschiedliche Philosophien zu diesem Thema entwickelt – jene der Full-Scale-Tests und jene der Komponententests. Bei den Komponententests werden Prüfkörper, welche einzelne Körperteile oder Bereiche des menschlichen Körpers darstellen, verwendet, um die Fahrzeugfront hinsichtlich des Fußgängerschutzes zu prüfen. Beim Full-Scale-Test wird ein kompletter Dummy als Testobjekt verwendet.

Prinzipiell lassen sich beide Prüfverfahren zur Untersuchung der fahrzeugspezifischen Maßnahmen anwenden, beide haben jedoch eine Vielzahl an Vor- und Nachteilen. In Tabelle 2.2 werden wesentliche Kriterien für die beiden Prüfverfahren zusammengefasst und einander gegenübergestellt, berücksichtigt werden dabei Kriterien nach [KUE07, HAH07, HAH06] und eigene Ergänzungen. Die Unterschiede in der Tabelle machen deutlich, dass der Aufwand und die Kosten für Full-Scale-Tests erheblich größer sind, die Aussagekraft dieser Tests hinsichtlich eines gesamtheitlichen Fußgängerschutzes aber deutlich höher ist und Potential für zukünftige Entwicklungen offen lässt.

Full-Scale-Testing

Die unterschiedlichen Gremien, welche für die Bewertung des Fußgängerschutzes und für die Gesetzgebung verantwortlich sind, haben sich, vorwiegend basierend auf den Kriterien, welche in Tabelle 2.2 dargestellt sind, auf die Verwendung von Komponententests geeinigt. Aber speziell die japanischen Automobilhersteller starteten Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich Full-Scale-Testing. Honda entwickelte mit dem POLAR Dummy einen eigens für den Fußgängerschutz abgestimmten Dummy, welcher über einen speziellen Aufbau im Kniebereich und im Thorax verfügt. Während der Entwicklung wurde der Fußgängerdummy mit zahlreichen biomechanischen Untersuchungen validiert [TAK05, KER05, AKI01, ART00]. Mit dem POLAR Dummy kann die Kinematik des Menschen bei einer Fußgänger-kollision prinzipiell sehr gut dargestellt werden. Unterschiede bei der Position und Schrittstellung des Dummys, der daraus resultierenden Gewichtsverteilung, dem Erstanprallpunkt mit dem Fahrzeug und vor allem die dynamische Bewegung des Dummys, welche durch lokale Steifigkeitsunterschiede der Fahrzeugfront erheblich beeinflusst werden kann, stellen Faktoren dar, welche beim Full-Scale-Testing betrachtet werden können. Diese sorgen aber schließlich auch dafür, dass diese Form der Kinematik in der Realität nicht reproduzierbar darstellbar und somit für die gesetzliche Überprüfung in der modernen Fahrzeugentwicklung nicht geeignet ist. Vor allem die Validierung mit der numerischen Simulation stellt durch große Schwankungen und Unsicherheiten auf diesem Gebiet eine beachtliche Herausforderung dar.

Tabelle 2.2: Gegenüberstellung Full-Scale-Test vs. Komponententest

Prüfverfahren	Full-Scale-Test	Komponententest
Kosten je Versuch	hoch	niedrig
Zeitaufwand	hoch, viel Vor- und Nachbereitungszeit erforderlich	niedrig
Reproduzierbarkeit	mäßig, besonders bei Fußgängerdummys, starke Einschränkung bei der Wahl der Prüfpunkte	sehr gut, Prüfpunkte, z.B. für den Kopfanprall, können frei gewählt werden
Vorhersagbarkeit der Versuchsergebnisse durch numerische Simulation	mäßig, geringe Abweichungen in der Kinematik führen aufgrund lokaler Steifigkeitsunterschiede zu sehr unterschiedlichen Messungen	gut, da Prüfbedingungen genau definiert sind
Wissensbedarf über das zugrunde liegende Unfallgeschehen	gering, Test liefert im Idealfall Wissen über Kinematik und Randbedingungen	hoch, für realistische Prüfbedingungen muss Kinematikwissen unabhängig ermittelt werden
Biomechanische Betrachtungen, Kinematik	gut, Kinematik kann durch aufwändige Nachbildung der Biomechanik sehr gut nachgestellt werden, biofidele Abbildung einzelner Bereich sehr gut möglich	mäßig, gewählte Kriterien sind zu hinterfragen, durch Starrkörper wird die Kinematik z. T. relativ schlecht abgebildet
Potential zum Auslegen zukünftiger Systeme der integrierten Sicherheit	Gesamtheitliche Betrachtung des Fußgängerschutzes, von der Erkennung bis zur Aufprallsensorik und zur Auslösung aktiver Systeme	Testszenario für aktive Sicherheitssysteme sehr schwierig
Möglichkeiten in der numerischen Simulation	Forschungsbedarf bei der Darstellung der komplexen Kinematik	Abbildung der Komponenten in der numerischen Simulation sehr gut
Vergleich mit dem realen Unfallgeschehen	Gute Übereinstimmungen mit dem realen Unfallgeschehen möglich, keine Abbildung menschlicher Reaktionen möglich (jedoch ist eine hohe Versuchsanzahl nötig, um ein repräsentatives Unfallspektrum abzudecken)	In Kombination mit ausführlicher Unfallanalyse und -statistik

Um das Potential für den Fußgängerschutz zu erhöhen, wird verstärkt in internationalen Arbeitsgruppen auf dem Gebiet des Full-Scale-Testings geforscht. In den Vereinigten Staaten von Amerika arbeitet aktuell eine Gruppe von Forschern Anforderungen an einen Fußgängerdummy aus [CRA05, KER05]. Parallel dazu wird am Fußgängerdummy POLAR weitergeforscht, um diesen hinsichtlich Biofidelity und Handhabbarkeit zu verbessern.

Numerische Full-Body Simulation

Mit der numerischen Simulation steht ein Entwicklungswerkzeug zur Verfügung, die es dem Entwicklungsingenieur, aber auch anderen Forschungsgruppen wie Medizinern, Unfallgutachtern oder Biomechanikern erlaubt, detailliert die Vorgänge eines Fußgängerunfalls zu analysieren. Dazu können unterschiedlich Simulationsmethoden zur Anwendung kommen.

Für die Fußgängerschutzsimulationen werden vor allem zwei Methoden eingesetzt – die Mehrkörpersimulation (MKS) und die Simulation mit Hilfe der Finite Elemente Methode (FEM). Die MKS kommt vor allem bei Analysen der Kinematik und zur Abbildung des gesamten Fußgängerunfalls zur Anwendung. Durch deutlich geringere Rechenzeiten können hier umfangreiche Studien durchgeführt werden und das gesamte Unfallgeschehen in der virtuellen Welt analysiert werden. Die MKS ermöglicht die Simulation der Aufprallkinematik und vereinfacht auch Aussagen über die Energieaufnahme des Fußgängers bzw. der Fahrzeugfront. Auch Aussagen über Aufwürfe und Kinematik des Fußgängers während der einzelnen Phasen des Unfalls können getroffen werden. Die Aussagekraft für detaillierte Betrachtungen der Krafteinleitung und der daraus resultierenden Verletzungsschemata ist jedoch durch die starken Vereinfachungen dieser Simulationsmethoden sehr beschränkt.

Deutlich mehr kann aber bei der Fußgängerschutzsimulation mit modernen FEM erreicht werden. Für numerische Analysen werden unterschiedliche kommerzielle Modelle und eine Vielzahl an Eigenentwicklungen eingesetzt. Die größten Vorteile können die FEM Modelle bei detaillierten Analysen ausspielen, da hier genaue Betrachtungen hinsichtlich der Krafteinleitungen oder der Ausbildung von Verletzungen (Quetschungen, Brüche, usw.) durchgeführt werden können. Ein für Fußgängersimulationen weit verbreitetes numerisches Modell ist das Menschmodell THUMS¹, ein von Toyota entwickeltes Modell zur verbesserten Abbildung des Menschen für die Fahrzeugsicherheitssimulation [MAE01]. Dieses Modell wird bei zahlreichen biomechanischen Untersuchungen weltweit verwendet und durch ständige Weiterentwicklungen und zusätzliche Validierungen laufend verbessert. Im Rahmen der europäischen Forschungsprojekte HUMOS² und HUMOS II wurde ein weiteres kommerziell vertriebenes Menschmodell entwickelt - ebenfalls mit dem Schwerpunkt Fahrzeugsicherheit.

In zahlreichen Studien konnte durch die numerische Simulation und durch die komplexen Menschmodelle der starke Einfluss des Fahrzeugfrontdesigns nachgewiesen werden. Hier konnten speziell die Auswirkungen der Frontgestaltung auf die Krafteinleitung und die daraus resultierenden Verletzungscharakteristika wie Bein- oder Beckenverletzungen gezeigt werden [SCH07, SNE05, SCH04]. Ebenso wie die Verletzungen der unteren Extremitäten kann durch die numerische Simulation auch das Entstehen von Verletzungen in den anderen Körperregionen zufriedenstellend dargestellt werden. Die Simulation des gesamten Bewegungsablaufs mit FEM Modellen wird beispielsweise in [HAH07] dargestellt. Dabei kann vor allem die Kinematik während der frühen Anprallphase - also Bein- und Hüftanprall - sehr gut nachgestellt werden. Während des Bewegungsablaufes werden die Abweichungen zwischen Simulation und realen Versuchen jedoch immer größer.

¹ Total Human Model for Safety, numerisches Menschmodell für die Fahrzeugsicherheit

² HUMAN MOdels for Safety I and II, European Research Project funded by the European Commission

Diese Abweichungen treten vor allem durch Unzulänglichkeiten im Bereich der Modellierung des aktiven Verhaltens des Menschen auf. Die Kinematik beim Unfall und somit auch die daraus resultierenden Verletzungen werden erheblich durch die Reaktionen und die daraus folgenden Muskelaktivitäten und Bewegungen des Menschen beeinflusst. Eine aktiv gesteuerte Simulation wäre vor allem notwendig, um den gesamten Bewegungsablauf beim Fußgängerunfall – von Beinanprall über das Abrollen an der Fahrzeugfront, Bewegungen der oberen Extremitäten, den Aufprall des Kopfes auf der Struktur oder auch den Sekundärkontakt mit dem Untergrund – nachzustellen. Ein solches Verhalten kann bei den heute verfügbaren numerischen Modellen noch nicht zufriedenstellend modelliert und simuliert werden, hier gibt es noch genügend Forschungs- und Handlungsbedarf, um detaillierte numerische Modelle zu entwickeln [HAH07]. Damit wäre es möglich, eine umfassende und realitätsnahe Simulation des Fußgängerunfalls durchzuführen – realitätsnaher, als es mit vorhandenen numerischen Modellen, Full-Scale-Tests mit Dummies oder auch PMHS¹ Untersuchungen möglich ist. Unterschiedliche Ansätze, ein aktives menschliches Verhalten in der Fahrzeugsicherheit zu simulieren, werden bereits in europäischen Forschungsprojekten behandelt; es ist jedoch noch eine Vielzahl an Forschungsaktivitäten notwendig, bis numerische Modelle in zufriedenstellender Qualität kommerziell verfügbar sind. Im nächsten Schritt müssen die Methoden in den automotiven Entwicklungsprozess integriert werden, außerdem müssen die numerischen Menschmodelle auch seitens der Gesetzgeber für die Entwicklung fahrzeugsicherheitsrelevanter Systeme akzeptiert werden.

Komponententest

Im Gegensatz zu Full-Scale-Tests bilden Komponententests nur einen Ausschnitt des realen Unfallgeschehens ab. Für unterschiedliche Anwendungsgebiete in der Fahrzeugtechnik und in der Fahrzeugsicherheit hat sich die Verwendung von Komponententests zur Überprüfung einzelnen Funktionen und Anforderungen aufgrund ihrer hohen Reproduzierbarkeit und ihres einfachen Prüfaufbaus etabliert. Beispielsweise gibt es für den Fahrzeuginnenraum Komponententests nach ECE-R21² zur Überprüfung des Cockpits mit einem Pendel oder die FMVSS 201³ zur Überprüfung des Innenraums mit einem frei fliegenden Kopfpimpaktor.

Im Rahmen von Forschungsaktivitäten wurden auch für den Fußgängerschutz Komponententests entwickelt. Dabei sind ein Bein-, ein Hüft- und unterschiedliche Kopfpimpaktoren definiert worden, um die markantesten Anprallkonstellationen von Fußgängerunfällen abzubilden. Die unterschiedlichen Impaktormassen orientieren sich an den typischen Massen von einzelnen Körperteilen, ebenso wie die konstruktive Ausführung des jeweiligen Impaktors die abzubildende Körperregion wiedergibt. Durch geeignete Messmethoden werden die Belastungen am Impaktor gemessen und auf dieser Basis definierte Verletzungskriterien errechnet. Durch einzelne Komponententests kann die

¹ PMHS: Post Mortal Human Surrogate

² European Commission for Europe – Regulation 21: uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to their interior fittings

³ Federal Motor Vehicle Safety Standard 201 - Occupant Protection in Interior Impact

Sicherheit der Fahrzeuge relativ einfach überprüft werden, die komplexen kinematischen Zusammenhänge beim Fußgängerunfall können jedoch nicht nachgestellt werden.

2.2.2 Europäische Gesetzeslage zum Fußgängerschutz

Seit Beginn der 80er Jahre beschäftigen sich unterschiedliche Arbeitsgruppen der Europäischen Union mit dem Thema Fußgängerschutz. Auf Basis von zahlreichen Untersuchungen wurde eine Reihe von Testvorschriften erarbeitet, einerseits für Full-Scale-Tests, andererseits auch für Komponententests. Vorschläge für eine gesetzliche Regelung basierend auf Komponententests wurden durch die EEVC WG 10 im Jahr 1994 und EEVC WG 17 im Jahr 1998 vorgelegt [EUR96, EUR 98]. 2001 veröffentlichte die europäische Automobilindustrie eine Selbstverpflichtung zum Thema Fußgängerschutz, welche das stufenweise Inkrafttreten einer gesetzlichen Regelung vorsieht [ASS01]. Ende 2003 wurde schließlich vom europäischen Parlament eine Richtlinie verabschiedet, welche eine Prüfprozedur zum Schutz von Fußgängern und anderen ungeschützten Verkehrsteilnehmern bei Kollisionen mit Kraftfahrzeugen beinhaltet [EUR03]. Im Oktober 2005 trat die erste Phase dieses Gesetzes in Kraft und wurde damit zu einem Bestandteil des Zulassungsverfahrens für alle neuen Fahrzeugtypen.

Zusätzliche Untersuchungen hinsichtlich der Effektivität sowie der technischen Machbarkeit und Umsetzbarkeit der Richtlinie wurden von der Europäischen Kommission, der Automobilindustrie und von Forschungseinrichtungen durchgeführt und veröffentlicht [HAN04, TRL06, ECE06]. Basierend auf diesen Ergebnissen wurde 2007 von der Europäischen Kommission ein Vorschlag für eine technische Regelung eingereicht [COM07]. Am 14. Jänner 2009 wurde die Verordnung Nr. 78/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates veröffentlicht, [EUR09], welche die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen im Hinblick auf den Schutz von Fußgängern und anderen ungeschützten Verkehrsteilnehmern regelt. Diese Verordnung hebt gleichzeitig die Richtlinien 2003/102/EG und 2005/66/EG [EUR03, EUR05] auf.

Eine detaillierte Aufstellung der gesetzlichen Entwicklung zum Thema Fußgängerschutz ist in Tabelle 2.3 dargestellt.

Tabelle 2.3: Entwicklung der europäischen Gesetzeslage zum Fußgängerschutz

Zeit	Aktivitäten
80er Jahre	Erste Untersuchungen des EEVC ¹ im Bereich des Fußgängerschutzes, Anprallversuche mit PMTO ² und Dummies, Projekt G 6
1981	Erster Vorschlag für ein Testverfahren, Anprallgeschwindigkeit 30 und 40 km/h, 50% Mann und 6 Jahre altes Kind als Dummies, Empfehlung, zukünftige Forschungsaktivitäten in den Bereich Komponententest zu verlagern (Reproduzierbarkeit, einfaches Prüfverfahren)
1982 – 1985	EEVC WG 7, Untersuchung von Komponententests mit einzelnen Prüfkörpern

¹ European Enhanced Vehicle Safety Committee

² Post Mortal Test Objects

1987	Gründung der EEVC WG 10, Entwicklung einer Testprozedur basierend auf Komponententests, 1991 erster Prüfvorschlag
1994	Abschlussbericht der EEVC WG 10, welcher eine Prüfprozedur für den fahrzeugseitigen Fußgängerschutz beinhaltet
1996	Veröffentlichung der entwickelten Prüfprozedur als Gesetzesentwurf
1997	Gründung der EEVC WG 17 mit dem Auftrag, den ersten Vorschlag zu prüfen und zu überarbeiten
1997	Erste Testergebnisse hinsichtlich des Fußgängerschutzes werden durch Euro NCAP ¹ veröffentlicht
1998	Veröffentlichung des Abschlussberichtes der EEVC WG 17 inklusive eines überarbeiteten Gesetzesentwurfs
2001	ACEA ² freiwillige Selbstverpflichtung, Vorschlag für ein Prüfverfahren basierend auf den Ergebnissen der EEVC WG 17 und eigenen Forschungsergebnissen, im November 2001 stimmt der Ministerrat der freiwilligen Selbstverpflichtung zu
2002	Überarbeiteter Abschlussbericht der EEVC WG 17, Basis für die EU-Richtlinien
2002	EEVC WG 17 mit neuen Aufgaben, Arbeit wird im Bereich Unfallanalysen und Erweiterung der Testmethoden (Dummy-, Komponenten- und Subsystemtests) fortgesetzt, Prüfen der Möglichkeit zur Durchführung virtueller Tests und Simulationen, Vertretung der Europäischen Union in der IHRA PS WG und später auch Zusammenarbeit mit GRSP ³ in Hinblick auf eine GTR ⁴
2002	Euro NCAP testet ab Phase 10 mit geänderten Randbedingungen und Bewertungssystemen basierend auf EEVC WG 17 Prüfvorschriften, Windschutzscheibenbereich ist im Kopfaufschlag-Prüfbereich nach Euro NCAP enthalten
2003	Richtlinie 2003/102/EC wird im Amtsblatt der EU veröffentlicht und tritt somit in Kraft: Directive 2003/102/EC of the European Parliament and of the Council of 17 November 2003 relating to the protection of pedestrians and other vulnerable road users before and in the event of a collision with a motor vehicle and amending Council Directive 70/156/EEC, schrittweises Inkrafttreten der gesetzlichen Anforderungen, Phase I ab 2005, Phase II ab 2010
2004	Die für die passive Sicherheit zuständige Abteilung der UNECE ⁵ wird beauftragt, eine globale technische Vorschrift GTR für den Fußgängerschutz zu erarbeiten, Basis sind bereits existierende Forschungsergebnisse anderer Organisationen, Vorschlag für ein Testverfahren orientiert sich sehr stark an den der europäischen Richtlinie
2004	Unabhängige Durchführbarkeitsbewertung der gesetzlichen Anforderungen, Untersuchung insbesondere hinsichtlich alternativer technischer Maßnahmen – entweder passiver Maßnahmen oder einer Kombination aus aktiven und passiven Maßnahmen – mit mindestens gleichwertiger Wirksamkeit, Ergebnis: derzeit sind die Anforderungen der Phase II technisch nicht vollständig umsetzbar
2005	Rein passive Maßnahmen der derzeitigen Phase II sollen durch eine Mischung aus aktiven und passiven Maßnahmen ersetzt werden, Änderung der Direktive erforderlich, Direktive soll durch Regelung ersetzt werden

¹ European New Car Assessment Programme

² Association des Constructeurs Européens d'Automobiles, Vereinigung der europäischen Automobilindustrie

³ Groupe de Rapporteurs sur la Sécurité Passive (Expertengremium für WP29)

⁴ Global Technical Regulation

⁵ United Nations Economic Commission for Europe

2005	Ersatz des TRL Beinimpaktors durch den FLEX-PLI wird diskutiert, umfangreiche Untersuchungen notwendig, derzeit aktuelle Version FLEX-GT
2005	Richtlinie 2005/66/EC wird im Amtsblatt der EU veröffentlicht und tritt somit in Kraft: DIRECTIVE 2005/66/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 26 October 2005 relating to the use of frontal protection systems on motor vehicles and amending Council Directive 70/156/EEC
2006	Die Europäische Kommission gibt weitere Studien in Auftrag, Berechnung der Effektivität auf Basis der GTR zum Fußgängerschutz
2007	Neuer Entwurf einer Regelung wird erstellt und eingereicht; COD/2007/0201; Road safety: protection of pedestrians and other vulnerable road users (repeal. Directives 2003/102/EC and 2005/66/EC), Prozesse zur Begutachtungen und Änderungen bis 14.01.2009
2009	14.01.2009: Veröffentlichungsbedürftige Rechtsakte, die in Anwendung des EG-Vertrags/Euratom-Vertrags erlassen wurden: Verordnung (EG) Nr. 78/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. Januar 2009 über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen im Hinblick auf den Schutz von Fußgängern und anderen ungeschützten Verkehrsteilnehmern, zur Änderung der Richtlinie 2007/46/EG und zur Aufhebung der Richtlinien 2003/102/EG und 2005/66/EG

2.2.2.1 Prüfmethode nach 2003/102/EC

Das vom Europäischen Parlament im Jahr 2003 festgelegte Testverfahren basiert auf Komponentenversuchen ähnlich wie sie in vorangegangenen Vorschlägen der EEVC Arbeitsgruppen definiert wurden. Dabei werden Prüfkörper, welche die Körperteile Kopf, Oberschenkel und Bein darstellen, zur lokalen Prüfung des Fahrzeugvorderwagens eingesetzt, sie sind schematisch in Abbildung 2.12 zu erkennen sind. Mit den unterschiedlichen Impaktoren werden dadurch drei typische Anprallsequenzen während eines Fußgängerunfalls simuliert:

- Anprall des Beines eines Erwachsenen von der Seite an den Stoßfänger,
- Anprall des Oberschenkels eines Erwachsenen an die Haubenvorderkante sowie
- Anprall des Kopfes von Kindern und Erwachsenen auf die Haube und Bereiche der Windschutzscheibe.

Bei den einzelnen Komponententests müssen definierte biomechanische Grenzwerte eingehalten werden. Die Grenzwerte für den Beinimpaktor sind die Tibiabelschleunigung, die Kniescherung und die Kniebiegung. Beim Hüftimpaktor werden Kräfte und Momente, welche während des Anpralls auf den Impaktor wirken, als Kriterien verwendet. Bei den Kopfimpaktoren wird der HIC¹ Wert als relevante Kenngröße herangezogen.

¹ Head Injury Criterion, Kriterium zur Bewertung von Kopfverletzungen

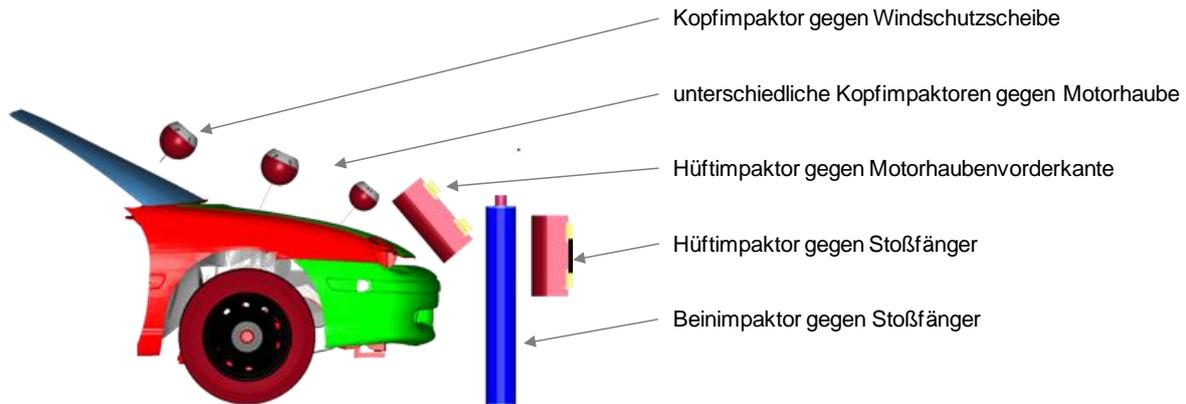


Abbildung 2.12: Prinzipdarstellung der Komponententests für den Fußgängerschutz

Die gesetzliche Richtlinie sieht ein Inkrafttreten der Anforderungen in mehreren Stufen vor. Seit Oktober 2005 müssen alle neuen Fahrzeugtypen (Neuzertifizierungen) die gesetzlichen Anforderungen der Phase 1 erfüllen. Die Richtlinie sieht ein Inkrafttreten einer Phase 2 ab September 2010 vor. Die Randbedingungen für die einzelnen Tests, die Definition der Impaktoren und die gesetzlich fixierten Grenzwerte der beiden Phasen unterscheiden sich deutlich voneinander. Eine Gegenüberstellung der einzelnen Parameter ist Tabelle 2.5 zu entnehmen.

2.2.2.2 Impaktoren für den Fußgängerschutz nach 2003/102/EC

Zur Überprüfung des fahrzeugseitigen Fußgängerschutzes werden, wie oben kurz dargestellt, unterschiedliche Impaktoren verwendet. Diese werden mit definierten Randbedingungen auf die unterschiedlichen Bereiche der Fahrzeugfront geschossen. Dabei müssen drei Kategorien von Impaktoren unterschieden werden:

- Kopfimpaktoren,
- Beinimpaktor und
- Hüftimpaktor.

Die einzelnen physikalischen Impaktoren werden in den Forschungsaktivitäten der Europäischen Union entwickelt, laufend verbessert und vor allem in enger Zusammenarbeit mit unabhängigen Prüfinstituten und Automobilherstellern auf ihre Praxistauglichkeit hin getestet, [EUR96, EUR 98, ASS01, EUR03]. In dieser vorliegenden Arbeit werden für alle fußgängerschutzrelevanten Untersuchungen die in 2003/102/EC [EUR03] detailliert beschriebenen Impaktoren eingesetzt.

Dies sind drei unterschiedliche Kopfimpaktoren – 2.5 kg Kinderkopf, 3.5 kg Kinderkopf und 4.8 kg Erwachsenenkopf – der Beinimpaktor und der Hüftimpaktor. In diesem Abschnitt wird der physikalische Aufbau der einzelnen Impaktoren kurz dargestellt, eine ausführliche technische Dokumentation ist in [ECE06] nachzuschlagen.

Kopfimpaktoren

Die unterschiedlichen Kopfimpaktoren bestehen aus einem zweiteiligen Aluminiumkern und einem PVC Überzug. Die charakteristischen Maße der unterschiedlichen Impaktoren sind in Tabelle 2.4 zusammengefasst, eine schematische Darstellung eines Kopfimpaktors ist in Abbildung 2.13 dargestellt.

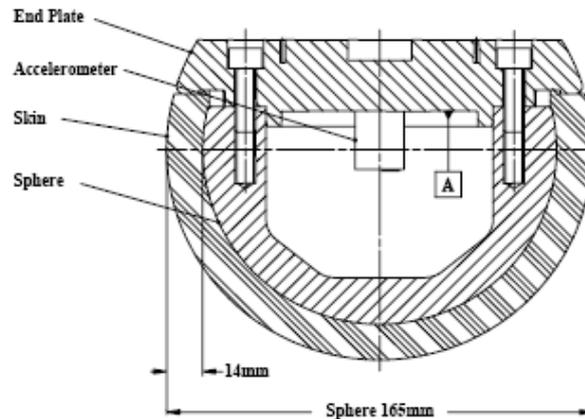


Abbildung 2.13: schematische Darstellung eines Kopfimpaktors [ECE09]

Der PVC Überzug wird beim Zusammenbau über die Aluminiumhalbkugel gestülpt, und dann mit der Rückplatte zwischen den beiden Aluminiumteilen geklemmt.

Für die Bewertung des Versuchs ist im Schwerpunkt der Impaktoren ein 3-achsiger Beschleunigungsaufnehmer angebracht. Aus den gemessenen Beschleunigungssignalen wird anschließend der HPC¹ Wert als relevantes Kriterium ermittelt, die Berechnung des Kriteriums ist in Formel 2.1 zu sehen.

Tabelle 2.4: charakteristische Maße der Kopfimpaktoren

Größe	Einheit	Kinderkopf	ACEA-Kinderkopf	Erwachsenenkopf
Durchmesser	mm	130	165	165
Dicke der Kopfhaut	mm	11.0	13.9	13.9
Masse	kg	2.5 (±0.05)	3.5 (±0.07)	4.8 (±0.10)
Trägheitsmoment	kgm ²	0.0036 (±0.0003)	0.0100 (±0.0020)	0.0125 (±0.0010)

¹ HPC: Head Protection Criteria ist ein Schutzkriterium für den Kopf, dabei werden die aus den resultierenden, translatorischen Beschleunigungen, die im Kopfschwerpunkt des Dummys gemessen werden, verwendet, um den Level des Schutzkriteriums zu berechnen., vgl. auch mit HIC – Head Injury Criterion

Die Aufprallbereiche, die für die unterschiedlichen Kopfimpaktoren Gültigkeit haben, und während der Entwicklung betrachtet werden müssen, sind von geometrischen Einflussgrößen des Fahrzeuges abhängig. Die Anprallfläche wird durch die Gestaltung der Fahrzeugfront im Bereich der Motorhaube und der Kotflügel, aber vor allem der Wrap Around Distance¹ (WAD) definiert und aufgespannt. Details zu Anprallfläche für den Kopfanprall sind in Abschnitt 5.3 nachzuschlagen, ansonsten sei hier auf die einschlägige Literatur und die Gesetzestexte in [EUR03, EUR04, ECE06, EUR09] verwiesen.

$$HPC = \left\{ \left(\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a \, dt \right)^{2.5} (t_2 - t_1) \right\}$$

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$$

HPC ... Head Protection Criteria

t_1, t_2 ... zeitliche Intervallgrenzen mit t [s], wobei $\Delta t = t_2 - t_1 \leq 0.015$ s

a_x, a_y, a_z ... laterale Kopfbeschleunigungen in x, y und z

a ... resultierende Kopfbeschleunigung mit a [g]

Formel 2.1: Head Protection Criteria

Beinimpaktor

Der Impaktor repräsentiert ein Bein eines durchschnittlichen erwachsenen Mannes. Der Grundaufbau besteht aus zwei Segmenten mit einem Durchmesser von 70 mm, dem Unterschenkel und dem Oberschenkel. Die beiden Metallrohre sind mit plastisch deformierbaren Knieelementen miteinander verbunden, wodurch während des Anpralls eine Relativrotation zwischen den beiden Segmenten ermöglicht wird. Diese elasto-plastische Verformung, die einer lateralen Belastung des Knies darstellt, wird in der weiteren Ausführung als Biegung oder Biegewinkel bezeichnet. Im Oberschenkel ist eine Stahlfeder integriert, diese dient zur Darstellung der translatorischen Relativbewegung der beiden Segmente und wird in weiterer Folge als Scherung bezeichnet. Um die elastischen Schwingungen der translatorischen Relativbewegung zu dämpfen ist ein zusätzliches Dämpfungselement im Oberschenkel des Beinimpaktors verbaut.

Die metallischen Strukturen des Beinprüfkörpers sind mit einer 25 mm dicken Schaumstoffschicht der Marke CONFOR FOAM™ umhüllt, welche das menschliche Fleisch repräsentieren soll, als abschließende Hülle dient schließlich eine 6 mm dicke Neoprenschicht. Der gesamte Impaktor, wie er in Abbildung 2.14 dargestellt ist, hat ein Gewicht von 13,4 kg, eine Höhe von 926 mm, einen Durchmesser von 132 mm und wird bei den

¹ Wrap Around Distance, Abwickellänge: die Position, die das Ende eines definierten flexiblen Maßbandes, das in einer senkrechten Längsebene des Fahrzeuges gehalten und über die Vorderseite von vorderem Stoßfänger und Frontschutzsystem geführt wird, auf der Fronthaubenoberseite erreicht. Dabei berührt ein Ende des straff gespannten Maßbandes den Boden senkrecht unter der Vorderkante des Stoßfängers, das andere Ende berührt die Fronthaubenoberseite.

gesetzlich definierten Prüfvorschriften mit $11,1 \pm 0,2$ m/s (=40 km/h) freifliegend gegen die Fahrzeugfront geschleudert.

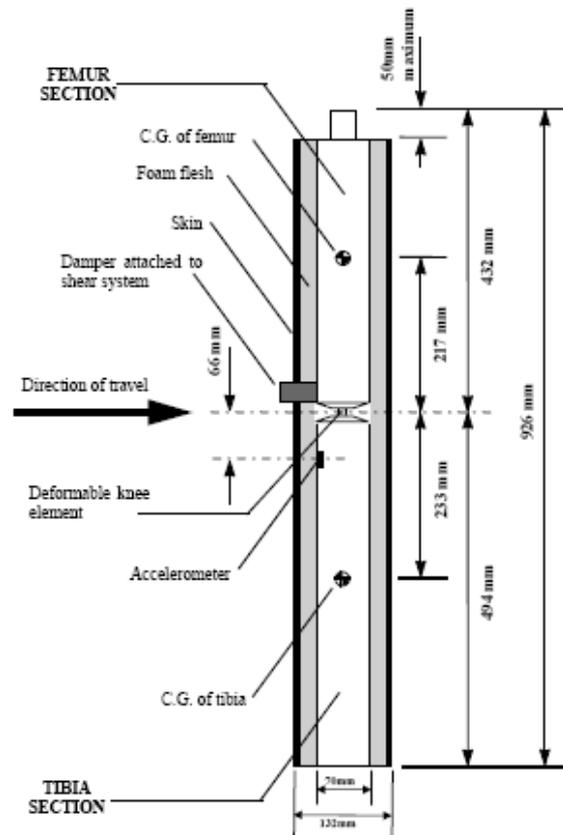


Abbildung 2.14: Darstellung des Beinimpaktors [ECE09]

Während des Anpralls werden der Biegewinkel und Scherung im Knieelement sowie die Beschleunigung im unteren Segment - auch Tibiabelschleunigung genannt - gemessen. Die Maxima der einzelnen gefilterten Signale werden dabei den gesetzlich definierten Kriterien gegenübergestellt.

Hüftimpaktor

Der Hüftimpaktor, auch als Oberschenkelimpaktor bezeichnet, besteht aus einem 350 mm langem Rohr, das von einer 2x25 mm dicken Schaumstoffschicht der Marke CONFOR FOAM™ umgeben ist. Zur Fixierung dieser Schaumstoffschicht wird eine zusätzliche Neoprenschiicht um den Impaktor gespannt. Die Enden des Stahlrohres sind gelenkig über Kraftaufnehmer mit dem Rückteilteil des Impaktors verbunden. Auf diesen Rückteil werden auch notwendige Gewichte für die Testprozeduren montiert.

Im Gegensatz zu den anderen Impaktoren wird der in Abbildung 2.15 skizzierte Hüftimpaktor nicht frei fliegend gegen die Fahrzeugfront geschossen, hier wird ein System zur Führung des Impaktors während des Anpralls eingesetzt. Dieses System wird über eine Sicherheitskupplung (Drehmomentbegrenzer) auf dem Rückteilteil des Impaktors befestigt.

Während des Anpralls werden die Kräfte zwischen den Rohrenden und dem Rückteil, sowie das Biegemoment im Rohr an drei Stellen gemessen. Dazu werden Kraftmessdosen und Dehnmessstreifen eingesetzt. Die Maxima der gefilterten Signale dienen als Kriterium und müssen den gesetzlich definierten Grenzwerten gegenübergestellt werden.

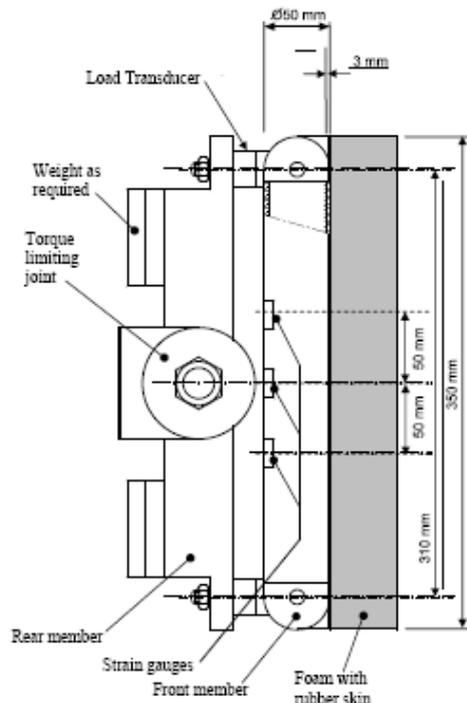


Abbildung 2.15: Darstellung des Hüftimpaktors [ECE09]

Die Geschwindigkeit, der Auftreffwinkel und die Masse des Impaktors sind von der Geometrie des zu prüfenden PKW's abhängig. Die Werte der dadurch eingebrachten kinetische Energie liegen in Bereichen zwischen: 200 und 700 Joule, zwischen 5,6 und 11,1 m/s (20 – 40 km/h) für die Geschwindigkeit und 10 bis 47° für den Aufprallwinkel. Die Randbedingungen für die Testprozedur sind den Tabellen und Diagrammen aus den gesetzlichen Vorschriften zu entnehmen.

2.2.2.3 Machbarkeits- und Effektivitätsstudien zur Phase 2 nach 2003/102/EC

Um die Umsetzbarkeit der technischen Anforderungen zur Erfüllung der neuen gesetzlichen Vorschriften zu überprüfen und zu verifizieren, wurde vom Europäischen Parlament eine Machbarkeitsstudie in Auftrag gegeben. In den entsprechenden Ausarbeitungen von TRL¹ werden mögliche Verbesserungen des in Phase 2 der Richtlinie definierten Testverfahrens beleuchtet und Modifikationen hinsichtlich Prüfmethode und gesetzlicher Grenzwerte vorgeschlagen, ein überarbeiteter Abschlussbericht wurde 2006 vorgelegt [TRL06].

In der Machbarkeitsstudie wird die technische Realisierbarkeit von konstruktiven Lösungen analysiert. Auf Basis von exemplarischen Serienfahrzeugen, welche nach heutigem Stand als besonders fußgängerfreundlich eingestuft werden, werden technische Maßnahmen und

¹ Transport Research Laboratory, United Kingdom

Kosten zur erforderlichen konstruktiven Umgestaltung der Fahrzeuge untersucht. Insbesondere erfolgt in der Studie auch eine Bewertung des Schutzpotenzials von aktiven Sicherheitsmaßnahmen wie z. B. dem Bremsassistenten.

Parallel zur technischen Machbarkeitsstudie wurden auch Studien hinsichtlich der Effektivität der gesetzlichen Regulierungen durchgeführt. Ziel dieser Studien ist es, das Potential zur Unfallvermeidung und zur Unfallfolgenminderung aufzuzeigen. Durch unterschiedliche wissenschaftliche Ansätze, beispielsweise speed-shift-method¹ oder injury-shift-method², wird die erwartete Reduzierung für die jeweiligen Annahmen errechnet. In [HAN04] wird gezeigt, dass eine Kombination aus passiven Maßnahmen zur Erfüllung der Phase 1 und aus einer aktiven Sicherheitsfunktion mehr zur Reduktion der Verletzung beiträgt als eine rein passive Sicherheitsauslegung nach Phase 2. Dieser Benefit kommt vor allem daher, dass durch ein aktives System - in diesem Fall der Bremsassistent - Unfälle vermieden werden können, durch eine rein passive Sicherheitstechnik ist dies hingegen nicht möglich.

Ähnliche Rückschlüsse werden auch in [BER03] dargestellt. Darin ist zu erkennen, dass durch rein passive Schutzmaßnahmen keine so hohe Reduktion der Verletzungen und der getöteten Fußgänger erzielt werden kann. In Abbildung 2.16 ist beispielsweise das Potential eines aktiven Sicherheitssystems dargestellt, indem die Kollisionsgeschwindigkeiten eines normalen sowie eines erfahrenen Fahrers mit der Kollisionsgeschwindigkeit unter Einsatz eines Bremsassistenten verglichen wird.

In [BER03] werden umfangreiche Fußgängerstatistiken und Datenbanken analysiert und ausgewertet. Das Potential zur Reduktion der Verletzungen wird auf Basis der durch die gesetzlichen Vorschriften definierten Anprallkonstellationen berechnet. In Abbildung 2.17 ist die Auswertungen der Daten der IHRA-PS WG (MAIS 2+) aufbereitet. Es ist deutlich zu sehen, dass nur ca. 40% der betrachteten Fußgängerunfälle mit Personenkraftwagen und einer Kollisionsgeschwindigkeit von maximal 60 km/h hervorgerufen werden (injured by car, $v_0 < 60 \text{ km/h}$, passenger car). Bei der detaillierten Betrachtung wird zudem ersichtlich, dass lediglich 27% der Fußgängerunfälle durch die gesetzlich definierten Fahrzeugbereiche ausgelöst werden.

¹ speed-shift-method in dieser Studie: Jeder Fußgängerunfall wird rekonstruiert, und die repräsentativen Kennwerte (Kollisionsgeschwindigkeit, Anfangsgeschwindigkeit, mittlere Verzögerung, Bremsweg bis zur Kollision) werden berechnet. Anschließend wird eine neue Kollisionsgeschwindigkeit unter der Annahme einer durchschnittlichen mittleren Verzögerung von 8.8 m/s^2 errechnet. Dadurch kommt es zu einer Reduktion der Kollisionsgeschwindigkeit, welche in der Injury-Risk-Funktion entsprechend berücksichtigt wird.

² injury-shift-method in dieser Studie: Einzelne Fußgängerunfälle werden detailliert analysiert und die Verletzungskennwerte je Körperregion festgehalten. Im Anschluss werden alle Verletzungen, welche durch einen in der Prüfprozedur enthaltenen Fahrzeugbereich hervorgerufen wurden, um einen AIS-Level reduziert. Dies geschieht unter der Annahme, dass die fahrzeugseitig umgesetzten Verbesserungen hinsichtlich des Fußgängerschutzes eine Reduktion der Verletzungsschwere bewirken. Dadurch lassen sich für jeden analysierten Unfall ein neuer MAIS-Level, sowie eine neue Injury-Risk-Funktion für die gesamten untersuchten Daten berechnen.

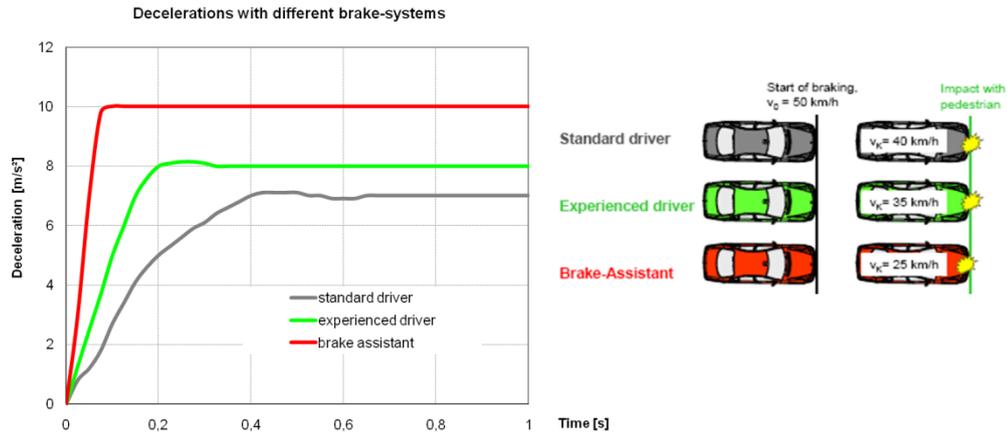


Abbildung 2.16: Reduktion der Impactgeschwindigkeit durch Bremsassistenten nach [BER03]

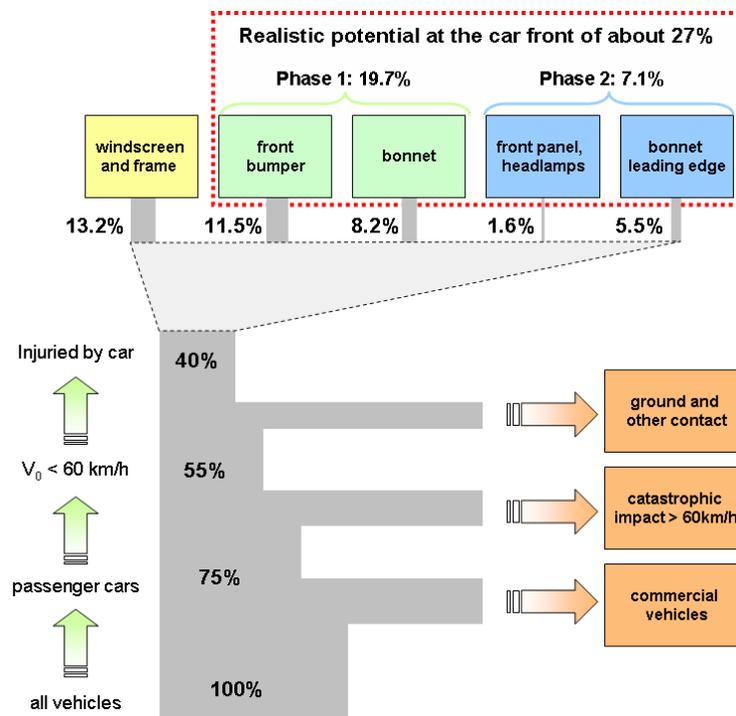


Abbildung 2.17: Potential zur Reduzierung der Verletzungen (Daten: IHRA, MAIS 2+) nach [BER03]

Ein wesentliches Ergebnis der Arbeiten ist, dass eine Erfüllung der Anforderungen der derzeitigen Phase 2 zwar für einzelne Fahrzeugtypen, jedoch nicht flächendeckend für alle betroffenen Fahrzeuge realisierbar erscheint. Eine Modifikation der Randbedingungen des Prüfverfahrens wird vorgeschlagen, zentrales Merkmal dieses Vorschlages ist eine Reduzierung der Grenzwerte aus Gründen der technischen Realisierbarkeit. Auf Basis dieser Resultate wurde ein Vorschlag für eine geänderte Testprozedur und auch geänderte Grenzwerte erarbeitet und eingereicht [LOR07, COM07].

2.2.2.4 Aktuell gültige Verordnung 78/2009

Am 14. Jänner 2009 wurde die Verordnung Nr. 78/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates veröffentlicht [EUR09]. Verglichen mit der Richtlinie 2003/102/EC betreffen die Änderungen mehrere Bereiche. Die gesetzlich definierten Grenzwerte bei den einzelnen Kriterien (Scherung, Biegung, Beschleunigung, Kräfte, Momente, HPC) sind deutlich reduziert, aber auch Änderungen bei der technischen Ausführung der Impaktoren (geänderte Massen) sowie Prüfvorschriften (reduzierte Impaktgeschwindigkeit, Hüftimpaktor gegen Haubenvorderkante nur noch Monitoring¹) wurden umgesetzt.

Die größte Änderung dieses Vorschlages ist jedoch, dass erstmals eine Kombination aus aktiver und passiver Sicherheit zur Erfüllung einer technischen Vorschrift zugelassen ist. Neben den Energie absorbierenden Maßnahmen, welche weiterhin mit den Komponententests überprüft werden, können aktive Sicherheitssysteme wie Bremsassistent oder andere kollisionsvermeidende oder unfallfolgenreduzierende Systeme ebenfalls zur Erfüllung des gesetzlich definierten Fußgängerschutzes beitragen. Eine Darstellung der Grenzwerte für die Verordnung ist der Übersicht in Tabelle 2.5 zu entnehmen.

2.2.2.5 Diskussion der Komponententests

Die Richtlinie für den Fußgängerschutz auf Basis von Komponententests ist seit einiger Zeit in Kraft, trotzdem wird sie immer wieder heftig diskutiert und kritisiert. Grund für diese oftmals kritischen Stimmen sind grundlegende Probleme oder Unzulänglichkeiten mit der Methode an sich, aber auch Schwierigkeiten bei der Versuchsdurchführung und der Entwicklung hinsichtlich des Fußgängerschutzes.

Hauptkritikpunkt, der seit der Definition der Komponententests existiert, ist sicherlich die Unzulänglichkeit bei der Nachstellung der realen Unfallkonstellation. Da Interaktionen zwischen benachbarten Körperteilen bei den Komponententests nicht berücksichtigt werden, kann die Kinematik und in weiterer Folge die detaillierte Anprallkonstellation am Fahrzeug nicht realitätsgetreu dargestellt werden. Damit in Zusammenhang gebracht werden kann die Gefahr, dass es durch die gezielte Auslegung hinsichtlich der funktionalen Anforderungen der Komponententests zu einer geringeren Schutzwirkung bei realen Fußgängerunfällen kommt.

Ein weiterer Kritikpunkt sind die den Gesetzen zugrunde liegenden Unfallstudien und Unfallrekonstruktionen. Zu einem großen Teil sind in den Analysen Fußgängerunfälle mit alten Fahrzeugmodellen enthalten, darüber hinaus wird kritisiert, dass eine zu geringe Breite der Fußgängerpopulation verwendet wurde. So treten beispielsweise bei modernen Fahrzeugdesigns meist nur noch leichte Hüftverletzungen auf, Grundlage für die Definition des relativ harten Hüftanpralltests waren aber Fahrzeuge mit veraltetem Design und ausgeprägter Haubenvorderkante [HAH06]. Dass die derzeit definierten gesetzlichen

¹ Hüftimpakt gegen Haubenvorderkante nur noch Monitoring: die Tests werden während der gesetzlich definierten Abnahme durchgeführt und gemessen. Ein Erfüllen der definierten Grenzwerte ist für die EU-Typgenehmigung jedoch nicht erforderlich, die Daten werden lediglich für Analysen und zukünftige Forschungsaktivitäten aufgezeichnet.

Vorschriften nur zu einem Teil der realen Unfälle Bezug haben, kann man auch in Abbildung 2.17 sehr gut erkennen.

Obwohl die Komponententests weitestgehend als robuste und reproduzierbare Testmethode verglichen mit Full-Scale-Teste eingestuft werden, kommt bezüglich der Streuungen und der Robustheit der Testergebnisse immer wieder Kritik auf. Bei den Kopfimpaktoren kann es beispielsweise zu Schwankungen, welche durch die Alterung der Kopfhaut bedingt sind, kommen. Daraus resultieren Unterschiede beim Beschleunigungssignal und dem errechneten HIC Wert. Bei Hüft- und Beinimpaktor spielt der vorgeschriebene umhüllende Schaum der Marke Confor Foam™ eine erhebliche Rolle. Dieser weist eine ausgeprägte Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit auf, die in [MAT04] näher untersucht wurde. Durch eine erhöhte Luftfeuchtigkeit bei der Lagerung können das Beschleunigungssignal und der gesetzlich relevante Maximalwert beeinflusst werden. Zusätzliche Beeinflussungen durch die Alterung des Schaums werden vermutet, wurden aber bisher nicht genauer untersucht. Beim Beinimpaktor können darüber hinaus Messfehler und Schwankungen durch eine deformierte Schergabel¹, durch fehlerhafte Dämpferelemente oder verformte Bauteile der Messmechanik beobachtet werden [LES07].

Streuungen bei der Versuchsdurchführung können die Resultate beim Beinanprall ebenfalls sehr stark beeinflussen, da es dadurch zu geänderten Kräfteinwirkungen auf den Beinimpaktor kommt. Ähnliche Phänomene durch Versuchsschwankungen kann man auch bei den anderen Impaktoren beobachten [GRE98].

2.2.2.6 Zukünftige Aktivitäten und Weiterentwicklung der Gesetze

Die am 14. Jänner 2009 veröffentlichte Verordnung [EUR09] orientiert sich sehr stark an der europäischen Richtlinie und löst im Wesentlichen die Phase 2 der derzeitigen Regulierung 2003/102/EG ab. Um die Prüfmethode weiterhin zu verbessern hat ein Expertengremium der UNECE den Auftrag, bereits existierende Arbeiten zum Thema Fußgängerschutz zu untersuchen und - wenn möglich - zu einer global gültigen Vorschrift zu kombinieren.

Derzeitige und auch zukünftige Forschungsaktivitäten beschäftigen sich vor allem mit einer neuen Testprozedur für den Beinanprall. Dabei wird vorwiegend der FlexPLI² betrachtet, der in Zukunft anstelle des zurzeit in Verwendung befindlichen TRL Beinprüfkörpers zum Einsatz kommen könnte. Das FlexPLI wird von JARI³ seit 2002 entwickelt. Seit 2005 beschäftigt sich auch die UNECE in der GRSP FlexPLI TEG⁴ mit diesem flexiblen Beinimpaktor. In Abbildung 2.18 ist der Aufbau des flexiblen Beinimpaktors zu sehen. Der FlexPLI besteht aus einem komplexen Aufbau mit unterschiedlichen Kunststoffsegmenten und einer vorgespannten Seilkinematik. Darüber sind mehrere Lagen aus Gummi und Neopren gespannt, welche das

¹ Die Schergabel ist eine Baugruppe des Beinimpaktors, welche die elastischen Deformationen in Belastungsrichtung (elastischer Deformationsweg an bestimmter Position entspricht der gesetzlich definierten Scherung) aufnimmt. Durch Dauerbelastungen oder eine Überlast können jedoch plastische Verformungen auftreten, die in weiterer Folge die Resultate der nachfolgenden Messungen beeinflussen können.

² Flexible Pedestrian Legform Impactor

³ Japan Automotive Research Institute

⁴ Technical Evaluation Group

Fleisch und die Haut eines menschlichen Beins nachstellen sollen. Im FlexPLI ist der anatomische Aufbau eines menschlichen Knies deutlich besser als im TRL LFI nachgebildet. Durch den elastischen Aufbau und die detaillierte Nachbildung des Kniebereichs kann eine deutlich bessere Biofidelity erreicht werden. Durch eine umfangreiche Messtechnik und Auswertung der Belastungen können ausführliche Analysen hinsichtlich der Belastungen und der zu erwartenden Verletzungen durchgeführt werden.

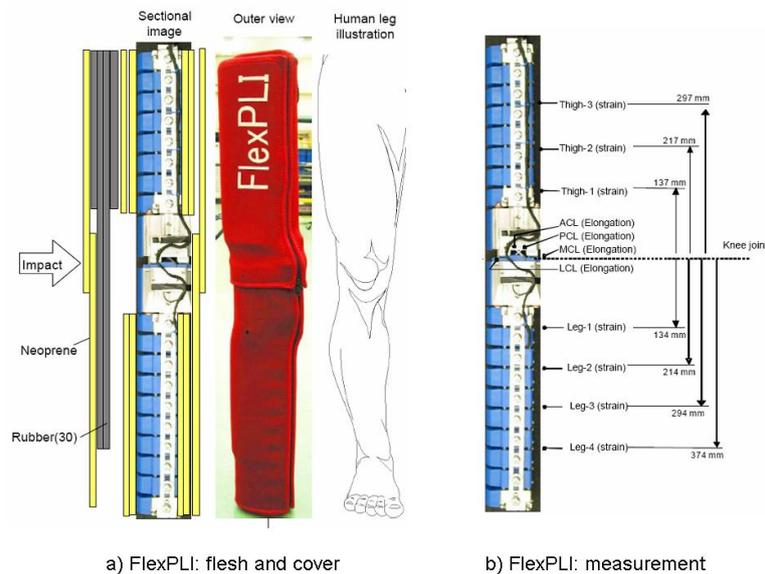


Abbildung 2.18: FlexPLI [ZAN07]

Die derzeit aktuelle Version des flexiblen Beinprüfkörpers ist die so genannte Flex-GT α , weitere Untersuchungen und Entwicklungsschritte dieses Beinimpaktors sind noch geplant. Gegenwärtig werden zahlreiche Test und Untersuchungen zum Vergleich der beiden Beinimpaktoren - dem Flex-GT α und dem TRL LFI - durchgeführt. Erste Resultate in [ZAN07] zeigen, dass moderne Fahrzeugfronten, welche bereits für den TRL LFI ausgelegt wurden und die gesetzlich definieren Anforderungen der Phase 1 erfüllen, auch bei Tests mit dem Flex-GT α entsprechend gute Resultate liefern.

Parallel zu diesen Untersuchungen hinsichtlich der GTR hat die EEVC WG17 den Auftrag, neue Prüfmethode für den Fußgängerschutz zu untersuchen. Dabei werden beispielsweise bisher wenig betrachtete Bereiche wie Windschutzscheibe und A-Säule analysiert. Schwerpunkte werden aber auch auf das Thema virtuelles Testen gesetzt. Hier wären unter anderem auch Kombinationen aus realen Komponentenversuchen und virtuellen Full-Body Untersuchungen zur Überprüfung des gesamtheitlichen Fußgängerschutzes denkbar, wie es in [LAW05] erläutert wird.

Außerdem gewinnt das Thema aktive Sicherheit im Zusammenhang mit Fußgängerschutz immer mehr an Bedeutung. Schwerpunkte in diesem Bereich sind neue Testmethoden zur Entwicklung von crash-aktiven Sicherheitssystemen, wozu eigene Impaktoren einzusetzen sind. Notwendig sind hier standardisierte Test- und Entwicklungsmethoden um die Sensorsysteme und die Algorithmen in die Fahrzeuge zu integrieren und die Funktionserfüllung sicher zu stellen.

2.2.2.7 Überblick über Grenzwerte der unterschiedlichen Prüfmethode

In Tabelle 2.5 sind die Grenzwerte sowie die relevanten Versuchsbedingungen der unterschiedlichen Richtlinien und Verordnungen dargestellt.

Tabelle 2.5: Übersicht der unterschiedlichen Prüfmethode

Testmethode	Parameter	Richtlinie 2003/102/EC		EEVC WG 17	TRL Feasibility Study Phase 2	Euro NCAP		Japan	Verordnung (EC) 78/2009	
		Phase 1	Phase 2			untere Grenze	obere Grenze		Phase 1	Phase 2
Beinprüfkörper gegen Stoßfänger	Geschwindigkeit	40 km/h	40 km/h	40 km/h	40 km/h	40 km/h	40 km/h	40 km/h	40 km/h	40 km/h
	Anprallwinkel	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
	Beschleunigung	200 g	150 g	150 g	190 g (250 g)	150 g	200 g	200 g	170 g *	170 g *
	Biegung	21°	15°	15°	19°	15°	20°	21°	19°	19°
Hüftprüfkörper gegen Stoßfänger	Scherung	6 mm	6 mm	6 mm	6 mm	6 mm	7 mm	6 mm	6 mm	6 mm
	Geschwindigkeit	40 km/h	40 km/h	40 km/h	40 km/h	40 km/h	40 km/h	40 km/h	40 km/h	40 km/h
	Anprallwinkel	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
	Summenkraft	7,5 kN	5,0 kN	5,0 kN	7,5 kN	5,0 kN	6,0 kN	7,5 kN	7,5 kN	7,5 kN
Hüftprüfkörper gegen Fronthaubendeckelante	Biegung	510 Nm	300 Nm	300 Nm	510 Nm	300 Nm	360 Nm	510 Nm	510 Nm	510 Nm
	Geschwindigkeit	20 - 40 km/h	20 - 40 km/h	20 - 40 km/h	20 - 40 km/h	20 - 40 km/h	20 - 40 km/h	20 - 40 km/h	20 - 40 km/h	20 - 40 km/h
	Anprallwinkel	10° - 47°	10° - 47°	10° - 47°	10° - 47°	10° - 47°	10° - 47°	10° - 47°	10° - 47°	10° - 47°
	Summenkraft	5,0 kN	5,0 kN	5,0 kN	6,25 kN (7,5 kN)	5,0 kN	6,0 kN	5,0 kN	5,0 kN	5,0 kN
Kinderkopf- / kleiner Erwachsenenkopf-Prüfkörper gegen Motorhaube	Biegung	300 Nm	300 Nm	300 Nm	375 Nm (510 Nm)	300 Nm	360 Nm	300 Nm	300 Nm	300 Nm
	Geschwindigkeit	35 km/h	35 km/h	35 km/h	35 km/h	35 km/h	35 km/h	35 km/h	35 km/h	35 km/h
	Anprallwinkel	50°	50°	50°	50°	50°	50°	50°	50°	50°
	Durchmesser	165 mm	165 mm	165 mm	165 mm	165 mm	165 mm	165 mm	165 mm	165 mm
Erwachsenenkopfprüfkörper, Kinderprüfkörper gegen Windschutzscheibe	Masse	3,5 kg	3,5 kg	3,5 kg	3,5 kg	3,5 kg	3,5 kg	3,5 kg	3,5 kg	3,5 kg
	HPC	1000 (2/3)	1000 (2/3)	1000 (2/3)	1000 (2/3)	1000 (2/3)	1000 (2/3)	1000 (2/3)	1000 (2/3)	1000 (2/3)
	Geschwindigkeit	35 km/h	35 km/h	35 km/h	35 km/h	35 km/h	35 km/h	35 km/h	35 km/h	35 km/h
	Anprallwinkel	36°	36°	36°	36°	36°	36°	36°	36°	36°
Erwachsenenprüfkörper gegen Motorhaube	Durchmesser	165 mm	165 mm	165 mm	165 mm	165 mm	165 mm	165 mm	165 mm	165 mm
	Masse	4,8 kg	4,8 kg	4,8 kg	4,8 kg	4,8 kg	4,8 kg	4,8 kg	4,8 kg	4,8 kg
	HPC	1000	1000	1000	1000 (3/4)	1000	1350	1000 (2/3)	1000 **	1000 **
	Geschwindigkeit	40 km/h	40 km/h	40 km/h	40 km/h	40 km/h	40 km/h	32 km/h	35 km/h	35 km/h
Kinderprüfkörper gegen Motorhaube	Anprallwinkel	65°	65°	65°	65°	65°	65°	65° / 90° / 50°	65°	65°
	Durchmesser	130 mm	130 mm	130 mm	130 mm	130 mm	130 mm	165 mm	165 mm	165 mm
	Masse	2,5 kg	2,5 kg	2,5 kg	2,5 kg	2,5 kg	2,5 kg	3,5 kg	3,5 kg	3,5 kg
	HPC	1000	1000	1000	1250 (3/4)	1000	1350	1000 (2/3)	1000 **	1000 **

** Die Verordnung hebt die Richtlinie 2003/102/EC auf und reißt zusätzlich die Anforderungen an Frontschutzsysteme und hebt die Richtlinie 2005/66/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Oktober 2005 über die Verwendung von Frontschutzsystemen an Fahrzeugen auf. Die Verordnung kombiniert erstmals aktive und passive Sicherheitsmaßnahmen.

* Zusätzlich kann der Hersteller Stoßfängerbereiche mit einer Gesamtbreite bis 264 mm benennen, in denen die am oberen Ende des Schienbeins gemessene Beschleunigung 250 g nicht überschreiten. Der HPC-Wert darf bei beiden Kopfformen auf der verbleibenden Fläche 1 000 und zusätzlich auf zwei Drittel der Kinder- und Erwachsenenkopf-Prüffläche zusammen 1 000 nicht überschreiten. Der HPC-Wert darf bei beiden Kopfformen auf der verbleibenden Fläche 1 700 nicht überschreiten.

*** Diese Prüfung ist lediglich zu Überwachungszwecken durchzuführen und ihre Ergebnisse sind vollständig abzulehnen.

2.3 Der Fußgängerschutz als technische Herausforderung

Heutzutage strebt jeder Fahrzeughersteller eine 5-Sterne-Bewertung bei den EURO-NCAP Tests an. Neben dem Insassenschutz für Erwachsene spielen hier vor allem die Kindersicherheit und der Fußgängerschutz eine entscheidende Rolle. Um eine herausragende Bewertung zu erlangen, müssen die einzelnen passiven sowie aktiven und unterstützenden Sicherheitssysteme einen wesentlichen Beitrag für die Gesamtsicherheit leisten. Das Erreichen dieser Vorgaben ebenso wie das Erfüllen der gesetzlichen Auflagen zum Fußgängerschutz ist somit bereits während der Konzeptphase in die Lastenhefte aufzunehmen. Dementsprechend müssen technische Lösungen erarbeitet werden, um diesen Anforderungen gerecht zu werden. Die größten Schwierigkeiten entstehen dadurch, dass die technischen Lösungen für den Fußgängerschutz in das Gesamtfahrzeugkonzept - vor allem im Bereich der Fahrzeugfront - integriert werden müssen.

Es gibt eine Vielzahl an fahrzeugseitigen Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit ungeschützter Verkehrsteilnehmer, ein Überblick nach [KUE07] ist in Abbildung 2.19 dargestellt. Darin ist deutlich zu erkennen, dass es auf erster Ebene zwischen unfallvermeidenden und unfallfolgenmindernden Maßnahmen zu unterscheiden gilt. Die unfallfolgenmindernden Maßnahmen gliedern sich in Aktive und Passive Sicherheit, zweitere können wiederum in crash-aktive und passive Strukturmaßnahmen unterteilt werden. In dieser Arbeit wird vorwiegend auf die passiven Sicherheitsmaßnahmen eingegangen.

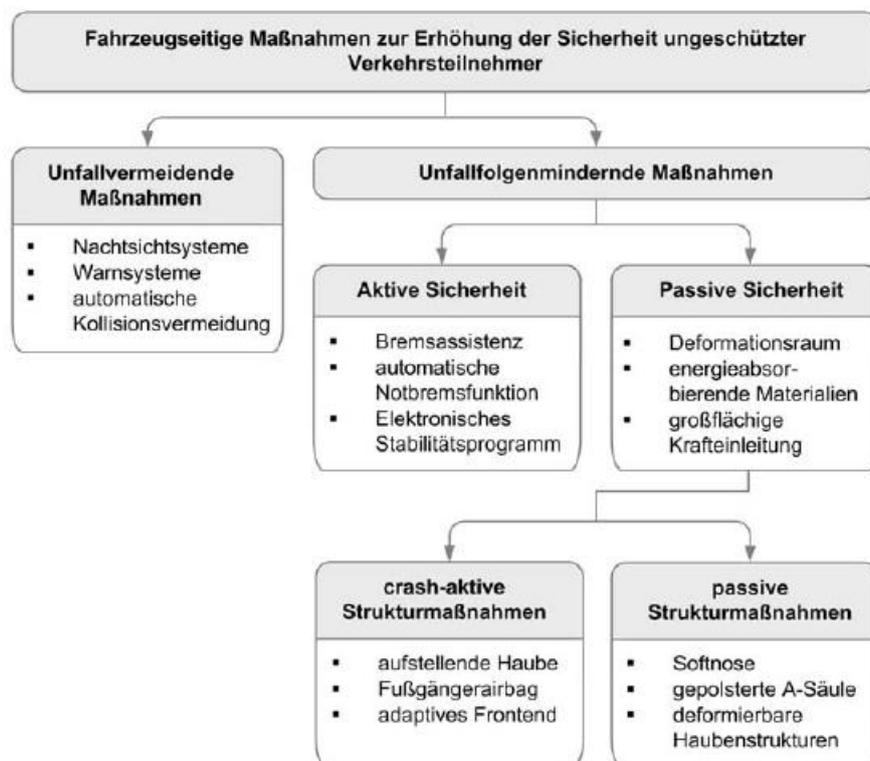


Abbildung 2.19: Überblick über fahrzeugseitige Maßnahmen zum Fußgängerschutz [KUE07]

2.3.1 Allgemeine Betrachtung

Das Ziel aller Maßnahmen zur Verbesserung des Fußgängerschutzes ist es, die Anprallenergie sanfter und über einen längeren Zeitraum hinweg zu absorbieren. Harte Schläge und Impulse, welche zu schwerwiegenden Verletzungen führen können, müssen so weit wie möglich vermieden werden. Auch beim Betrachten der Komponententests ist ein durchdachtes Energiemanagement an der Fahrzeugfront zwingend notwendig.

Um die kinetische Energie des Impaktors oder des Fußgängers abzubauen, muss eine plastische Verformung bzw. ein Material- und Bauteilversagen stattfinden, hierfür stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung. Prinzipiell müssen aber immer ausreichend große Freiräume und definierte Lastpfade zur Aufnahme und Weiterleitung der Kräfte vorhanden sein. Um den Deformationsweg möglichst effektiv zu nutzen, muss der Kraft-Weg-Verlauf optimiert werden, um so viel kinetische Energie wie möglich abzubauen und den Rebound¹ zu minimieren. Dazu verwendet werden zumeist Schäume zur Energieabsorption, Verrippungen, Sollbruchstellen in der Struktur, Dämpferelemente und eine generell weich gestaltete Struktur. Ist der Freiraum für die Deformation nicht ausreichend, so kann er mit Aktiven oder crash-aktiven Systemen wie z. B. Airbags an der Fahrzeugfront oder ausfahrenden Stoßfängern vergrößert werden.

Eine weitere Möglichkeit, die gesetzlich zu überprüfenden Belastungen auf die Impaktoren zu reduzieren, ist das gezielte Einleiten einer Rotation in den Impaktor. Dadurch wird die translatorische in eine rotatorische Bewegung umgewandelt – die Belastung auf den Impaktor kann mit dieser Strategie trotz einer relativ harten Struktur unterhalb der gesetzlich definierten Limits sein. Eine gezielte Auslegung der Lastpfade ist für diese Entwicklungsstrategie dennoch notwendig.

2.3.1.1 Betroffener Fahrzeugbereich

Bei der gesetzlichen Betrachtung des Fußgängerschutzes muss man auf eine Vielzahl von Bauteilen der Fahrzeugfront achten. Bei notwendigen Anpassungen an der Fahrzeugfront, beispielsweise bei der Schaffung eines Deformationsweges für den Kopfanprall, kann es zu enormen Auswirkungen auf das gesamte Fahrzeugkonzept kommen. Schwierigkeiten treten vor allem dann auf, wenn das Design des Fahrzeuges oder das Packagekonzept geändert werden muss. Um dies zu vermeiden ist eine möglichst frühe Involvierung der Fußgängerschutzanforderungen in die Konzeptentwicklung anzustreben.

Beim Kopfanprall sind primär die Bauteile und -gruppen rund um die Motorhaube betroffen. Die Motorhaube inklusive der Versteifungen sowie die strukturmechanischen Eigenschaften der gesamten Haube stehen dabei im Mittelpunkt des betrachteten Bereiches. Von entscheidender Bedeutung sind auch die Bauteile - meist Aggregate - welche unmittelbar unterhalb der Motorhaube verbaut sind. Hier ist vor allem auf den notwendigen Deformationsweg bzw. Freiraum zwischen Motorhaube und Aggregaten zu achten. Bei den

¹ Durch die elastische Rückverformung der Blechstrukturen, beispielsweise der Motorhaube, kommt es nach der Deformationsphase, wo der Impaktor in die Struktur eindringt, erneut zu einer Belastungsphase für den Impaktor. Durch gezielte Strukturmaßnahmen oder Materialwahl kann diese Phase, und somit auch die Belastung auf den Impaktor, entscheidend beeinflusst werden.

Verbraucherschutztests wird ebenso der Windschutzscheibenbereich untersucht. Probleme gibt es speziell am Randbereich der Scheibe, bei den A-Säulen und beim Dachpfosten, da hier die Bauteile aufgrund unterschiedlicher Vorgaben extrem steif ausgelegt sind und infolge designtechnischer bzw. geometrischer Anforderungen nur sehr wenig Deformationsweg berücksichtigt werden kann. Die Scheibenwischanlage fällt ebenfalls in den Bereich des Fußgängerschutzes, insbesondere die Teile des Wischerarms und des Antriebes. Weitere Konfliktbereiche beim Kopfanprall sind die Karosseriestrukturen im Bereich der Federdome und der Fugen zwischen Motorhaube und Kotflügel.

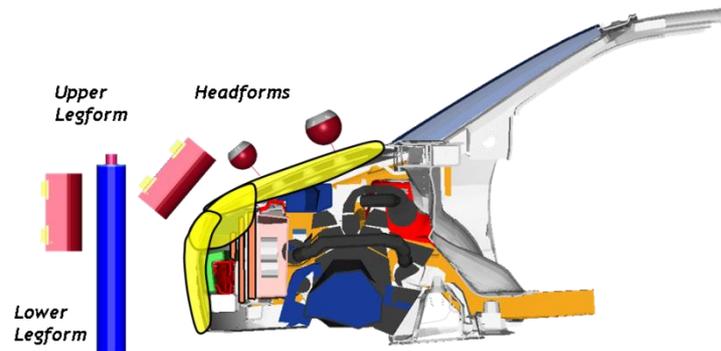


Abbildung 2.20: Prinzipdarstellung der Deformationszonen für den Fußgängerschutz

Beim Hüft- und Beinaufprall sind die betroffenen Bereiche vorwiegend der Stoßfänger und die darunter liegende Vorbaustruktur, wobei hier für den Fußgängerschutz vor allem die Lastpfade von Bedeutung sind. Darüber hinaus sind speziell für den Hüftanprall die Bereiche um den Kühlergrill und die Motorhaubenvorderkante entscheidend.

Für den Übergangsbereich zwischen Kopf- und Hüftanprall sind die Scheinwerfer inklusive der Anbindung, der Kühlerbereich sowie der Bereich um die Haubenvorderkante wesentlich.

2.3.1.2 Multidisziplinäre Anforderungen und Zielkonflikte

Die Fahrzeugsicherheit kann bei der Fahrzeugentwicklung nicht mehr isoliert betrachtet werden, sondern ist vielmehr ein integrierter Bestandteil der gesamten übergreifenden Produktentwicklung. Das Ziel der Entwicklungsteams ist es, die unterschiedlichen Anforderungen der einzelnen Disziplinen zu berücksichtigen und eine gemeinsame Lösung für die Probleme zu finden. Die aerodynamischen und aeroakustischen Anforderungen bei hohen Fahrgeschwindigkeiten stehen hier im Konflikt mit der fußgängerschutzrelevanten Auslegung. Ebenso werden thermodynamische Aspekte und Lösungen, um die Kühlung des Antriebes und die Komfortfunktionen sicher zu stellen, durch energieabsorbierende Komponenten oder Deformationsräume beeinflusst. Komponenteneigenschaften, die durch das Design, das Package sowie durch Bauteilsteifigkeiten, das Schwingverhalten und die Akustik vorgegeben werden, stehen häufig im Gegensatz zu den Anforderungen des Fußgängerschutzes. Aber auch weitere fahrzeugsicherheitsrelevante Randbedingungen, wie sie beispielsweise für high-speed und low-speed Lastfälle notwendig sind, beeinflussen die fußgängerschutzrelevante Lösung. Speziell designtechnische Anforderungen, welche einen nicht unerheblichen Beitrag zur Markenidentität leisten, können meist nur sehr schwer abgeändert werden – hier sind die Ingenieure mit innovativen Lösungen gefragt. In

Abbildung 2.21 sind exemplarisch einige dieser Disziplinen dargestellt, welche je nach betrachtetem Bauteil oder betrachtetem Lastfall zu unterschiedlichen Zielkonflikten führen können.

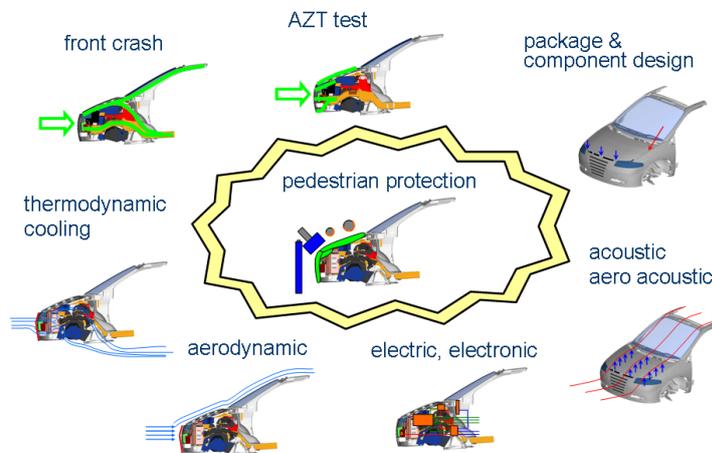


Abbildung 2.21: Multidisziplinäre Analyse des Vorderwagens [SCH06d]

Um diese komplexe Themen- und Ziellandschaft systematisch zu bearbeiten, werden zunehmend multidisziplinäre Optimierungsmethoden eingesetzt. Durch die disziplinübergreifende Optimierung kann eine ganzheitlich optimal gestaltete Lösung erarbeitet werden. Neue Algorithmen, innovative Datenmanipulations- und Simulationsmethoden ebenso wie zur Verfügung stehende enorme Rechenkapazitäten machen den Einsatz moderner Optimierungsmethoden möglich.

2.3.1.3 Technische Konflikte an der Fahrzeugfront

Im Bereich der Fahrzeugfront entsteht mit den neuen Anforderungen, welche der Fußgängerschutz mit sich bringt, eine Vielzahl an Konfliktbereichen. Für die Absicherung der Bauteile, der Systeme sowie des gesamten Funktionsumfangs des Fahrzeuges müssen während der Entwicklung interne Anforderungen, vor allem aber auch Anforderungen seitens der Gesetzgebung betrachtet werden. Nachfolgend werden jene Konflikte, denen während der Fußgängerschutzentwicklung eine große Bedeutung beigemessen wird, erläutert.

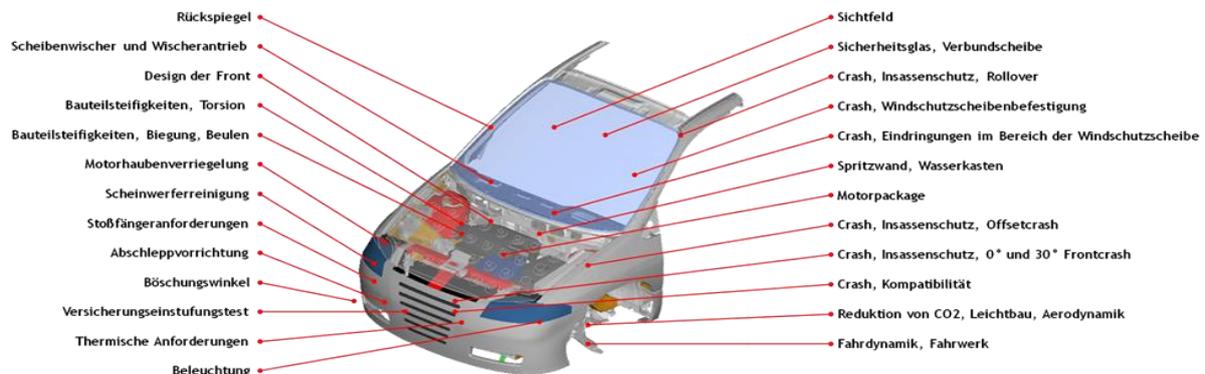


Abbildung 2.22: Zielkonflikte an der Fahrzeugfront

Beleuchtung

Um die aktive Sicherheit des Fahrzeuges sicherzustellen, sind moderne Beleuchtungskonzepte im Automobil zwingend notwendig. Dazu gehören neben den Hauptscheinwerfern die Nebelbeleuchtung, Positionsbeleuchtung, Blinker, Parklicht und das Tagfahrlicht. Um die funktionalen Anforderungen der Beleuchtungseinrichtungen zu erfüllen, müssen diese entsprechend positioniert und montiert sein. Außerdem müssen die Anforderungen hinsichtlich Festigkeit und Bruchsicherheit und vor allem die optimale Gestaltung des Beleuchtungsbildes berücksichtigt werden. Eine Positionierung der Beleuchtungseinrichtungen außerhalb der für den Fußgängerschutz relevanten Bereiche ist auf Grund der weiteren funktionalen Anforderungen nicht möglich. Schwierigkeiten treten dabei primär durch die relativ hohen Massen der Beleuchtungseinrichtungen auf, wodurch infolge erhöhte Belastungen beim Kopfanprall entstehen können. Durch eine flexible Montage der Scheinwerfer und durch gezieltes Versagen der Fixierung kann die Impaktorbelastung zwar deutlich reduziert werden, eine weitere Reduktion ist jedoch nur durch eine Gewichtsverringerung der Beleuchtungselemente möglich. Hier können neue Beleuchtungskonzepte mit LED-Technik oder mit Lichtleitertechnologien zu einer deutlichen Verbesserung führen.

Sichtfeld

Um genügend Deformationsweg für den Kopfanprall zur Verfügung stellen zu können, kann ein geändertes Design der Motorhaube von Vorteil sein. Speziell im Bereich der Kühlkomponenten, der Wischer und Wischerarme, in den Übergangsbereichen zu den Kotflügeln oder an Stellen mit harten Komponenten unterhalb der Motorhaube kann das Design der Motorhaube durch die Anforderungen des Fußgängerschutzes beeinflusst werden. Das kann mitunter darin resultieren, dass durch die Anforderungen hinsichtlich des Sichtfeldes der H-Punkt¹ und der gesamte Passagierraum geändert werden müssen. Als Folgen dieser Änderungen sind einerseits eine Verschlechterung der aerodynamischen Eigenschaften und somit des Verbrauchs zu verzeichnen, andererseits wird durch diese Maßnahmen das Design und das Markenbild des Fahrzeuges maßgeblich beeinflusst.

Die Veränderung des Sichtfeldes ist auch bei crash-aktiven Systemen von Bedeutung. Löst ein crash-aktives System im Fall eines Fußgängerunfalls aus und hebt sich infolge der Motorhaube, wird das Sichtfeld zumeist stark beeinträchtigt. Reversible Systeme oder Systeme, welche automatisch wieder in die Ausgangslage zurückversetzt werden, können hier Abhilfe schaffen.

Rückspiegel

Bei Rückspiegeln, welche an den Kotflügeln montiert sind, ist eine Erfüllung der gesetzlichen Vorschriften für den Kopfanprall sehr schwierig. Technische Lösungen zu dieser Problematik sind vor allem in Japan in Diskussion – hier möchte man durch Rückspiegel am Kotflügel die

¹ H-Punkt: Hüftpunkt, ist ein Referenzpunkt für die charakteristischen Maße des Innenraumes (Bein- und Kopffreiheit, Abstände H-Punkt Fahrer und H-Punkt Fondpassagiere). Basis für den H-Punkt ist die Sitzeinstellung für einen 95% Mann (nur 5% der Bevölkerung sind größer).

Sicherheit der Kinder erhöhen, indem man die Sicht rund um das Fahrzeug durch einen geänderten Blickwinkel verbessert.

Motorhaubenverriegelung

Die Motorhaubenverriegelung muss so ausgelegt sein, dass die Haube in üblichen Fahrsituationen, auch bei hohen Geschwindigkeiten und Windlasten, ein stabiles Verhalten aufweist. Darüber hinaus müssen bei der Auslegung der Verriegelungen auch Misuse-Lastfälle wie beispielsweise die Öffnung der Motorhaube bei hoher Geschwindigkeit berücksichtigt werden. Speziell beim Kopfanprall, aber auch bei einem Hüftanprall müssen die Verriegelungsstellen hinsichtlich der Erfüllung der gesetzlichen Anforderungen überprüft werden. Dies bedeutet, dass genügend Deformationsweg zur Verfügung gestellt und auch die Struktur dementsprechend weich gestaltet werden muss. Denkbar sind hier beispielsweise der Einsatz von energieabsorbierenden Materialien oder etwa die Berücksichtigung flexibler und nachgiebiger Konstruktionen im Bereich der Verriegelungen.

Sicherheitsglas, Verbundglas

Die Windschutzscheibe stellt flächenmäßig einen relativ großen Bereich der Fahrzeugfront dar, bei realen Fußgängerunfällen ist sie auch die häufigste Primärkontaktstelle für den Kopfanprall. In den derzeit gültigen gesetzlichen Vorschriften zählt die Windschutzscheibe jedoch nicht zu einem der Anprallbereiche für den Kopfimpaktor, lediglich bei den Testmethoden der Verbraucherschutzorganisationen wird dieser Bereich analysiert¹.

Beim Auslegen der Windschutzscheibe muss ein Widerstand gegen das Eindringen von Objekten in den Innenraum wie beispielsweise bei einem Steinschlag oder im Falle eines Crashes berücksichtigt werden. Außerdem muss das Zersplittern der Scheibe durch den Einsatz von Verbundbauweisen verhindert werden. Diese Anforderungen sind in gesetzlichen Regelungen definiert und müssen durch konstruktive Maßnahmen und geeigneten Materialeinsatz erfüllt werden. Dadurch, dass die Windschutzscheibe mittels Strukturkleber in die Karosserie integriert ist, trägt sie auch einen wesentlichen Anteil zur Gesamtsteifigkeit der Struktur bei. Aus diesem Grund weist die Windschutzscheibe speziell in den Randbereichen eine größere Steifigkeit auf. Zusätzlich treten in der Windschutzscheibe fertigungsbedingte Eigenspannungen auf, welche aufgrund der Fertigungsstreuung deutlich schwanken können [GEH07, LES07]. Diese Faktoren sorgen dafür, dass im Bereich der Windschutzscheibe teilweise relativ harte Anprallstellen vorhanden sind.

Scheibenwischer und Wischerantrieb

Die Wischer und der Antrieb müssen auch bei sehr starkem Regen und bei hohen Geschwindigkeiten voll funktionstüchtig sein. Dazu müssen sie entsprechend steif und zuverlässig ausgelegt sein, dies widerspricht den Forderungen des Fußgängerschutzes nach weichen Strukturen. Durch entsprechende Maßnahmen können beide gegensätzlichen

¹ In der derzeit gültigen Verordnung ist der Anprall des Kopfimpaktors im Bereich der Windschutzscheibe lediglich zu Monitoringzwecken durchzuführen und mit dem Richtwert von HIC 1000 zu vergleichen.

Anforderungen erfüllt werden, beispielsweise durch nachgiebige Anbindungen und gezielte Deformationsbereiche. Schwierigkeiten treten vor allem beim Antrieb und den Steckachsen für die Wischerarme auf, hier ist noch weiterer Forschungsbedarf gegeben.

Scheinwerferreinigung

Die Scheinwerferreinigungsanlagen sind insbesondere bei Beleuchtungseinrichtungen mit Halogenlampen zwingend notwendig. Die Platzierung dieser Einheit erfolgt vor den Beleuchtungseinheiten im Bereich des Stoßfängers - zumeist zwischen dem Stoßgängerüberzug und dem Stoßfängerquerträger. Dadurch kommt es in diesem Anprallbereich zu Konflikten bei einem Beinanprall.

Crash, Insassenschutz, 0° und 30° Frontcrash

Im Normalfall hat der Fußgängerschutz auf die Performance bei Frontcrashes keinen Einfluss. Dennoch muss bei der Auslegung von Sicherheitseinrichtungen darauf geachtet werden – speziell bei der Implementierung von aktiven Fußgängerschutzsystemen wie beispielsweise aktiven Motorhauben. Durch Fehlauslösungen kann dieses System auch bei einem Frontalunfall aktiviert werden, wodurch es zu einer Verschlechterung der Frontcrashperformance kommen kann. Im schlechtesten Fall kann die aufgestellte Motorhaube in den Fahrgastraum eindringen und somit ein zusätzliches Sicherheitsrisiko darstellen. Indirekt hat der Fußgängerschutz jedoch einen entscheidenden Einfluss auf den Frontcrash, nämlich über das Design der Fahrzeugfront. Die energieabsorbierende Fußgängerschutzlösung wie beispielsweise der Schaum beim Beinanprall muss komplett vor der für den Crash relevanten Struktur aufgebracht sein. Dies wird jedoch meist von den Designern abgelehnt, um so den vorderen Überhang möglich kurz zu gestalten. Somit geht der energieabsorbierende Schaum zum Schutz des Fußgängers häufig zulasten des Deformationsweges beim Frontcrash.

Crash, Insassenschutz, Offsetcrash

Durch fußgängerrelevante Maßnahmen im Bereich der A-Säule und des oberen Crashlastpfades kann es zu einer Verschlechterung der Crashperformance kommen. Speziell bei Offsetcrashes mit asymmetrischer Krafteinleitung kann es im negativen Fall zum Versagen und Kollabieren der Strukturen kommen, wodurch der Insasse starken Belastungen ausgesetzt wird. Um dies zu verhindern und einen verbesserten Lastpfad zu generieren, muss der Querträger entsprechend steif ausgeführt sein, dies kann jedoch zu zusätzlichen Problemen mit dem Beinimpaktor führen.

Crash, Insassenschutz, Rollover

Für die Anforderungen hinsichtlich des Fahrzeugüberschlages müssen die Strukturen der A-Säule und des Windschutzscheibenbereiches sehr steif ausgelegt werden. Dies widerspricht den Anforderungen des Fußgängerschutzes für diesen Bereich. Gegen eine Kombination der beiden Maßnahmen – also eine steife A-Säule und weiche Strukturen vor der Säule zum Schutz der Fußgänger beim Kopfanprall – spricht die dadurch sehr starke Einschränkung des Sichtfeldes.

Crash, Windschutzscheibenbefestigung

Die Windschutzscheibe ist heutzutage eine tragende Struktur bei sehr vielen Crashlastfällen, ebenso beim Frontcrash zur Stabilisierung der Fahrgastzelle. Außerdem ist sie in die Sicherheitssysteme zum Insassenschutz eingebunden, beispielsweise als Reflektor bei der Airbagentfaltung auf der Beifahrerseite oder auch als zusätzliche Begrenzung für Kopfairbags. Zusätzlich übernimmt die Windschutzscheibe speziell bei NVH¹-Anforderungen eine entscheidende Rolle, indem sie einen wesentlichen Teil zum Erreichen der notwendigen Gesamtsteifigkeit der Struktur beiträgt. Die Verklebung der Windschutzscheibe muss entsprechend ausgelegt werden, um diese funktionalen Anforderungen zu erfüllen.

Crash, Eindringungen im Bereich der Windschutzscheibe

Die Anbindungen der Motorhaube – Verschluss sowie Scharniere – müssen den Belastungen, wie sie beispielsweise bei Frontcrashes auftreten, standhalten. Dadurch wird das Eindringen von Bauteilen in den Windschutzscheibenbereich verhindert, und es entsteht keine zusätzliche Gefahr für die Insassen. Speziell bei crash-aktiven Motorhauben spielt dies eine entscheidende Rolle, da hier die Algorithmen für den Fußgängerschutz als auch für die anderen Crashlastfälle entsprechend abgestimmt und sicher ausgelegt sein müssen. Bei realen Unfällen kann es jedoch vorkommen, dass zuerst ein kleiner Crashpuls auf das Fahrzeug wirkt und anschließend ein Frontalcrash erfolgt – dann muss durch mechanische Maßnahmen das Eindringen der Motorhaube in den Fahrgastraum verhindert werden.

Design der Front

Vorstehende Außenkanten von Fahrzeugen können ein erhebliches Verletzungsrisiko für Fußgänger darstellen, verschiedene Richtlinien wirken diesem Risiko entgegen. Bei der Entwicklung von aktiven Motorhauben muss darauf besonders Wert gelegt werden. Durch lokales Anheben von Fahrzeugkomponenten treten zusätzliche Fugen und Kanten als neues Verletzungsrisiko für den Fußgänger in den Vordergrund.

Stoßfängeranforderungen

Durch leichte Stöße auf den Stoßfänger darf die Funktionalität der Fahrzeugfront nicht beeinträchtigt werden. Dies wird in Form von gesetzlich definierten Stoßfängertests überprüft, wobei beispielsweise die Funktionen der Beleuchtungseinheiten beurteilt werden. Dafür ist ein gezieltes Auslegen der Lastpfade und des Energiemanagements für diese relativ leichten Lastfälle erforderlich. Durch eine zu weiche Struktur der Fahrzeugfront, wie sie für den Beinanprall wünschenswert wäre, kann es zu Problemen mit den gesetzlich definierten Anforderungen kommen.

Abschleppvorrichtung

Beim Beinanprall kann es zu einer deutlichen Überschreitung der gesetzlichen Grenzwerte kommen, wenn mit dem Beinimpaktor die harte Struktur der Abschleppvorrichtung getroffen wird. Unabhängig davon, ob die Abschleppösen demontierbar sind oder nicht, ist eine steife

¹ NVH: Noise, Vibration, Harshness

Ausführung der Abschleppvorrichtung aber notwendig, um diejenigen technischen Anforderungen zu erfüllen, welche das Einleiten der Kräfte in die Karosserie sicherstellen. Abhilfe dabei kann eine Rückversetzung der Abschleppvorrichtung schaffen.

Reduktion von CO₂, Leichtbau, Aerodynamik

Bei der Fahrzeugentwicklung unter Berücksichtigung der Fußgängerschutzanforderungen ist prinzipiell eine weicher gestaltete Front und mehr Freiraum unterhalb der Motorhaube nötig. Das Resultat sind aufgrund der designtechnischen Anforderungen und der Markenidentität höher gebaute Fahrzeuge, weswegen sich zumeist die aerodynamischen Eigenschaften des Fahrzeuges verschlechtern. Dadurch erhöhen sich der Verbrauch des Fahrzeuges und ebenso der CO₂-Ausstoß, dessen Reduktion jedoch ein Hauptziel der Europäischen Kommission und der Industrie ist.

Bauteilsteifigkeiten, Biegung, Beulen

Vor allem die Motorhaube und die Kotflügel müssen durch die Anforderungen des Kopfanpralls nachgiebig gestaltet sein. Diesen Anforderungen wirken jedoch notwendige Steifigkeiten der einzelnen Karosseriebauteile entgegen. Diese Steifigkeiten sind zwingend notwendig, um auftretenden Windlasten oder Standardgebrauchsbelastungen gerecht zu werden.

Bauteilsteifigkeiten, Torsion

Die Torsionssteifigkeit der Motorhaube ist für unterschiedliche Lastfälle von enormer Bedeutung. Zu berücksichtigen sind hierbei beispielsweise das Haubenflattern bei hohen Geschwindigkeiten, diverse Misuse-Anwendungen, das Öffnen und Schließen der Haube sowie mechanische Anforderungen aufgrund der Scharniere und Haubenschlösser. Durch Bauteile von geringer Steifigkeit und zu weiche Anbindungen der Haube bei den Scharnieren und Schlössern kann es primär zu Schwingungen bei hohen Geschwindigkeiten sowie beim Fahrzeughandling kommen, außerdem bedeutet dies eine Verschlechterung der Schwingungs- und Vibrationseigenschaften ebenso wie der Akustik.

Eine möglichst hohe Torsions- und auch Biegesteifigkeit steht in direktem Konflikt mit den Anforderungen an den Fußgängerschutz. Um eine gemeinsame Lösung zu finden, ist auf eine möglichst harmonische Verteilung der Steifigkeit zu achten. Zusätzlich spielen hier vor allem die Verbindungstechniken – zumeist Klebeverbindungen – zwischen der Außenhaut und der inneren Verstärkung der Motorhaube eine entscheidende Rolle.

Böschungswinkel

Speziell für Geländewagen und SUVs sind geometrische Anforderungen wie etwa der Böschungswinkel ebenso wie technische Anforderungen – beispielsweise massive Schutzbleche oder Bügel an der Fahrzeugfront – von entscheidender Bedeutung, um die funktionalen Anforderungen und die Geländegängigkeit des Fahrzeuges zu demonstrieren und sicherzustellen. Durch diese konstruktiven Maßnahmen treten jedoch Probleme bei der Erfüllung der Grenzwerte beim Beinanprall auf, da der untere Lastpfad nicht entsprechend berücksichtigt werden kann. Alternativ zu einem Beinanprall kann ein Hüftanprall im Bereich

des Stoßfängers durchgeführt werden, dabei muss aber der Stoßfängerbereich dementsprechend weich gestaltet werden und vor allem genügend Deformationsraum zur Verfügung stehen.

Versicherungseinstufungstests, Allianz Zentrum Technik Test

In einigen Ländern wird die Versicherungseinstufung der Fahrzeuge auf Basis von leichten Crashtests und der Bewertung der anschließenden Reparatur durchgeführt. Aus diesem Grund ist jeder Hersteller bemüht, die aus dem Crash resultierenden Verformungen und Defekte, die Reparaturfreundlichkeit und die Bauteilkosten an der Fahrzeugfront zu optimieren. Das dafür notwendige Crash- und Energiemanagement sowie die Bauteil-auslegungen stehen häufig im Gegensatz zu den Anforderungen des Fußgängerschutzes. Eine weiche energieabsorbierende Gestaltung der Fahrzeugfront, aktive Fußgängerschutzlösungen und eine dafür notwendige umfangreiche Sensorik hinter dem Stoßfängerüberzug erhöhen die Reparaturkosten und die damit verbundenen Einstufungen der Versicherungen.

Thermische Anforderungen

Um die Funktionalität der Kühlsysteme und des Motors sicherzustellen, ist eine geregelte Zufuhr mit ausreichend Kühlluft notwendig. Bei der Auslegung hinsichtlich des Beinanpralls sind zusätzliche Lastpfade, Spoiler und der Einsatz von energieabsorbierenden Strukturen notwendig. Durch diese Maßnahmen kann der Luftpfad massiv verändert werden. Hier sind neue Methoden zur multidisziplinären Optimierung gefragt, um dahingehend die gesamte Fahrzeugfront zu optimieren.

Spritzwand, Wasserkasten

Im Bereich der Windschutzscheibe ist aus sicherheitstechnischen Gründen eine Spritzwand zwischen Motorraum und Passagierraum platziert. Damit wird das Eindringen von Abgasen und im Notfall auch das Eindringen von Teilen des Motors und Antriebsstranges verhindert. Darüber hinaus befinden sich in diesem Bauraum auch der Wasserkasten und die Anbindepunkte der Scharniere. Durch gezielte konstruktive Maßnahmen müssen in diesem Bereich die Anforderungen des Kopfanpralls berücksichtigt werden, eventuell sind hier zusätzliche energieabsorbierende Strukturen notwendig.

Fahrdynamik, Fahrwerk

Speziell bei sportlichen Fahrzeugen ist die Auslegung des Fahrwerks und der dazu notwendigen Bauteile von entscheidender Bedeutung. Dabei kann es im Bereich der Federdome zu Konflikten mit den Fußgängerschutzanforderungen kommen, da diese innerhalb der nötigen Deformationszonen des Kopfpaktors liegen. Durch gezielte Maßnahmen muss hier die Anbindung der Federbeine optimiert werden.

Crash, Kompatibilität

Die Kompatibilität bei einem Unfall wird bei den modernen Fahrzeugen immer wichtiger. Dadurch wird sichergestellt, dass durch die Strukturen nicht nur die Insassen des Fahrzeuges geschützt werden, sondern auch die Sicherheitseinrichtungen des gegnerischen

Fahrzeuges entsprechend ihrer funktionalen Auslegung aktiviert werden. Dies wird durch gezielte Lastpfade und Krafteinleitungen erreicht, diese müssen bei der Auslegung hinsichtlich des Beinanpralls berücksichtigt werden.

Motorpackage

Die Antriebseinheit bei modernen Fahrzeugen ist ein komplexes Zusammenspiel unterschiedlicher Aggregate und Anbauteile. Dies kann beispielsweise ein aufgeladener Verbrennungskraftmotor sein, aber auch die Zahl der Hybridantriebe nimmt ständig zu. Speziell bei diesen innovativen Antriebskonzepten ist das Package der einzelnen Komponenten von entscheidender Bedeutung und stellt für den Entwicklungsingenieur eine herausfordernde Aufgabe dar. Die Anforderungen des Fußgängerschutzes müssen mit dem Package abgestimmt werden, Deformations- und Freiräume müssen entsprechend berücksichtigt werden. Speziell harte und schwere Bauteile müssen außerhalb der Fußgängerschutzzonen platziert werden, demzufolge sind weiche und nachgiebige Strukturen für Abdeckungen und die Luftführungen zu verwenden.

2.3.2 Passive Lösungsansätze

Generell betreffen die Passiven Lösungsansätze sämtliche Bereiche des Fahrzeugs, welche in Abschnitt 2.3.1.3 dargestellt sind. Dabei kommen unterschiedliche konstruktive Maßnahmen oder energieabsorbierende Materialien zum Einsatz.

Neben ausreichendem Freiraum, welcher beim Anprall der Impaktoren von entscheidender Bedeutung ist, sind Passive Lösungsansätze die für den Fußgängerschutz relevantesten Maßnahmen zur Reduktion der Belastung des Impaktors bzw. Fußgängers. Bei den Passiven Lösungsansätzen gilt es, durch geeignete konstruktive Maßnahmen die Energieaufnahme und das Deformationsverhalten an den einzelnen Anprallstellen auszulegen und hinsichtlich der gesetzlichen Anforderungen zu optimieren. Dabei werden vor allem geometrische Aspekte und Details betrachtet, darüber hinaus jedoch auch noch unterschiedliche Werkstoffe oder Blechstärken. Ziel aller Maßnahmen ist es, die eingebrachte Energie harmonischer und über einen längeren Zeitraum hinweg zu absorbieren.

Zusätzlich zu den elastischen und plastischen Deformationen der Strukturen während des Anpralls wird das gezielte Versagen von Bauteilen eingesetzt, um die gesetzlichen Anforderungen zu erfüllen. Durch das gezielte Versagen werden einerseits zusätzliche Deformationswege zur Verfügung gestellt, andererseits wird der Rebound auf den Impaktor reduziert. Bei einigen Fußgängerschutzkonzepten wird gezieltes Versagen zur Ausprägung von Lastpfaden mit definierten Niveaus und Deformationszonen eingesetzt, weshalb beispielsweise Scherbolzen oder Sollbruchstellen an der Struktur in die konstruktive Ausführung integriert werden.

Die bei den unterschiedlichen Komponententests eingebrachten Energien sind im Vergleich zu einem Frontcrash relativ gering. Dies bedeutet, dass durch geringe konstruktive Änderungen und Detaillösungen bereits eine deutliche Verbesserung oder aber auch

Verschlechterung erzielt werden kann. Aus diesem Grund ist vor allem auf robuste und unempfindliche technische Lösungen sehr großer Wert zu legen.

Durch die Anforderungen des Fußgängerschutzes muss zumeist das Package des gesamten Antriebsstranges optimiert werden. Hierzu zählen neben einer optimierten Anordnung des Antriebes und der einzelnen Aggregate insbesondere das Absenken des gesamten Antriebsstranges, um so zusätzlichen Freiraum zwischen Motorhaube und Antrieb zu erhalten. Die Anbauteile des Antriebes – vor allem die Motorabdeckung und Schutzabdeckungen – werden zunehmend aus Kunststoffen gefertigt und zudem besonders nachgiebig und flexibel gestaltet. Als weiterer Lösungsweg kann das Design des Frontbereichs angehoben werden, um so den notwendigen Freiraum zu erreichen. Dies führt zu einem gänzlich geänderten Frontdesign und Erscheinungsbild, wovon der Luftwiderstand und somit auch der CO₂-Ausstoß beeinflusst werden können. Ferner können davon weitere relevante charakteristische Größen des Fahrzeugkonzeptes wie beispielsweise H-Punkt oder Sichtfeld betroffen sein.

2.3.3 Crash-aktive Systeme beim Fußgängerschutz

Reichen Passive Lösungsansätze zur Erfüllung der gesetzlichen Kriterien nicht aus bzw. können die Konzepte nicht umgesetzt werden, werden zunehmend crash-aktive Sicherheitssysteme zum Schutz der Fußgänger in die Fahrzeuge integriert.

Das relevanteste und auch bereits in Serienfahrzeugen zum Einsatz kommende System ist die aktive Motorhaube. Hier wird durch eine Aktuatorik die Motorhaube angehoben und somit zusätzlicher Deformationsweg zwischen Haube und Motorpackage geschaffen, wodurch das Verletzungsrisiko deutlich minimiert werden kann.

Wesentliche Nachteile solcher crash-aktiver Systeme sind der zusätzliche Entwicklungsaufwand und die damit verbundenen Kosten, vor allem aber die Integration der dafür notwendigen Sensorik, der Algorithmen sowie eventuell erforderlicher Steuergeräte.

Aktive Motorhaube

Die Aktuatorik einer aktiven Motorhaube stellt ein zusätzliches Sicherheitssystem im Fahrzeug dar und muss neben den Funktionen für den Fußgängerschutz auch zahlreichen weiteren Anforderungen genügen. Aktive Motorhauben werden nur dann Einzug in Fahrzeuge finden können, wenn sie nicht zu Beeinträchtigungen bestehender Funktionen und Fahrzeugeigenschaften führen, wenn nur geringe Kosten für das System anfallen oder Passive Lösungen nicht ausreichend sind.

Zu den wesentlichsten Herausforderungen bei der aktiven Motorhaube zählt die Kombination von Aufstellweg und Aufstellzeit. Um die Verletzungen der Fußgänger zu minimieren, muss der Aufstellvorgang beendet sein, bevor der Kopf des Fußgängers auf das Fahrzeug prallt. Typische Auftreffzeiten für den Kopf liegen nach [FRE01] zwischen ca. 60 und 150 ms nach dem Erstkontakt des Fußgängers mit dem Stoßfänger. Dies hängt vor allem von der Größe des Fußgängers, von der Fahrzeugform und schließlich von der Unfallkonstellation und -geschwindigkeit ab.

Basierend auf diesen Informationen aus Unfallrekonstruktion und Unfallforschung kann als Randbedingung für eine aktive Motorhaube eine Aufstellzeit von 40 bis 60 ms angenommen werden. Zu diesem Zeitpunkt muss die Motorhaube vollständig angehoben sein, und die Schwingungen der Haubenstruktur müssen bereits abgeklungen bzw. gedämpft sein. Ansonsten könnte es durch zusätzliche Relativbewegungen zwischen Kopf und Motorhaube zu einer Erhöhung der Belastungen auf den Kopf kommen. Typische Aufstellwege bei den technischen Lösungen bewegen sich zwischen 50 und 100 mm.

Bei der Umsetzung aktiver Motorhauben sind neben der Aufstellzeit und dem Aufstellweg noch weitere Anforderungen von Relevanz wie etwa das Package bzw. der Bauraum für das gesamte System. Denn durch das crash-aktive System darf es zu keinen grundlegenden Änderungen am Package kommen. Des Weiteren muss bei der Entwicklung auf die Reversibilität des Systems geachtet werden. Zu berücksichtigen ist hier vor allem die einfache Wiederaktivierung des crash-aktiven Systems – möglichst ohne Besuch einer Fachwerkstatt und ohne zusätzliche Kosten. Ein weiterer wesentlicher Faktor ist die Stabilität der Motorhaube, denn durch den Aufstellvorgang darf es insbesondere bei einer Fehlauslösung nicht zu plastischen Deformationen der Motorhaube kommen.

Die Standardfunktionen der Motorhaube dürfen bei der Implementierung einer aktiven Motorhaube keinesfalls vernachlässigt werden. Vielmehr müssen die Interaktionen mit anderen funktionalen Anforderungen im Detail betrachtet werden. Beispielsweise darf sich die Motorhaube bei einem Frontcrash nicht von der Fahrzeugstruktur lösen oder in den Innenraum eindringen.

Um diese Anforderungen zu erfüllen, können unterschiedliche Lösungsansätze gewählt werden. Für das Aufstellen können hydraulische, elektrische oder elektromagnetische Aktuatoren, pneumatische Muskeln oder bei irreversiblen Systemen pyrotechnische Aktuatoren zum Einsatz kommen. Zusätzlich können Dämpfungselemente integriert werden, um das Schwingen der Haubenstruktur zu reduzieren.

Ein weiteres Lösungskonzept beinhaltet das pneumatische Aufstellen der Haube durch Airbags, welche unter der Haubenfläche positioniert sind. Ein solches System besitzt ein sehr gutes Schutzpotential, die Umsetzung ist jedoch sehr aufwändig und komplex, ebenso ist mit einem sehr hohen Kostenaufwand zu rechnen.

Airbagsysteme

Ähnlich wie bei Airbagsystemen, die bei einem Kopfanprall auf die Motorhaube eingesetzt werden, können ähnliche Systeme für Bereiche der Fahrzeugfront angewandt werden. Hierbei bieten sich vor allem steife Strukturbereiche bzw. Zonen mit geringen Deformationswegen an. Dies sind einerseits der Dachrahmen mit den A-Säulen, andererseits die Bereiche an der Vorderkante der Haube. Bereits relativ kleine Airbags im Bereich der Dachrahmen reichen aus, um das Verletzungsrisiko an dieser Stelle des Fahrzeugs zu senken.

2.3.4 Sensoren und Aktive Sicherheit beim Fußgängerschutz

Sensoren zur Ansteuerung aktiver oder crash-aktiver Sicherheitssysteme erfordern eine sehr hohe Zuverlässigkeit und Sicherheit bei der Erkennung des Fußgängers. Dabei müssen sie unempfindlich gegen Umwelteinflüsse sein und eine ausreichende Lebensdauer garantieren. Es ist notwendig, Fehlauflösungen bestmöglich zu vermeiden sowie einen Fußgängerunfall zuverlässig zu erkennen und die unfallkritische Situation entsprechend zu bewerten. Gleichzeitig sollten Sensoren, Steuergeräte und Aktuatorik kostengünstig sein und nur einen geringen Bauraum einnehmen.

Prinzipiell kann zwischen kontaktlosen Sensoren bzw. Umfeldsensoren und Kontaktsensoren unterschieden werden. Bei heutigen Systemen werden vorwiegend die Kontaktsensoren zur Identifikation eines Fußgängerunfalls verwendet. Auch in naher Zukunft wird man aus sicherheitstechnischen Gründen zumindest auf die Unterstützung der Kontaktsensoren bei den Auslösealgorithmen nicht verzichten können. In Kombination mit unterschiedlichen Fahrerassistenzsystemen nimmt jedoch die Bedeutung der Umfeldsensoren stetig zu und kann aus modernen Aktiven Sicherheitskonzepten nicht mehr weggedacht werden.

Kontaktsensoren

Eine Auslösung auf Basis der Umfeldsensoren wird bei sicherheitsrelevanten Systemen noch nicht eingesetzt, hier ist zumindest die Unterstützung von Kontaktsensoren notwendig. Diese beruhen darauf, dass der Zusammenstoß mit einem Fußgänger erst bei Kontakt mit dem Fahrzeug detektiert wird. Die Hauptaufgabe von Kontaktsensoren ist demzufolge, eine Kollision mit einem Fußgänger möglichst schnell zu erkennen und eventuell weitere Informationen über den Unfall zur Verfügung zu stellen. Wie bereits in Abschnitt 2.3.3 dargestellt, muss für eine aktive Motorhaube eine Aufstellzeit von ca. 40 bis 60 ms erzielt werden. In dieser Zeit muss der Unfall detektiert werden, die Aktuatorik angesteuert werden und vor allem die Haube vollständig angehoben werden. Dadurch wird sehr deutlich, dass der Erkennungszeit des Fußgängerunfalls eine entscheidende Rolle zugesprochen wird. Zusätzlich zur Identifikation des Unfalls werden sehr häufig auf Basis der gemessenen Daten Informationen wie die Auftreffenergie oder die Masse des Kollisionspartners errechnet, welche dann für die Implementierung weiterer Funktionen des Sicherheitssystems verwendet werden können.

Für die Kontaktsensierung kommen verschiedene physikalische Sensorprinzipien in Frage. Im Wesentlichen werden entweder direkt Kräfte in der Kontaktzone oder aber die auftretenden Deformationen und Beschleunigungen gemessen. Kräfte können mithilfe von berührungsempfindlichen Folien gemessen werden – dabei kommen beispielsweise Polyvinylidenfluorid-Folien, welche ausgesprochen gute piezoelektrische Effekte aufweisen, zum Einsatz. Im Bereich des Stoßfängers werden die resultierenden Beschleunigungen beim Aufprall gemessen. Hierbei werden die Beschleunigungen zumeist an mehreren Stellen analysiert, um einerseits die Signale zu überprüfen und um andererseits zusätzliche Information zur Anprallstelle zu berechnen. Eine dritte Methode zur Identifikation des Fußgängeranpralls ist der Einsatz von Lichtleitensensoren (Fibre Optical Sensors (FOS)).

Basierend auf der Deformation der Lichtleitsensoren können Angaben zum Anprallort und zur Eindringtiefe berechnet werden.

Vor allem bei Kontaktsensoren ist das Unterscheiden verschiedener Anprallkonstellationen von entscheidender Bedeutung. Dabei muss nicht nur der Fußgängeranprall erkannt werden, sondern es müssen vor allem auch Misuse-Anprallkonstellationen (Pfahl, Vogel, Stein, Ball, Mülltonne,...) oder Parkrempler identifiziert werden.

Die Kontaktsensoren werden sehr häufig als zusätzliche Absicherung eines Umfeldsensors eingesetzt. Dabei wird den Umfeldsensoren die Rolle der Objektidentifizierung und Objektklassifizierung zugeordnet, den Kontaktsensoren die Absicherung des Algorithmus zur Auslösung des Systems. Solche zweistufigen Sensorkonzepte, welche einen Pre-Crash-Sensor und einen Kontaktsensor kombinieren, sollen Fehlauflösungen minimieren und die Sicherheit des gesamten Systems erhöhen.

Umfeldsensoren

Durch die kontaktlose Sensorik kann ein Fußgänger bereits in der Pre-Crash-Phase detektiert werden. Dadurch entstehen neue Möglichkeiten beim Vermeiden des Unfalls, und aktive Systeme können deutlich besser auf einen Fußgängerunfall abgestimmt werden. Die dafür benötigte Sensorik und die zum Einsatz kommenden Algorithmen müssen Merkmale des Fußgängers erfassen und identifizieren. Die Umgebung wird mit geeigneten Algorithmen hinsichtlich charakteristischer Größen von Fußgängern analysiert und bewertet. Dies können beispielsweise die Größe, die Form, oder die Bewegungscharakteristik des Fußgängers sein. Das jeweilige Rückstrahlverhalten unterschiedlicher Sensoren spielt dabei eine wichtige Rolle. Die Herausforderung bei sicherheitsrelevanten Systeme ist es, die Attribute des Fußgängers, welche durch die Sensorik zur Verfügung gestellt werden, richtig auszuwählen, zu kombinieren und in den Algorithmen zu berücksichtigen. Zumeist werden mehrere Attribute betrachtet, einerseits um komplementäre Informationen in den Algorithmus einzuarbeiten, andererseits um durch redundante Informationsbewertung systembedingte Fehlauflösungen zu minimieren. Diese Kombination unterschiedlicher Sensoren und der damit verbundenen umfeldspezifischen Informationen wird als Sensordatenfusion bezeichnet. Dadurch werden Zuverlässigkeit und Sicherheit, aber auch die Möglichkeiten der sicherheitsrelevanten Systeme im Fahrzeug deutlich erhöht. Dies ist vor allem bei schwierigen Bedingungen wie Regen, Nebel oder Schneefall oder auch bei Störungen der einzelnen Sensoren zwingend notwendig. Störungen und damit einhergehende eventuelle Fehlinformationen und –interpretationen können beispielsweise durch elektrische Felder, Magnete, Störsignale, Stahlbeton oder sonstige äußere Einflüsse auftreten.

Als kontaktlose Umfeldsensoren werden heutzutage neben Videoanalysen und Radar vor allem Laserscanner eingesetzt. Des Weiteren werden Infrarotsysteme oder auch Ultraschallsensoren in die Fahrzeuge integriert. Bei den einzelnen Sensoren werden unterschiedliche Methoden und physikalische Prinzipien zur Erkennung der charakteristischen Eigenschaften der Fußgänger angewandt. Die Gehbewegungen des Fußgängers können mithilfe von Videoanalysen oder Laserscannern mit hoher Auflösung erfasst werden. Die Infrarotsensoren als ein Bestandteil der Nachtsichtassistenten in modernen Fahrzeugen nutzen die Wärmeabstrahlung der Fußgänger. Die Gehgeschwindigkeit als physikalische

Eigenschaft des Fußgängers kann mittels Radar oder indirekt auch mithilfe von Laserscannern und Videosystemen erkannt werden. Mittels Infrarotsensoren oder Videosystemen kann auch die gesamte Form des Fußgängers erkannt werden. Bei Laserscannern ist dies nur bedingt möglich, da hier nur einzelne Ebenen abgetastet werden. Um hier ein vollständiges Bild zu erhalten, müsste eine Vielzahl an Scanebenen implementiert werden. Die Radartechnologie kann den Fußgänger zusätzlich auf Basis seines Wassergehalts von der Umwelt unterscheiden.

In Abbildung 2.23 ist ein Überblick über unterschiedliche Sensorsysteme in modernen Fahrzeugen dargestellt. Dabei ist sehr deutlich zu erkennen, dass die einzelnen Systeme hinsichtlich der Reichweite und auch des Scanwinkels eine unterschiedliche Performance aufweisen. Zunehmend werden die Fahrzeuge mit Sensorsystemen ausgestattet, die dabei gewonnenen Sensordaten können auch für aktive Fußgängerschutzsysteme verwendet werden, wodurch zukünftig intelligente und auch sichere Systeme in den Fahrzeugen Einzug halten werden.

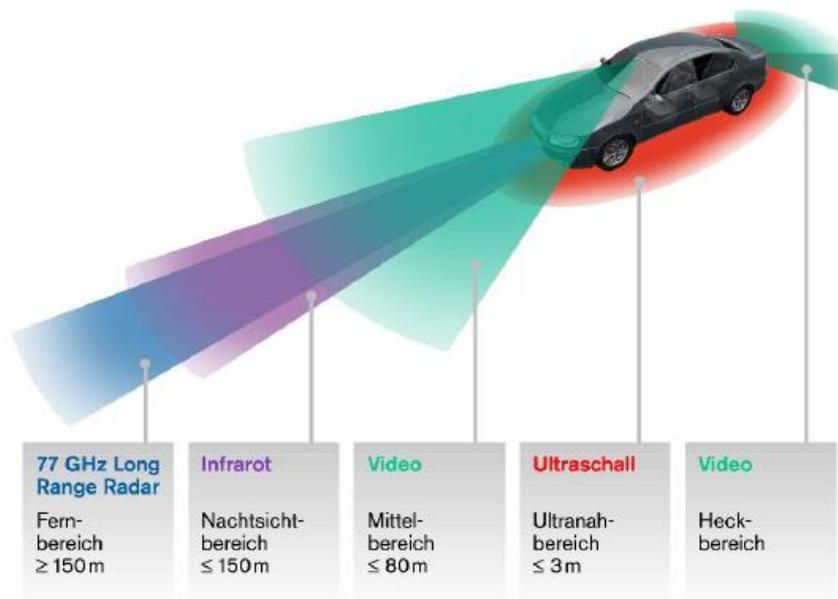


Abbildung 2.23: Überblick über unterschiedliche Sensorsysteme im Fahrzeug

2.3.5 Ausblick auf zukünftige Fußgängerschutzsysteme

Vor allem durch die Einführung neuer Gesetze hat der Fußgängerschutz in der Fahrzeugentwicklung an Bedeutung gewonnen. In den letzten Jahren wurden deutliche Verbesserungen im Bereich der Passiven Sicherheit umgesetzt. Außerdem wurden bereits erste Fahrzeuge mit crash-aktiven Sicherheitssystemen für den Fußgängerschutz auf den Markt gebracht.

In Abbildung 2.24 werden Maßnahmen für den fahrzeugseitigen Fußgängerschutz dargestellt. Auf den beiden Achsen sind einerseits der voraussichtliche Zeitpunkt der Markteinführung, andererseits das Sicherheitspotential des jeweiligen Systems aufgetragen [KUE07]. Vor

allein durch die Kombination mehrerer Systeme kann das Schutzpotential zusätzlich erhöht werden, dies gilt sowohl für Aktive als auch Passive Sicherheitssysteme, des Weiteren ist in Abbildung 2.24 ersichtlich, dass durch die Pre-Crash-Aktivierung der Systeme ein erhöhtes Schutzpotential zu erwarten ist.

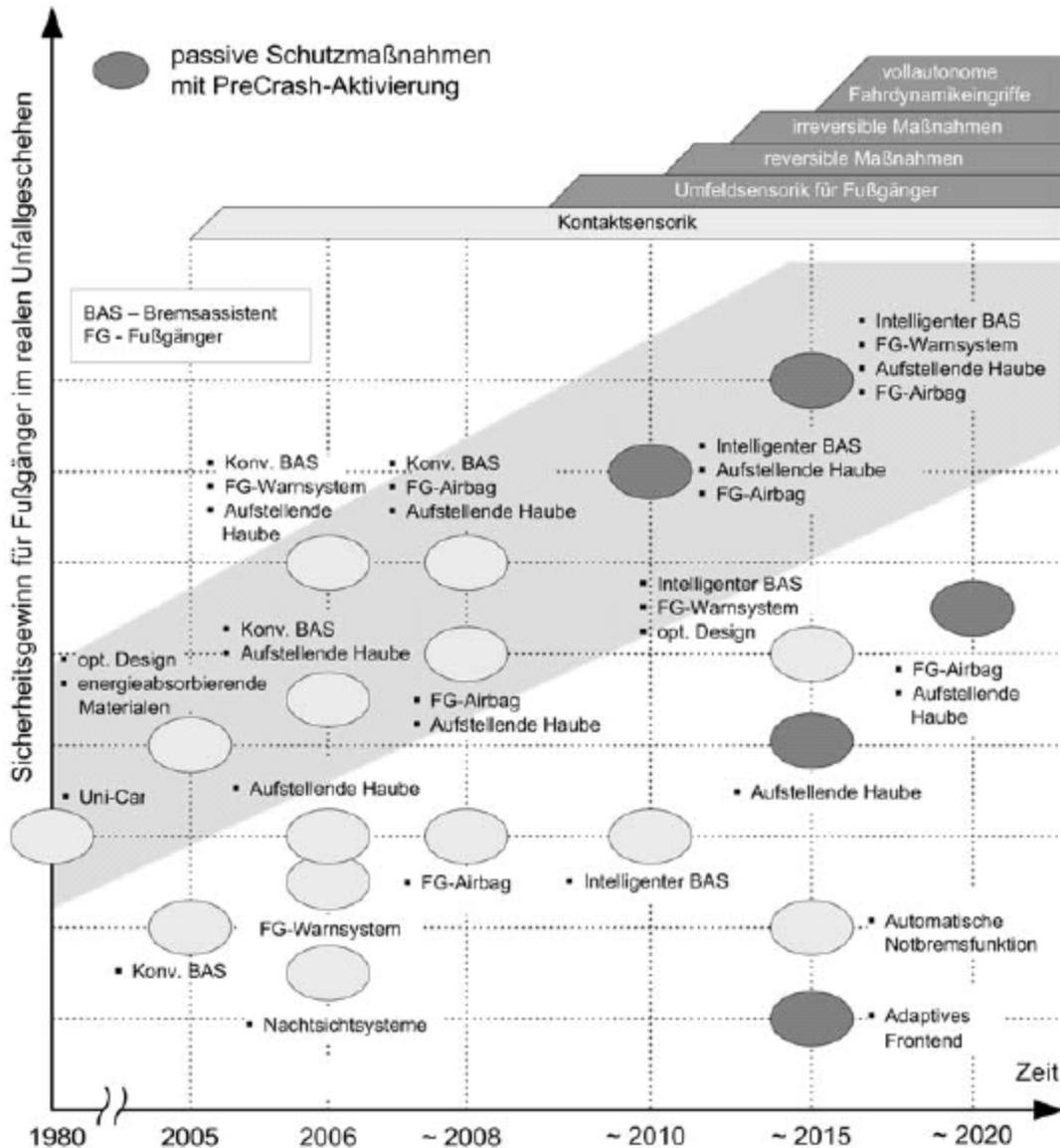


Abbildung 2.24: Roadmap zukünftiger Fußgängerschutzsysteme [KUE07]

Um den fahrzeugseitigen Fußgängerschutz noch weiter zu verbessern, gibt es eine Vielzahl an Forschungsaktivitäten und Entwicklungstätigkeiten. Zu den wichtigsten Themen zählt hierbei vor allem die Kombination Aktiver und Passiver Sicherheitssysteme – diese Kombination wird sehr häufig als Integrierte Sicherheit bezeichnet. Dadurch kann das fahrzeugseitige Schutzpotential nochmals erhöht und ein wesentlicher Beitrag zur Reduktion von verletzten und getöteten Fußgänger im Straßenverkehr geleistet werden.

3 Einsatz virtueller Techniken im Entwicklungsprozess

Heutzutage muss die Wettbewerbsfähigkeit der einzelnen Unternehmen und Automobilhersteller ständig unter Beweis gestellt werden. Durch die zunehmende Globalisierung, durch verkürzte Produktlebenszyklen und vor allem durch die steigende Komplexität der Produkte ändern sich die Anforderungen, welche in der Entwicklung berücksichtigt werden müssen. Dies erfordert ein permanentes Forschen nach neuen Methoden, welche im weiteren Verlauf auch laufend aktualisiert und gepflegt werden müssen.

3.1 Gegenwärtige Herausforderungen in der Automobilindustrie

Zu den größten Herausforderungen bei der Einführung moderner Entwicklungsprozesse zählen zunehmender Kostendruck, kürzere Entwicklungszeiten sowie steigende Qualitätsanforderungen. Hinzu kommen zusätzliche Produkthanforderungen der Kunden, welche die Themengebiete Komfort, Sicherheit und sukzessive auch die Umwelt betreffen. Zu letzterem Bereich zählen vorwiegend Strategien hinsichtlich Kraftstoffersparnis und CO₂-Reduktion sowie nachhaltige und ressourcenschonende Produkte und Produktionstechnologien entlang des gesamten Produktlebenszyklus. Verstärkt wird in diesem Zusammenhang auch das Thema Produkthaftung relevant, welches ebenso in den Entwicklungsprozess einbezogen werden muss. Parallel zu den Kundenwünschen muss noch eine Vielzahl an Vorschriften vonseiten der Gesetzgeber sowie hausinterne Anforderungen der Automobilhersteller berücksichtigt werden, wodurch die Komplexität des technischen Produktes laufend zunimmt [DIC07]. Abbildung 3.1 liefert angelehnt an [SEI08] einen Überblick über aktuelle Herausforderungen in der Automobilindustrie, welche aktuelle Trends auf diesem Sektor widerspiegeln.

Die Individualisierung spielt bei den Kunden eine große Rolle – dies bedeutet, dass die Anzahl der Modelle und der Derivate je Modell erhöht wird. Gleichzeitig nimmt dadurch aber die Anzahl der je Modell verkauften Fahrzeuge ab. Hinzu kommt, dass sich die Wertschöpfung in der Automobilindustrie in den nächsten zehn Jahren bedeutend verändern wird. Die Zulieferer werden bis zu ca. 80% der Entwicklung und Produktion übernehmen, die Automobilhersteller konzentrieren sich vermehrt auf die markenprägenden Module und Komponenten wie Design, Markenerlebnis oder Funktionen und Technologien [OLI03]. Im technischen Bereich sind zudem auch Kompetenzen in den Themengebieten Konzeptentwicklung und –bewertung sowie Gesamtfahrzeugintegration relevant.

Die Wertschöpfungskette zwischen den einzelnen am Projekt beteiligten Firmen erfordert damit eine neue Qualität im gesamten Prozess. Bei den CAE Disziplinen müssen neue Standards im Produktentwicklungsprozess eingeführt werden, um die enge Zusammenarbeit zwischen den Automobilherstellern und den Zulieferern zu verbessern. Schrittweise werden die Funktionsabsicherungen auf CAE-Basis für die kompletten Module und Derivate des Gesamtfahrzeuges zu den Zulieferern bzw. den Entwicklungspartnern hin verlagert. Bei den Automobilherstellern werden die Kompetenzfelder in den CAE Bereichen strategisch und

gezielt gestärkt werden. Dazu zählt beispielsweise die Integration der einzelnen Disziplinen oder die Funktionsabsicherung auf Gesamtfahrzeugebene.

Die Modularisierung und der Trend zur virtuellen Entwicklung führen dazu, dass Fahrzeugfunktionen einerseits modellübergreifend, andererseits auf Basis von Modulen oder Komponenten definiert und abgesichert werden müssen. Dazu müssen neue Entwicklungs- und Validierungsmethoden für diese Module und Komponenten erarbeitet und in den Entwicklungsprozess integriert werden. Dies beginnt bei der Konstruktionsmethode und den Konstruktionsprinzipien zur einfachen und fehlerfreien Integration der Module in das jeweilige Fahrzeug. Die integrierte Absicherung der Komponenten unter Berücksichtigung der fahrzeugspezifischen Randbedingungen ist ein weiterer wesentlicher Aspekt.

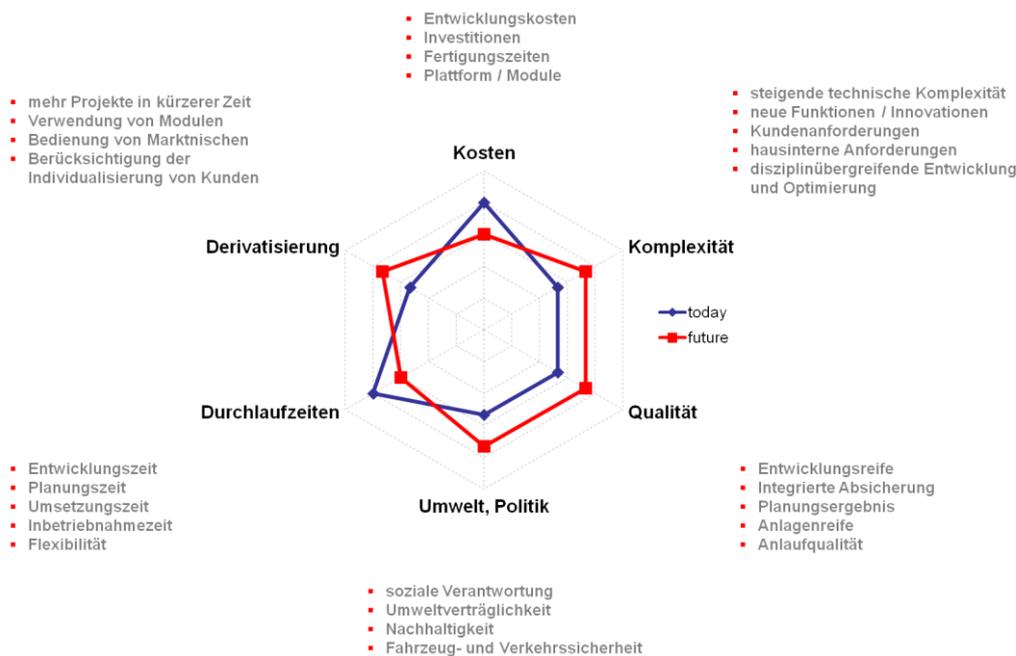


Abbildung 3.1: Aktuelle Herausforderungen an die Automobilindustrie nach [SEI08]

3.2 Der Entwicklungsprozess in der Automobilbranche

Die Produktentwicklung in der Automobilindustrie ist durch eine permanente Reduktion der Entwicklungszeit geprägt. Waren beispielsweise vor ca. 20 Jahren noch Entwicklungszeiten von ca. 50 Monaten üblich und vor 10 Jahren ca. 36 Monate, so haben sich diese bis heute auf rund 24 Monate reduziert, weitere Reduktionen der Entwicklungszeiten werden angestrebt [SCH06e, SCH06a]. Durch die Verbesserung der derzeitigen Entwicklungsmethoden und Prozesse ist eine Reduktion der Entwicklungszeit erreichbar, um diese weiter zu reduzieren, ist jedoch der Einsatz von innovativen Methoden und Prozessen gefordert [DIC07]. Die Ansatzpunkte, um diese Herausforderung zu meistern und die Lücke zwischen dem derzeitigen und den geforderten Entwicklungszeiten zu schließen, sind eine Verbesserung der virtuellen Methoden hinsichtlich deren Qualität, die Optimierung der Durchlaufzeiten sowie die Vernetzung der Methoden, um so disziplinübergreifende Entwicklungsabläufe und Gesamtfahrzeugsbetrachtungen zu ermöglichen.

Basierend auf einer durchgehenden virtuellen Entwicklung sowie einer Anpassung der zum Einsatz kommenden numerischen Methoden zum jeweiligen Entwicklungszeitpunkt kann eine Erhöhung des Produktreifegrades in den einzelnen Phasen der Entwicklung erzielt werden. In Abbildung 3.2 nach [HOL08] ist zu erkennen, dass das Niveau vor allem in den frühen Entwicklungsphasen deutlich erhöht werden kann, wodurch schließlich eine kürzere Entwicklungszeit und eine Erhöhung der Produktqualität ermöglicht wird. Hinzu kommt, dass in der frühen Phase des Produktentstehungsprozesses 70% bis 80% der Produkt- und Projektkosten festgelegt werden, gleichzeitig sind die Kosten der Änderungen noch sehr gering, und die Möglichkeiten der Kostenreduktion noch sehr hoch [EIG09].

Diese Verlagerung der Produktentwicklung in die früheren Phasen wird sehr häufig mit dem Schlagwort *Frontloading* umschrieben – wodurch eine höhere Produktqualität, eine Verkürzung der Entwicklungszeit sowie eine Senkung der Kosten erreicht werden kann.

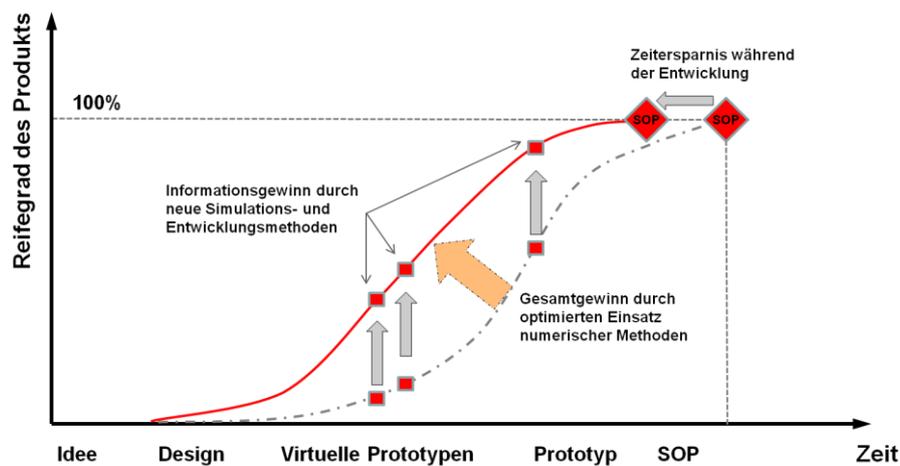


Abbildung 3.2: Erhöhung des Produktreifegrades zum jeweiligen Entwicklungszeitpunkt

3.2.1 Gliederung des Entwicklungsprozesses

Der traditionelle Entwicklungsprozess zeichnet sich durch sequentiell ablaufende Entwicklungsschritte aus, durch das Parallelisieren der einzelnen Entwicklungsschritte kann die Entwicklungszeit erheblich reduziert werden. Diese Methode ist als *Simultaneous Engineering* bekannt und heutzutage der Standard in der Fahrzeugentwicklung. Hier sind vor allem die Kommunikation, der Datenaustausch und der Abgleich der einzelnen Entwicklungsschritte von entscheidender Bedeutung. Ein detaillierter Prozessablaufplan ist dabei ein wichtiges Instrument des *Simultaneous Engineering*.

In Abbildung 3.3 ist der Produktentwicklungsprozess schematisch dargestellt, dabei befinden sich auf der ersten Stufe der Unterscheidung die Phase der Konzeptentwicklung sowie die Phase der Serienentwicklung. In der Konzeptphase werden die Vorentwicklung und die Konzeptdefinition bzw. Konzeptbestätigung durchgeführt. In der Phase der Serienentwicklung werden die bestätigten Konzepte weiterentwickelt, und es erfolgt deren

Erprobung und Verifikation, bis der Entwicklungsablauf mit der Freigabe zum SOP¹ abgeschlossen wird.

In den unterschiedlichen Phasen des Entwicklungsprozesses werden sowohl numerische als auch physikalische Entwicklungsmethoden verwendet. Eine Unterteilung sowie das Zusammenspiel der virtuellen und der realen Entwicklung ist ebenfalls in Abbildung 3.3 zu erkennen. Realen Prototypen stehen erst in einer sehr späten Phase des Entwicklungsprozesses zur Verfügung, zuvor werden die Eigenschaften des Gesamtfahrzeuges und der einzelnen Module mithilfe von Technologieträgern und Konzeptfahrzeugen analysiert und bestätigt.

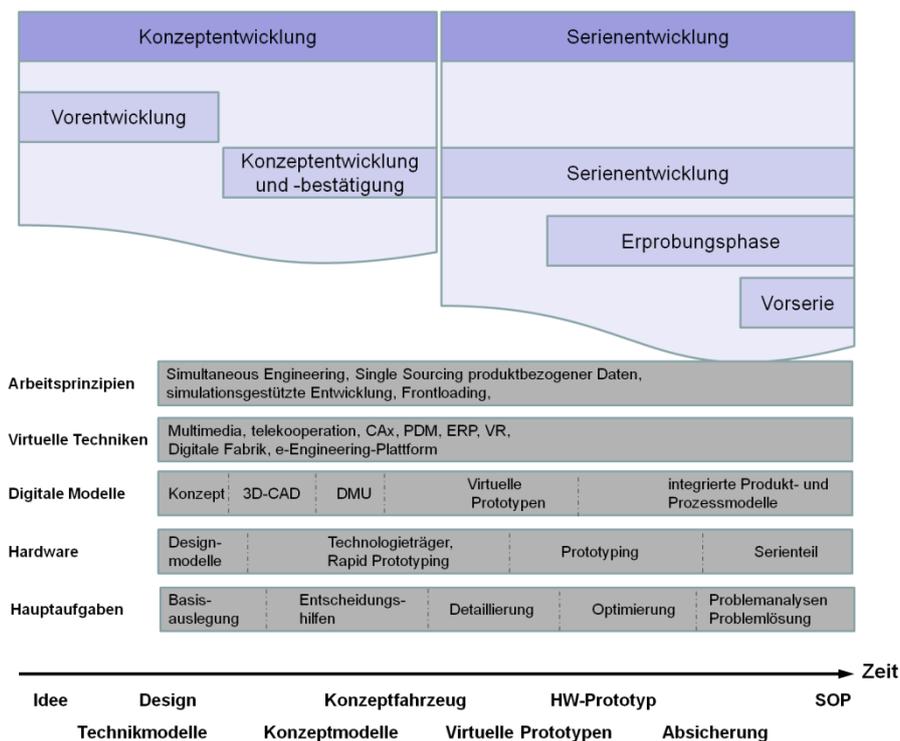


Abbildung 3.3: Überblick Entwicklungsprozess und -methoden

3.2.2 Besonderheiten der Konzeptentwicklung

In der frühen Konzeptphase werden die wesentlichen Aspekte eines Fahrzeuges auf ihre Erfüllbarkeit und Umsetzbarkeit hin analysiert. Die Konzeptphase startet mit der Projektidee und endet mit einem ersten detaillierten Lastenheft, welches die möglichst konfliktfreie Integration der Anforderungen beinhaltet. Um bereits zu einem frühen Zeitpunkt der Entwicklungstätigkeiten qualitativ hochwertige Aussagen hinsichtlich eines Konzepts treffen zu können, hat es speziell in den letzten Jahren massive Bestrebungen gegeben, unterschiedliche Tools für diese Phase zu erarbeiten.

Wesentlich für diese Phase ist die Ausarbeitung von alternativen Konzepten, welche hinsichtlich der geforderten funktionalen Ziele mit ausreichender Prognosesicherheit bewertbar sein müssen. Jene Tools, welche in der frühen Phase eingesetzt werden,

¹ Start of Production

unterscheiden sich von den Serienentwicklungstools dadurch, dass die Konstruktion keine detaillierte Bauteilgeometrie und nur ungenaue Angaben zum Package liefern kann. Während der Entwicklung müssen also die Konstruktion und die für die einzelnen Disziplinen verantwortlichen Entwicklungsabteilungen mit einer Vielzahl an Unbekannten umgehen und entsprechende Systemvereinfachungen treffen. Die wichtigsten Eigenschaften wie Steifigkeit, Schwingungsverhalten, Crashperformance oder Festigkeit müssen laufend überprüft werden, und das Konzept muss iterativ weiterentwickelt und verfeinert werden.

In der Konzeptphase werden neben einfachen oftmals analytischen Rechenalgorithmen zunehmend parametrische Entwicklungsmethoden verwendet, um die Zusammenhänge der einzelnen Disziplinen zu analysieren. Die Bedeutung der Konzeptphase wird in der kostenorientierten Entwicklung immer wichtiger, da hier die Basisentscheidungen für die spätere Serienumsetzung getroffen werden. Ist die Entscheidung für eine Variante gefallen, können wesentliche Änderungen nur noch schwer durchgeführt werden. Hinzu kommt, dass bereits bei sehr gering ausfallenden Entwicklungskosten ein großer Teil der endgültigen Produktkosten festgelegt ist. Daraus kann gefolgert werden, dass vor allem in der frühen Entwicklungsphase ein möglichst hoher Produktreifegrad erzielt werden muss, um primär die Anzahl von Fehlentscheidungen und unnötig hohe Produktkosten zu reduzieren.

Ein wesentlicher Aspekt dabei ist das Zusammenwirken von CAD und CAE speziell in der frühen Entwicklungsphase, wofür bereits anerkannte Werkzeuge und Methoden zur Verfügung stehen¹. Schlagworte, die im Zusammenhang mit diesem Thema immer wieder verwendet werden, sind beispielsweise *Concept driven Design* oder *Form follows Function*.

Ziel der Konzeptphase beim Fußgängerschutz ist es, die wesentlichen Strukturen, Lastpfade sowie Deformations- und Freiräume, welche zur Erfüllung der gesetzlichen Anforderungen notwendig sind, im Package zu berücksichtigen und damit die weitere Entwicklung maßgeblich zu beeinflussen. Dabei gilt es, vor allem in Abstimmung mit weiteren Disziplinen die Grenzen und die notwendigen Randbedingungen für die Erfüllbarkeit der Anforderungen auszuarbeiten. Hierfür werden häufig einfache analytische Methoden zur ersten Abschätzung von notwendigen Deformationswegen und resultierenden Belastungen auf die Impaktoren angewandt. Des Weiteren kommen moderne Entwicklungswerkzeuge wie beispielsweise parametrisierte Ersatzmodelle, in denen die geometrischen Ausprägungen der Fahrzeugfront sowie die Lastpfade schematisch abgebildet sind, zum Einsatz. In der frühen Entwicklungsphase werden diese einfachen Modelle mit Optimierungsalgorithmen oder stochastischen Methoden kombiniert, wodurch das Systemverständnis erhöht und die Robustheit einer technischen Lösung besser beurteilt werden kann. Basierend auf den daraus resultierenden Ergebnissen können Trendaussagen abgeleitet und Entwicklungsstrategien erarbeitet werden. Prognosefähige Aussagen hinsichtlich der Impaktorbeltung und der gesetzlichen Anforderungen können erst mit aufwändigen Modellen erarbeitet werden, da für die Fußgängerschutzsimulationen geometrische und

¹ Kommerziell verfügbare Werkzeuge für die frühen Entwicklungsphasen sind beispielsweise SFE-Concept der SFE GmbH oder Fast Concept Modeller der ForceFive AG, alternativ können auch parametrisierte CAD Modelle mit geringer Detaillierung angewandt werden.

physikalische Details entscheidend sind – diese stehen in dieser Entwicklungsphase jedoch selten zur Verfügung.

3.2.3 Trends in der Serienentwicklung

Bei der Serienentwicklung müssen unterschiedliche gesetzliche Anforderungen und Zielvorgaben betrachtet und laufend überprüft werden. Während der Fußgängerschutzentwicklung muss eine Vielzahl von problematischen Anprallpunkten berücksichtigt werden, das können – abhängig vom Fahrzeug – deutlich über 100 kritische Punkte im Anprallbereich sein. Dies erfordert, dass eine sehr hohe Anzahl an numerischen Simulationen durchgeführt werden muss, welche folglich für eine entsprechend große Menge an anfallenden Daten verantwortlich ist.

Aufgabe der Simulation in der Serienentwicklung ist die Feinabstimmung der Funktionen und die Optimierung der einzelnen Parameter wie beispielsweise Gewicht oder Kosten. Die Simulationsverfahren greifen auf detaillierte CAD Geometrie zu, FE-Netze lassen sich teilautomatisiert erstellen, und die funktionalen Anforderungen an das Fahrzeug werden vorwiegend virtuell überprüft. Durch die Möglichkeiten, welche sich durch die numerische Entwicklung bieten, können Hardwarestufen und Versuchsreihen reduziert werden. In einzelnen Fällen werden sämtliche Prototypenstufen eingespart, wie es etwa in [DAP07] am Fiat Bravo oder auch in [MLE07] am Beispiel der Strukturentwicklung der Kombiversion des Audi A4 demonstriert wird.

Dennoch lässt sich die Erprobung der realen Komponenten und des Gesamtfahrzeugs nicht vollständig ersetzen, die modernen Simulationsmethoden können aber einen bedeutenden Beitrag zur Fehlersuche und auch zur Lösungsfindung liefern. In [MEY07] wird ein Überblick über unterschiedliche CAE-Methoden in der Fahrzeugtechnik sowie deren Prognosefähigkeit gegeben. Dabei wird deutlich, dass einzelne Methoden nur als unterstützende Werkzeuge für Trendaussagen verwendbar sind und dass in einigen Simulationsbereichen die Methoden noch weiterentwickelt werden müssen oder nach wie vor keine geeigneten für die virtuelle Entwicklung vorhanden sind.

Speziell die Simulationsmodelle zur Fußgängerschutzentwicklung zeichnen sich durch eine detaillierte Darstellung und Modellierung aus. In den meisten Fällen wird für die Fußgängerschutzsimulation ein eigenes Modell der Fahrzeugfront aufgebaut, üblicherweise vom Stoßfänger bis hin zur Windschutzscheibe inklusive Windschutzscheibenrahmen, den A-Säulen und den gesamten Strukturen vor der Spritzwand. In letzter Zeit werden aber auch häufig detaillierte Modelle der Cockpitquerträger sowie der Innenausstattungen in die Fußgängerschutzmodelle eingearbeitet. Dies ist aufgrund dessen erforderlich, dass bei den EURO-NCAP Verbraucherschutztests auch der Windschutzscheibenbereich überprüft wird, und gegebenenfalls hinter der Windschutzscheibe liegende Bauteile einen großen Einfluss auf die Resultate haben können [GEH07]. Zusätzlich zu den Karosseriebauteilen werden im Fußgängerschutzmodell die Aggregate und der gesamte Antriebsstrang im Vorderwagen detailliert abgebildet, ebenso werden diverse Kleinbauteile, messtechnische Bauteile rund um den Motor, elastische Leitungen und Anschlüsse dargestellt.

Neben der geometrisch vollständigen Abbildung der Fahrzeugfront ist die funktionale Darstellung von entscheidender Bedeutung, um eine hohe Prognosefähigkeit der Simulation zu erzielen. Dazu gehören beispielsweise die kontinuumsmechanische Beschreibungen der verwendeten Materialien sowie die Abbildung der Verbindungstechniken wie beispielsweise Schweißpunkte oder Klebeverbindungen. Auch das Versagen der unterschiedlichen Bauteile – insbesondere der Verbindungs- und Befestigungstechniken – muss in den numerischen Modellen abgebildet sein. Speziell bei Kunststoffen und Schäumen sind neben den nichtlinearen Deformationseigenschaften die Dehnratenabhängigkeit¹ sowie die Temperaturabhängigkeit zu beachten und entsprechend im numerischen Modell zu berücksichtigen.

3.2.4 Vergleich der in den Entwicklungsphasen angewandten Methoden

Die Anforderungen an die während der Konzeptphase und der Serienentwicklung zum Einsatz kommenden Methoden sind sehr unterschiedlich. Ein Überblick über Anforderungen an CAE Methoden in den beiden Entwicklungsphasen liefert Tabelle 3.1.

Tabelle 3.1: Aspekte der CAE Methoden in Abhängigkeit von der Entwicklungsphase

CAE in der Konzeptphase	CAE in der Serienentwicklung
Rasche Evaluierung von sehr unterschiedlichen Fahrzeugkonzepten, oftmals keine bzw. stark vereinfachte CAD Daten vorhanden	Sehr detaillierte CAE Modelle, sichere Vorhersage notwendig, Basis sind zumeist detaillierte CAD Modelle
Jedes Konzept erfordert neue Datenerstellung, großer Aufwand, es ist auf Wiederverwertbarkeit der Daten bzw. Modelle zu achten	Geringe Geometrieabweichungen zwischen den einzelnen Analysen, Daten und Modelle können jedoch nur selten wiederverwendet werden (Ausnahmen: Module, Carry-over-Parts,...)
Hohe relative Genauigkeit, Trendaussagen	Hohe absolute Genauigkeit, Prognosefähigkeit
Einsatz von Entwurfssprachen, parametrischen Modellen, Symbolic-CAE, FEM, MDO	Einsatz von detaillierten CAD, parametrischen Modellen, FEM, MDO, digitaler Fabrik, Kostenberechnungsmethoden
Kurze Rechenzeiten	Hohe Rechenzeiten
Oftmals nur wagen Randbedingungen	Klar definierte Grenzen
Geringe Personalressourcen, Expertenwissen	Genügend Mitarbeiterressourcen
Viele Annahmen notwendig	Detaillierte Analysen einzelner Parameter
Häufig nur Beschränkung auf einzelne Funktionen	Intensive Einbindung der Aspekte anderer ingenieurwissenschaftlicher oder wirtschaftlicher Bereiche

¹ Unter Dehnratenabhängigkeit versteht man das von der Verformungsgeschwindigkeit abhängige mechanische Verhalten von unterschiedlichen Werkstoffen. Besonders ausgeprägt ist dieses bei Kunst- und Verbundwerkstoffen, jedoch auch bei im Karosseriebau verwendeten Stahlblechen. Neben der Abhängigkeit von der Dehnungsgeschwindigkeit kann sehr häufig eine Abhängigkeit von der Temperatur beobachtet werden.

In der Konzeptphase sind vor allem Entscheidungshilfen und Methoden für eine Basisauslegung ausschlaggebend, hier muss eine Vielzahl an Konzeptvarianten mit einem sehr begrenzten zur Verfügung stehenden Informationsstand hinsichtlich Geometrie und Materialien bewertet werden. Dabei nimmt man eine geringere Prognosegüte in Kauf, die Reaktionszeiten müssen jedoch entsprechend kurz ausfallen. Für die Serienentwicklung sind insbesondere detaillierte Modelle zur Funktionsabsicherung von enormer Bedeutung, mit denen einerseits virtuelle Freigaben durch die CAE Disziplinen und eine Reduktion der Entwicklungszeit ermöglicht werden, andererseits können durch die prognosefähigen Simulationsmethoden teure Versuche mit Prototypen oder Vorserienfahrzeugen eingespart werden.

3.3 Die Rolle der numerischen Simulation im Produktprozess

In der Fahrzeugentwicklung werden zukünftig die Themenschwerpunkte virtuelle Methoden, Integration und übergreifende Zusammenarbeit von entscheidender Bedeutung sein. Im Produktentwicklungsprozess werden die numerischen Methoden verstärkt in den Vordergrund treten und zu einem Teil die Hardwaretests ablösen. Neben den bereits etablierten CAE-Methoden werden in Zukunft neue Verfahren für Engineeringdisziplinen wie etwa die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV), die Reparatursimulation oder die detaillierte Produktionssimulation entwickelt werden, wodurch die Anzahl dieser Methoden in den nächsten Jahren weiter zunehmen wird [HOL08].

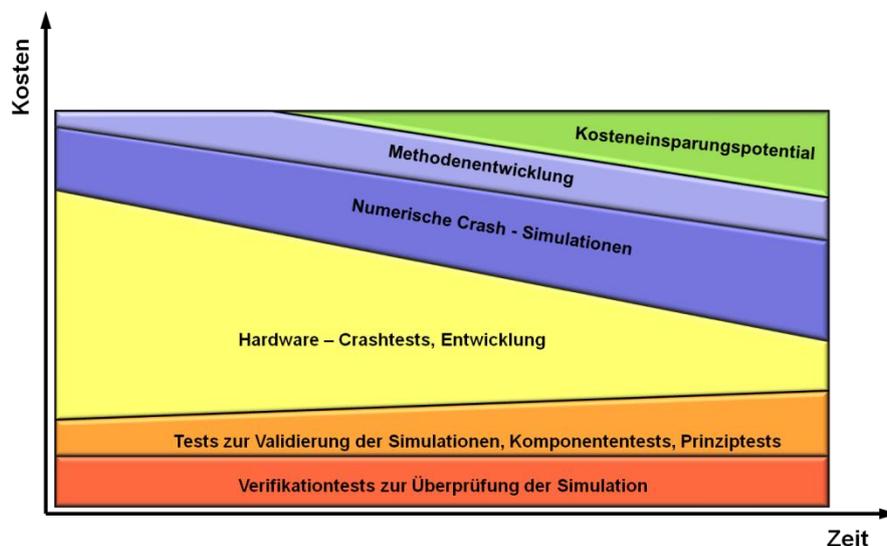


Abbildung 3.4: Änderungen der Aufwände zur Absicherung der Funktionen

Ein wesentliches Ziel ist es, Entwicklungszeiten und Entwicklungskosten zu reduzieren, indem beispielsweise teure und aufwändige Gesamtfahrzeugversuche und Prototypen eingespart und die Funktionen mithilfe der numerischen Simulation abgesichert werden. Wie in Abbildung 3.4 nach [SCH06e] dargestellt ist, wird es mittelfristig zu einer signifikanten Änderung bei der Kostenverteilung für die Entwicklungstätigkeiten sowie der Funktionsabsicherung kommen. Die Versuchskosten auf Gesamtfahrzeugebene können

durch die Reduktion teurer Prototypen gesenkt werden, parallel nimmt jedoch die Anzahl an einfachen Versuchen zu. Diese sind notwendig, um Absicherungen auf Bauteil- oder Modulebene oder aber einfache Prinzipuntersuchungen für ein besseres Systemverständnis durchzuführen.

Es werden demnach in Zukunft nicht weniger Versuche durchgeführt, sondern deutlich mehr, diese werden jedoch mit geringerem finanziellen Aufwand realisierbar sein. Einen beträchtlichen Anteil an den Gesamtkosten stellt die Absicherung der Funktionen durch numerische Simulationen dar. In diesem Zusammenhang sind auch Aufwände für die Erweiterung und Weiterentwicklung der Methoden anzuführen, wodurch in weiterer Folge neue Fragestellungen und Probleme während der Entwicklungstätigkeit gelöst bzw. beantwortet werden können.

Ein Verzicht auf physikalische Tests ist in naher Zukunft dennoch nicht denkbar. Hauptgrund dafür ist, dass man bei realen Tests Antworten auf Fragen, die man nicht gestellt hat, erhält. Bei der numerischen Simulation bekommt man hingegen ausschließlich Antworten, nach denen man auch gefragt hat. Um die Möglichkeiten der numerischen Simulation vollständig auszunutzen, muss das Fahrzeug möglichst ganzheitlich und mit prognosefähigen Simulationsmethoden abgebildet werden, wodurch schließlich auch nicht abgefragte Mechanismen erkannt werden können. Ein wesentlicher Vorteil der numerischen Simulation ist jedoch, dass mehr Fragen in Form von Messstellen und Bewertungsroutinen definiert werden können, das Potential der Auswertemöglichkeiten kann dadurch erhöht werden.

Um das Gesamtrisiko während der Entwicklung zu minimieren, wird auch in Zukunft eine nicht unbedeutende Anzahl an Gesamtfahrzeugversuchen durchgeführt werden müssen. Bei einigen Fragestellungen sind virtuelle Methoden mit enormen Aufwänden verbunden, in diesen Bereichen sind physikalische Entwicklungsmethoden vorzuziehen. Generell kann an dieser Stelle die Aussage getätigt werden, dass heute durch eine Kombination von physikalischen und numerischen Welten ein zeit- und kostenoptimierter Entwicklungs- und Absicherungsprozess in der Automobilbranche verwirklicht werden kann und dass diese Feststellung auch für die nächsten Jahre Gültigkeit haben wird.

Heutzutage sind einer durchgängigen numerischen Entwicklung aus unterschiedlichen Gründen noch Grenzen gesetzt. Die jeweiligen Simulationsmethoden können bereits einen sehr breiten Bereich der Fahrzeugentwicklung abdecken, trotzdem gibt es in einigen Einsatzgebieten noch unzulängliche Methoden, um die physikalischen Effekte und Problematiken abzubilden.

Weitere Grenzen in der numerischen Entwicklung werden durch fehlende oder nicht darstellbare Daten und Informationen gesetzt. Unterbrochene Prozessketten, beispielsweise zwischen Produktionssimulation und Bauteilentwicklung, stellen ein weiteres Problem für eine rein virtuelle Entwicklung dar.

Nichtsdestotrotz kann man insbesondere in der Automobilindustrie von einer digitalen Revolution sprechen, da mit Hilfe der neuen numerischen Methoden enorme Fortschritte im Bereich der Fahrzeugentwicklung möglich gemacht werden.

3.3.1 Integration der Simulation in den Produktentwicklungsprozess

Die numerische Simulation spielt eine immer größere Rolle im Produktentstehungsprozess, daher sind auch die in sie gesetzten Erwartungen sehr hoch. Neben der Reduktion der Entwicklungszeiten und -kosten werden damit vor allem Möglichkeiten zur Beherrschung der gestiegenen Produktkomplexität oder Konzepte zur Integration in das Gesamtfahrzeug in Verbindung gebracht. Durch eine frühzeitige Einbindung in die Entwicklungstätigkeiten kann die numerische Simulation diesen Anforderungen gerecht werden und somit bereits zu einem früheren Zeitpunkt die Produktreife deutlich erhöhen. In diesem Zusammenhang ist vor allem die abgestimmte disziplinübergreifende Entwicklung von großer Bedeutung. Die einzelnen Fachbereiche müssen auf dieselbe Datenbasis aufbauen, speziell die zu entwickelnden Funktionen mit sich gegenseitig beeinflussenden Themen und Disziplinen müssen abgestimmt werden. Eine Zunahme von ausgelagerten Entwicklungsumfängen bei externen Dienstleistern und Zulieferern führt dazu, dass sowohl der Datenfluss als auch die Integrationsarbeiten erhöht werden, diese Faktoren müssen bei der virtuellen Entwicklung entsprechend berücksichtigt werden.

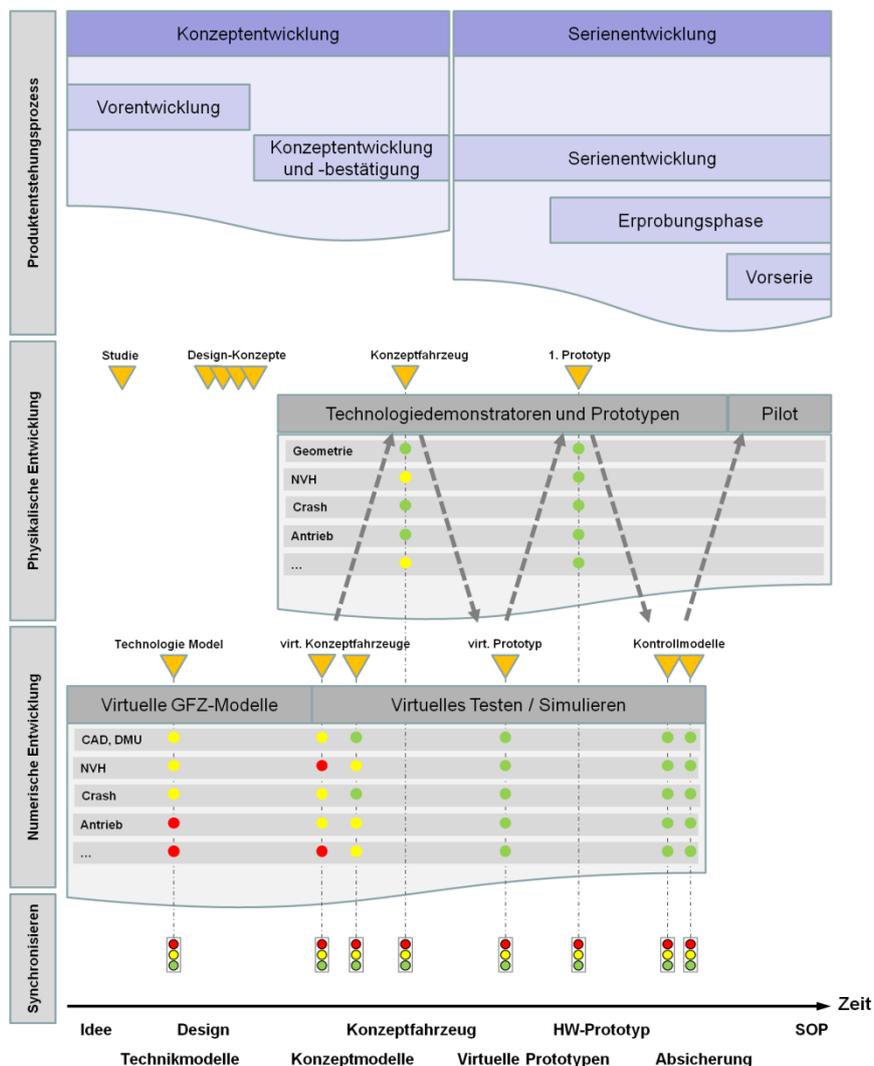


Abbildung 3.5: Integration der Simulation, Synchronisation bei Meilensteinen

In Abbildung 3.5 ist die Integration der Simulation und die Abstimmung der einzelnen Disziplinen schematisch dargestellt. Zu erkennen ist darin, dass die funktionale Abstimmung in der frühen Entwicklungsphase auf Basis numerischer Prototypen erfolgt. In der Vergangenheit wurde die numerische Entwicklung in den einzelnen Disziplinen häufig ohne eine solche übergreifende Abstimmung durchgeführt, die Synchronisierung der single-disziplinären Fahrzeugeigenschaften und die Ermittlung der dazu notwendigen Lösungsansätze erfolgten frühestens kurz vor oder während des Aufbaus der Hardwarebaustufen. Daher wurden Schwachstellen erst zu einem sehr späten Zeitpunkt entdeckt, und es mussten weitere Prototypen oder Entwicklungsschleifen eingeplant werden.

Durch die Synchronisation auf numerischer Basis kann man die Produktreife bereits zu einem viel früheren Zeitpunkt auf ein sehr hohes Niveau heben, außerdem können die Prozesse besser parallelisiert und die Gesamtentwicklungszeit reduziert werden. Um die synchrone Entwicklung sicherzustellen, sind die vollständige Nachvollziehbarkeit der aufgebauten Modelle, der Simulationen und der Resultate sowie die Gegenüberstellung mit dem Lastenheft notwendig. Basierend auf dem Zielerreichungsgrad werden nach der Bewertung entsprechende Maßnahmen abgeleitet, welche anschließend in allen betroffenen Disziplinen umzusetzen sind.

3.3.2 Virtuelle Prototypen in der Entwicklung

Für die virtuelle Entwicklung werden unterschiedliche Methoden und darauf abgestimmte virtuelle Prototypen eingesetzt. Beispielsweise befinden sich, wie Abbildung 3.6 zeigt, beim deutschen OEM Porsche insgesamt 14 digitale Prototypen im Verlauf der virtuellen Entwicklung im Einsatz. Diese virtuellen Prototypen werden bei Porsche wiederum in zwei große Bereiche unterteilt, zum einen in die physikalische Auslegung, zum anderen in die geometrische Auslegung. Der Unterschied liegt darin, dass den physikalischen Auslegungen keine Geometrieinformationen zugrunde liegen – hier sind beispielsweise Prototypen für Mehrkörpersimulationen, Regelsysteme oder andere mathematische Modelle gruppiert. Die zweite Gruppe von Prototypen basiert auf geometrischen Informationen, welche üblicherweise von den 3D-CAD-Daten abgeleitet sind.

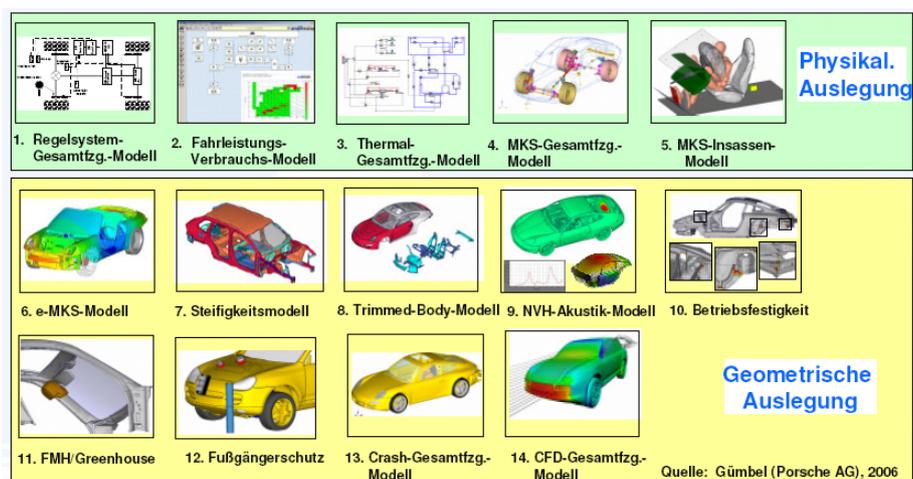


Abbildung 3.6: Einsatz digitaler Prototypen bei Porsche [SCH07d]

3.3.3 Integrierte Absicherung

In der Vergangenheit war die Simulation im Entwicklungsprozess zumeist als konstruktionsbegleitendes Werkzeug positioniert. Die Bestätigung der Funktionen erfolgte erst zu einem späten Zeitpunkt im Entwicklungsprozess, oftmals erst im Gesamtfahrzeugprototyp. Durch die konsequente Weiterentwicklung der Entwicklungsmethoden können die Lücken im Prozess geschlossen werden, wodurch eine durchgängige integrierte Absicherung erzielt werden kann. Neben der Etablierung der bestehenden Methoden und Prozesse müssen zukünftig vor allem die Interaktionen zwischen den einzelnen Disziplinen näher betrachtet werden, um eine interdisziplinäre Auslegung und Optimierung bereits in den verschiedenen Entwicklungsphasen zu ermöglichen.

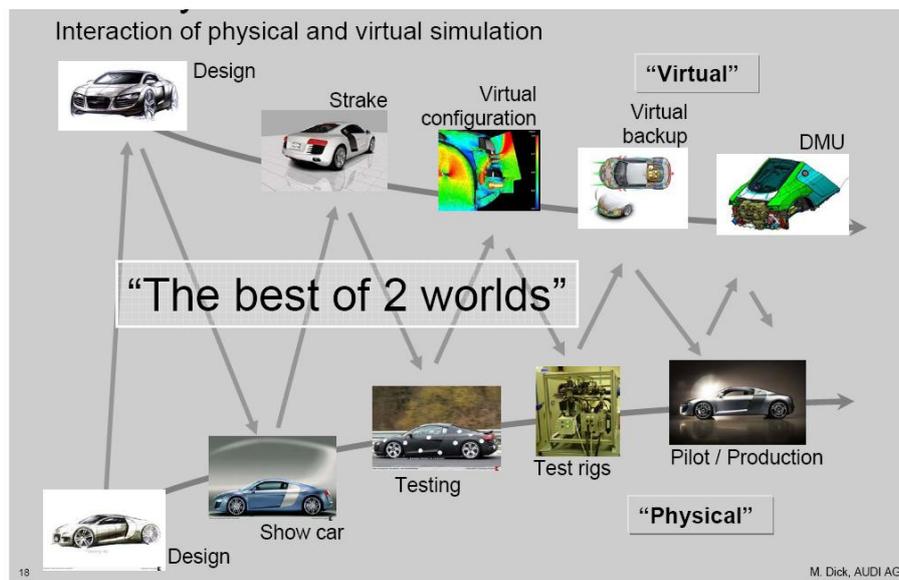


Abbildung 3.7: Integrierte Absicherung - „Das Beste aus zwei Welten“ [DIC07]

Eine 100%-ige Absicherung der Funktionen durch numerische Methoden und Modelle ist jedoch auf Grund mangelhafter oder nicht vorhandener Simulationsmethoden in naher Zukunft nicht anzustreben und somit auch nicht durchführbar. Vielmehr stehen die sinnvolle Verwendung der numerischen Methoden sowie die Kombination mit physikalischen Methoden im Vordergrund, wie es auch in Abbildung 3.4 zu erkennen ist. Hier nehmen vor allem die Dauer, die Kosten und auch die Qualität der Entwicklungsabläufe Einfluss darauf, ob die digitale oder die experimentelle Produktentwicklungsmethode zum Einsatz kommt. Wie in Abbildung 3.7 dargestellt, wird in der Praxis das Beste aus zwei Welten kombiniert und für den Entwicklungsprozess verwendet.

Die Funktionsabsicherung und auch der Abgleich zwischen realen und virtuellen Entwicklungsprozessen findet auf unterschiedlichen Ebenen statt, beginnend auf der Gesamtfahrzeugebene bis hinunter zur Bauteil- und Komponentenebene, wie sie im V-Modell des Entwicklungsprozesses in Abbildung 3.8 dargestellt sind. Diese Darstellung verdeutlicht, wie am linken Ast des V-Modells die Anforderungen an das Gesamtfahrzeug auf Anforderungen und charakteristische Größen auf Modul- und Komponentenebene heruntergebrochen werden. Auf der rechten Seite des V-Modells werden die Resultat erst auf

Komponentenebene überprüft, nach der Überprüfung der einzelnen Komponenten wird die Integration stufenweise nach oben bis hin zur vollen Komplexität auf Gesamtfahrzeugebene durchgeführt.

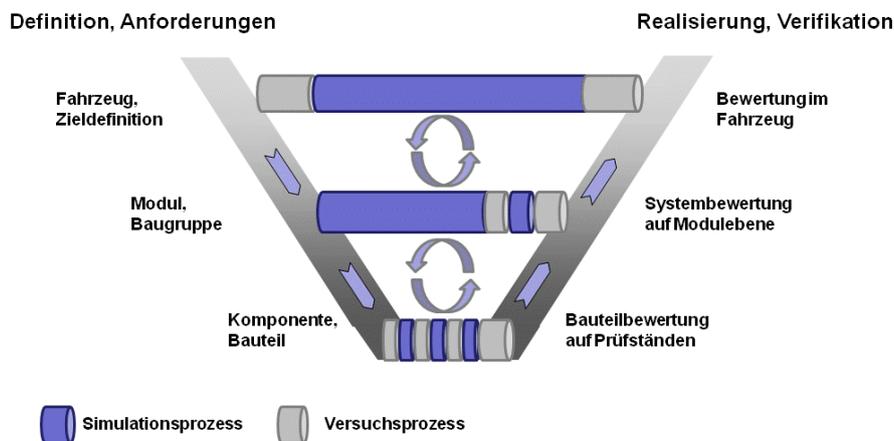


Abbildung 3.8: V-Modell im Produktentwicklungsprozess

Zusätzlich ist in Abbildung 3.8 das Zusammenwirken von numerischen und physikalischen Entwicklungsprozessen zu erkennen. Wie bereits in Abschnitt 3.3.1 kurz erläutert, haben in der Vergangenheit Verifikations- und Integrationschleifen sehr häufig nur auf Gesamtfahrzeugebene stattgefunden, da keine geeigneten Entwicklungsmethoden zur Verfügung standen. Verifikationen konnten erst zu einem sehr späten Zeitpunkt und oft nur mit enormem Ressourceneinsatz durchgeführt werden. Durch den vermehrten Einsatz von prognosefähigen Simulationen und vor allem durch den gestiegenen Zeit- und Kostendruck während der Entwicklung wird diese Verifikation jedoch auch zunehmend auf die Komponenten- und Modulebene verlagert. Mithilfe der numerischen Methoden kann eine durchgängige Prozesskette auf allen Entwicklungsebenen realisiert werden, hierfür stehen neben den rein physikalischen und numerischen Methoden auch hybride Absicherungsmethoden¹ zur Verfügung. Parallel zur Absicherung auf Komponenten- und Modulebene kann bereits die Überprüfung und Integration auf Gesamtfahrzeugebene virtuell bzw. mit hybriden Absicherungsmethoden durchgeführt und die Erkenntnisse laufend bei der Verbesserung und Optimierung auf Komponentenebene berücksichtigt werden. Die Simulation dient in diesem Fall als Integrator für die Produktentwicklung.

¹ Als hybride Absicherungsmethoden werden hier Hardware in the Loop (HiL), Model in the Loop (MiL) und Software in the Loop (SiL) bezeichnet. Dies sind vor allem Methoden zum Testen und Absichern von eingebetteten Systemen, um bereits vorzeitig die Funktion im Gesamtsystem zu simulieren und zu überprüfen. Das eingebettete System, welches als Software, als Model oder auch als Hardware vorhanden sein kann, wird über definierte Ein- und Ausgänge in das Gesamtsystem integriert.

3.4 Herausforderungen im virtuellen Entwicklungsprozess

3.4.1 Weiterentwicklung der CAx Prozesse und Methoden

Auf Grund der zunehmenden Komplexität sowie der unternehmensinternen und vor allem unternehmensübergreifenden Fragestellungen sind bei der Fahrzeugentwicklung die Themengebiete virtuellen Methoden, Integration und übergreifenden Zusammenarbeit von entscheidender Bedeutung. Im Produktentwicklungsprozess wird der Stellenwert der einzelnen CAE-Disziplinen verstärkt in den Vordergrund treten.

Um den Anforderungen gerecht zu werden, müssen die Strategien für den Einsatz der virtuellen Methoden überarbeitet werden. Der CAx Einsatz muss dabei erweitert werden, einerseits in Richtung des Entwicklungsprozesses, indem neue Methoden erarbeitet und dem Entwicklungsteam zur Verfügung gestellt werden, andererseits als Integrationsplattform für die interne disziplinübergreifende Vernetzung sowie für die Einbindung von Partnern. Dies bedeutet, dass zu jedem Zeitpunkt im Entwicklungsablauf und an jedem Ort die notwendigen Methoden sowie aktuellen Daten im vollen bzw. erforderlichen Umfang zur Verfügung stehen. Zusätzlich zu den numerischen Lösungen für die einzelnen Disziplinen gehören somit die Kommunikation zwischen den einzelnen CAE-Methoden und das interdisziplinäre und firmenübergreifende Informations- und Datenmanagement zu den bedeutsamsten Arbeitspaketen der nächsten Jahre. In Abbildung 3.9 ist die CAx-Strategie für zukünftige Produktentstehungsprozesse zusammengefasst dargestellt, die Rolle der CAE Methoden als effektives Werkzeug in der Entwicklung wird in der Zukunft gestärkt.

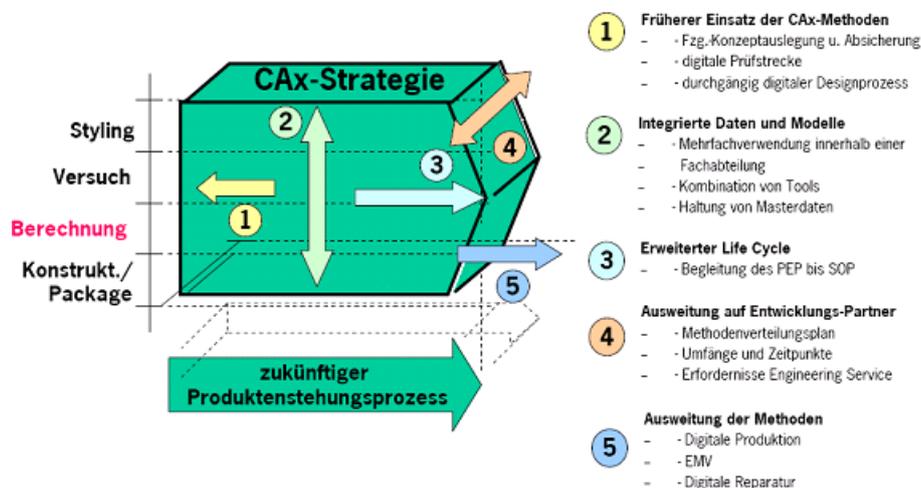


Abbildung 3.9: Erweiterung des CAx-Einsatzes [SCH06a]

Des Weiteren besteht im Bereich der Komplexität und der Integration von CAE-Tools Handlungsbedarf. Heutzutage sind für die Anwendungen meist Spezialisten notwendig, welche die unterschiedlichen Simulationsdisziplinen beherrschen und somit aussagekräftige Resultate erarbeiten können. Das Ziel ist jedoch, dass auch Nicht-CAE Experten in den unterschiedlichen Entwicklungsphasen mit numerischen Methoden verlässliche Simulationsresultate erzeugen können. Dabei ist darauf zu achten, dass nicht nur einfache Benutzeroberflächen in komplexe Tools eingebunden werden, sondern auch die gesamten

Werkzeuge für eine einfache Bedienung und für die Integration in den Entwicklungsablauf ausgelegt sein müssen.

3.4.2 Herausforderungen durch mechatronische Systeme

In modernen Fahrzeugen nimmt der Anteil der Elektrik und Elektronik stark zu. Immer häufiger kommen Sensoren und Aktuatoren zum Einsatz, um die Vielzahl von Kundenfunktionen im Fahrzeug abzudecken. Beispiele hierfür sind Fahrwerkregelsysteme, Fahrerassistenzsysteme oder Komfortsysteme.

Zwei wesentliche Aspekte des mechatronischen Fahrzeuges müssen dabei betrachtet werden, nämlich der Energiefluss sowie der Informationsfluss zwischen Aktuatoren und Sensoren. Ein umfassendes Modell des mechatronischen Fahrzeugs deckt alle Energieflüsse innerhalb des Gesamtsystems ab. Mechanische, thermodynamische und elektrische Energieflüsse werden dazu im mechatronischen Simulationsmodell betrachtet und analysiert. Von ebenso hoher Bedeutung ist es, die Konsistenz der Verbindung zwischen Software und Mechanik abzubilden und zu berücksichtigen. Zu diesem Bereich zählen die Funktionsverteilung auf ECUs, die Buslast und Buskonfiguration, aber auch die Ansteuerung von Sensoren und Aktuatoren. Vor allem bei sicherheitskritischen Systemen sind dies wesentliche Faktoren.

Als Basis für eine gesamtheitliche Entwicklung wird das Gesamtsystem in unterschiedliche Sub-Systeme unterteilt, welche mit spezifischen Simulationsprogrammen abgebildet und simuliert werden. Um eine Interaktion und ein Zusammenwirken der einzelnen Sub-Systeme darzustellen, müssen diese miteinander gekoppelt werden. Dabei können einerseits Module, andererseits das Gesamtfahrzeug betrachtet werden. Die Kopplung unterschiedlicher Sub-Systeme (d.h. deren Modelle, welche in spezifischen SW-Werkzeugen abgebildet sind) wird durch den Austausch der einzelnen Parameter zwischen den Software-Werkzeugen erreicht. Die kontrollierte Interaktion zwischen den Sub-Systemen wird durch einen zeitabhängigen Datenaustausch, die Synchronisation wird durch eine Co-Simulationsumgebung realisiert.

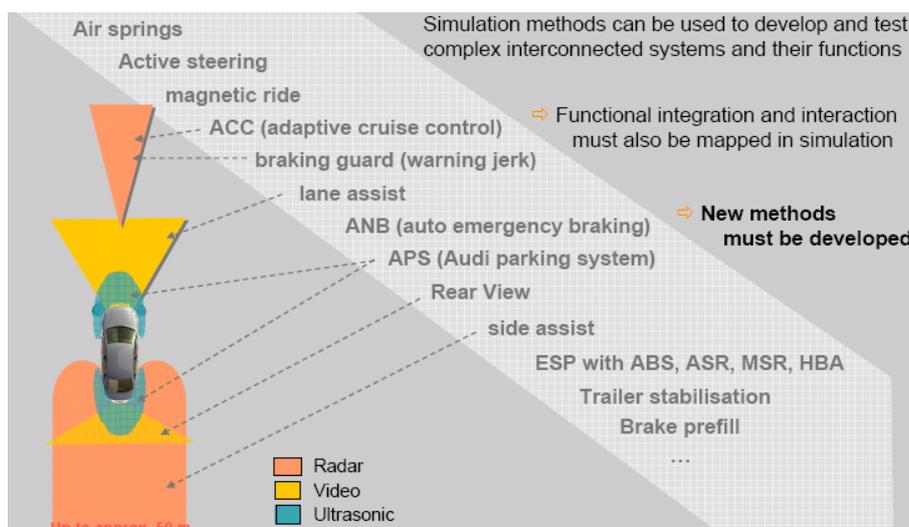


Abbildung 3.10: Beispiele geregelter Mechatroniksysteme [DIC07]

Speziell das Themengebiet integrierte Fahrzeugsicherheit erfordert eine permanente Recherche nach neuen Lösungen und Wegen zur Simulation und Entwicklung ebendieser Systeme. Dabei müssen die Schwerpunkte einerseits auf die Sensorik, andererseits auf die Aktuatorik bzw. Regelung gelegt werden. In Abbildung 3.10 ist ein Überblick über mechatronische Systeme im Bereich der Fahrzeugsicherheit und Fahrzeugdynamik dargestellt [DIC07]. Zu den Herausforderungen dabei zählt die Entwicklung der einzelnen Systeme, noch komplexer ist jedoch jene Thematik, welche durch die Interaktionen, das Zusammenwirken und die gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Systeme entsteht. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, müssen in den nächsten Jahren neue Entwicklungsmethoden und Prozesse erarbeitet werden.

Zu den Herausforderungen zählen dabei eine Reihe relevanter Faktoren. Dies sind zum einen prognosefähige Simulationsmethoden für die einzelnen Bausteine der gesamten Simulationslandschaft, zum anderen die sehr oft erforderliche Echtzeitfähigkeit einzelner Module, um eine realitätsnahe Entwicklung sicherzustellen. Einen dritten wesentlichen Faktor stellt die Entwicklungsumgebung und -methodik für solche komplexen Systeme dar, welche eine übergreifende Darstellung der Systeme erst ermöglichen kann.

3.4.3 Verknüpfung von Produktentwicklung und Produktentstehung

Virtuelle Entwicklungsmethoden werden in den unterschiedlichen Stadien des Produktlebenszyklus eingesetzt. Prinzipiell kann man zwei große Bereiche unterscheiden – die virtuelle Produktentwicklung und die digitale Fabrik. Beim virtuellen Produkt stehen die technischen Entwicklungen mit den einzelnen technischen Funktionen sowie das Design und die geometrischen Absicherungen im Vordergrund. Bei der digitalen Fabrik werden die produktionsrelevanten Anforderungen und die Produktentstehung betrachtet. Dazu werden beispielsweise komplette Fertigungsanlagen digital aufgebaut und analysiert. Zu den großen Herausforderungen zählt nach [HOL08] vor allem die Kombination dieser beiden Bereiche zu einer durchgängigen und gesamtheitlichen Prozesskette.

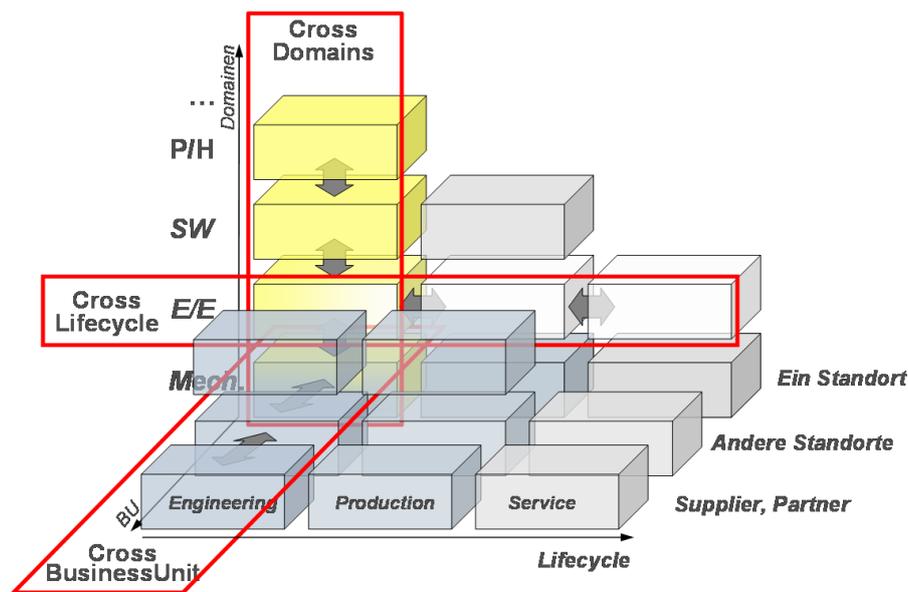
Die wichtigsten Aspekte stellen die Schnittstellen zwischen den beiden Bereichen und die dabei auszutauschenden Daten und Informationen dar. So werden für eine durchgängige Entwicklungskette auch die Produkteigenschaften, welche der Produktionsprozess beeinflusst, bei den funktionalen Auslegungen berücksichtigt. Ein Beispiel in dieser Kategorie ist das Thema Forming-to-Crash. Hier werden die durch Umformprozesse veränderten Produkteigenschaften in der Crashsimulation berücksichtigt. Bei der Crashsimulation werden die Ausdünnung des Blechs, die Dehnungen oder auch die Eigenspannungen, welche durch den Umformvorgang initiiert werden, berücksichtigt [LIN06]. Speziell bei warmumgeformten Bauteilen sind zusätzlich noch geänderte Materialeigenschaften durch den Einfluss der Wärme möglich, die wiederum in der Bauteilsimulation inkludiert werden müssen. Die für die detaillierte Crashsimulation inkl. Fertigungseffekte notwendigen Daten sind in der für die Strukturauslegung relevanten Phase des Entwicklungsprozesses noch nicht vorhanden, diese werden erst zu einem späteren Zeitpunkt während der Fertigungsplanung zur Verfügung gestellt.

Heutzutage sind die für die Darstellung und Umsetzung der Simulationen erforderlichen Technologien vorhanden, Schwierigkeiten treten jedoch daher auf, dass dafür komplexe Prozessketten erforderlich sind, insbesondere die Integration der übergreifenden Methode in den standardmäßigen Entwicklungsablauf ist mit Problemen verbunden. Dafür müssen komplexe Abläufe definiert werden, und zusätzlich müssen die geeigneten Systeme für eine übergreifende Zusammenarbeit zur Verfügung stehen.

4 Prozesse, Methoden und Systeme für ein integriertes Engineering

Der kosten- und zeitoptimierte Einsatz der unterschiedlichsten CAx Werkzeuge erfordert eine gänzlich neue Entwicklungsmethodik sowie dafür notwendige Entwicklungsumgebungen. Vor allem neue Methoden wie beispielsweise die Co-Simulation, die disziplinübergreifende Entwicklung und Optimierung, die Kombination von physikalischen und virtuellen Methoden oder die Automatisierung von Entwicklungsabläufen müssen berücksichtigt werden. Bei einer integrativen Entwicklungsumgebung müssen die einzelnen Systeme und Methoden aufeinander abgestimmt sein, sowie in einen durchgängigen Prozess eingebunden werden, um eine optimierte virtuelle Produktentwicklung sicher zu stellen.

In Abbildung 4.1 sind wesentliche Aspekte eines integrierten Engineeringansatzes dargestellt, dies sind die Integration entlang des Entwicklungsprozesses, die disziplinübergreifende Integration, sowie die unternehmensübergreifende Integration.



Source: Project iP² (VPE, ViF, IMI, ILC ProStep, simotion)

Abbildung 4.1: Aspekte zum integrierten Engineering

Bei der Integration entlang des Entwicklungsprozesses gilt es, die Informationen und Methoden entlang des Prozesses durchgängig zur Verfügung zu stellen. Für die Realisierung eines integrierten Engineering ist nicht zwingend ein übergreifendes Werkzeug oder System notwendig, vielmehr gilt es, die optimalen Methoden in der jeweiligen Phase einzusetzen, diese zu kombinieren, und dadurch nahtlose und informationsverlustfreie Übergänge zu realisieren. Dabei müssen bei jedem Zeitpunkt der Entwicklung die relevante Anzahl an Disziplinen berücksichtigt werden, dies stellt somit die zweite Integrationsachse dar. Das Ziel ist immer die Abbildung des Gesamtfahrzeuges oder des betrachteten Gesamtsystems, welches definierte Anforderungen und Funktionen erfüllen muss. Es gilt nicht nur die einzelnen technischen Disziplinen zu berücksichtigen, sondern vor allem auch die

Interaktionen zwischen diesen einzubeziehen. Die dritte Achse der Integration stellt die Verteilung der Entwicklungstätigkeiten über organisatorische Grenzen oder Standorte hinweg dar. Alle beteiligten Entwicklungspartner müssen dieselben Daten und Informationen für ihre Aktivitäten zur Verfügung haben, einerseits damit diese ihre Beiträge zur Entwicklung leisten zu können, andererseits um sicherzustellen, dass diese einfach in das Gesamtsystem zu integrieren sind.

4.1 Der Weg zum integrierten Engineering

4.1.1 Entwicklung des CAE Einsatzes im Entwicklungsprozess

Der Einsatz von CAE hat sich in den letzten Jahren enorm entwickelt, die Anwendungen veränderten sich von einfachen Methoden zum Nachrechnen einzelner Fragestellungen, hin zu prognosesicheren Berechnungswerkzeugen, die mittlerweile ein fester Bestandteil in der Fahrzeugentwicklung geworden sind. Die Anwendungstiefe und auch die Anwendungsbreite der unterschiedlichen numerischen Methoden im Rahmen der Entwicklungstätigkeiten haben sich stark vergrößert. Die steigende Produktkomplexität erfordert eine zunehmende Verknüpfung der einzelnen Methoden hin zu komplexen Prozessketten, wie es auch in Abbildung 4.2 sehr gut erkennbar ist.

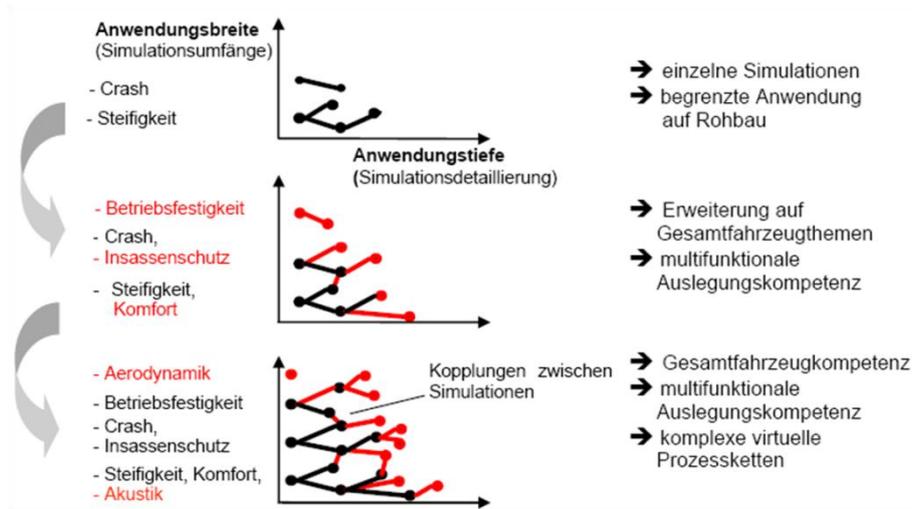


Abbildung 4.2: Entwicklung des CAE-Einsatzes im Entwicklungsprozess [SCH07c]

Die dadurch historisch gewachsenen Systeme für die virtuelle Entwicklung können, bedingt durch den sehr großen Aufwand, zumeist nur sehr schwer geändert und hinsichtlich neuer Anforderungen angepasst werden. Dies betrifft vor allem das Verbinden dieser einzelnen Bausteine und das Erweitern bezüglich der auszutauschenden Daten und Informationen, wodurch die Integration in einen zentralen Entwicklungsablauf ermöglicht werden könnte.

In Abbildung 4.3 ist ein Beispiel für eine typische Entwicklungsumgebung dargestellt. Dabei sind drei wesentliche Bereiche dargestellt: das lokale und das zentrale Datenmanagement sowie der Prozessablauf, die heutzutage für eine mehr oder weniger ausgeprägt Standardisierung während der Fahrzeugentwicklung sorgen. Bei den numerischen Methoden

lässt sich der Prozessablauf in die typischen Schritte Pre-Processing, Solving und Post-Processing unterteilen. Dabei sind die Systeme zumeist so aufgebaut, dass die Verwaltung der Geometriedaten mithilfe eines Produktdatenmanagements (PDM) zentral erfolgt, ebenso wie die zentral gesteuerte Verwendung der Rechnerressourcen. Die Datenmanipulation für die virtuelle Entwicklung, sowie das Generieren der einzelnen Lastfälle wird zumeist lokal bei den einzelnen Arbeitsplätzen der Entwicklungsingenieure durchgeführt, ebenso die Auswertung der Simulationsergebnisse.

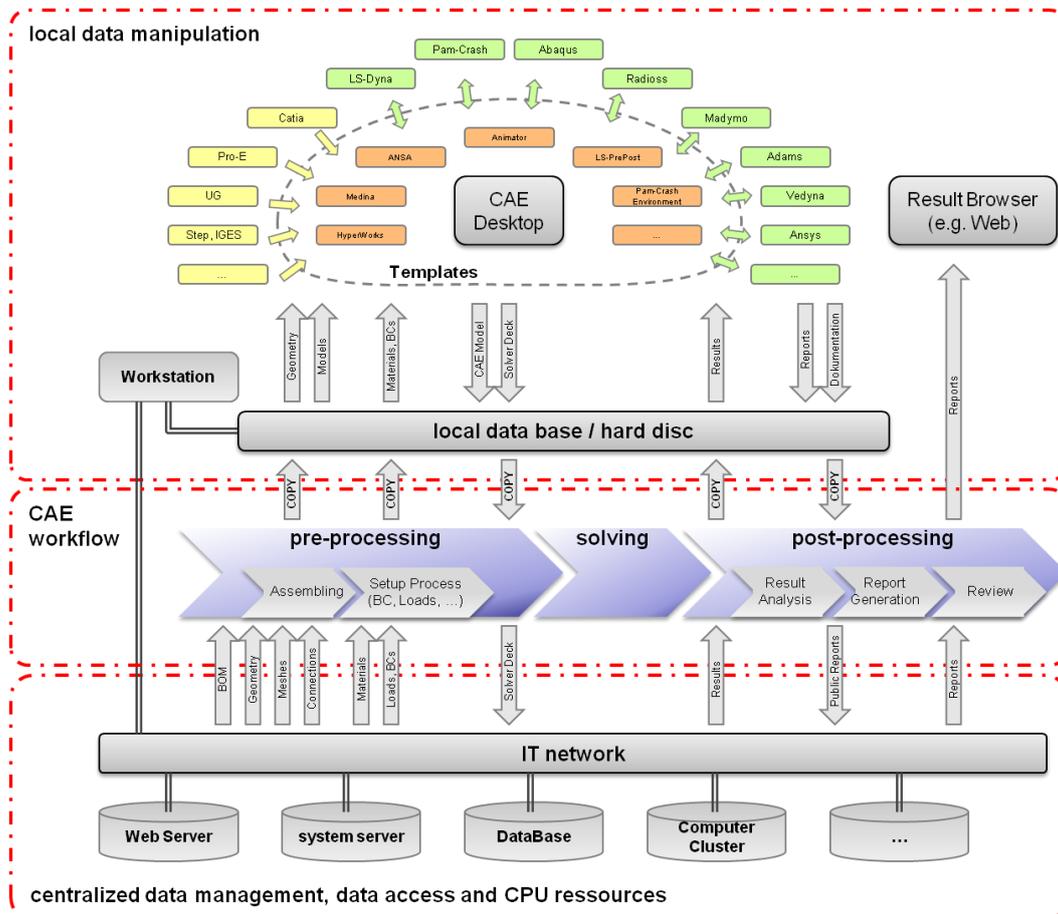


Abbildung 4.3: Beispiel einer gewachsenen Entwicklungsumgebung

Für den Ingenieur steht der CAE Desktop, welche als Pre- und Post-Processingumgebung für die unterschiedlichen CAE-Anwendungen dient, im Zentrum der Entwicklungstätigkeiten. Typischerweise werden für die einzelnen CAE Disziplinen unterschiedliche Tools und auch Arbeitsabläufe eingesetzt. In dieser Phase stehen der Import und der Export der relevanten Daten, sowie die Manipulation der Daten im Rahmen der Produktentwicklung im Vordergrund. Nachteil der gezeigten Lösung ist unter anderem, dass Schnittstellen zu den einzelnen Entwicklungswerkzeugen notwendig sind, und vor allem die Entwicklungsingenieure eine Vielzahl an diesen unterschiedlichen Werkzeugen bedienen müssen. Wie in Abbildung 4.3 durch die Datenflüsse schematisch dargestellt ist, werden die hier benötigten Daten sehr häufig von übergeordneten Datenmanagementsystemen oder Laufwerken auf lokalen Festplatten zwischengespeichert, wodurch sich eine verteilte Datenstruktur im gesamten Firmennetzwerk ergibt. Der Modellaufbau und die Assemblierung erfolgt in

zahlreichen manuell durchzuführenden Einzelschritten – Importieren der einzelnen Files, Zuordnung der technischen Eigenschaften, Setzen der Verbindungstechniken, Definition der Kontakte, Laden der Solvertemplates oder der spezifischen Lastfallfiles.

Die Automatisierung der Entwicklungsabläufe tritt immer mehr in den Vordergrund, sich wiederholende Tätigkeiten werden häufig mit Templates durchgeführt, wodurch einerseits eine Beschleunigung des Ablaufes, andererseits durch die Standardisierung eine höhere Qualität erzielt werden kann. In der Automatisierung werden CAD-Geometrieaufbereitung, Vernetzung und Modellaufbau inklusive Stabilitätsuntersuchung mithilfe von Templates durchgeführt, die nur mehr wenig manuelle Nacharbeit erfordern. Der gleichzeitige Benefit ist die Unabhängigkeit vom Knowhow der jeweiligen erstellenden Person. Die Speicherung der Daten sowie der Aufruf der Templates erfolgt jedoch lokal auf den jeweiligen Workstations, wodurch diese zumeist nur einem Entwicklungsingenieur oder einem Team zur Verfügung stehen.

Die Berechnungen werden auf Großrechnern bzw. Rechenclustern durchgeführt, wozu die notwendigen Solverfiles in ein übergeordnetes Lastverteilungssystem eingespielt werden. Die Auswertungen der Rechenergebnisse entstehen mit dem lokalen CAE Desktop, die wesentlichen Endergebnisse werden in ein übergeordnetes Datenmanagementsystem importiert und für die weiteren Entwicklungstätigkeiten freigegeben und dokumentiert. Solche Systeme, die ein systemunterstütztes Verwalten der Solverfiles sowie der Resultate ermöglichen, sind in der Automobilindustrie bereits im Einsatz, wie es exemplarisch in einer Umsetzung mit dem System CAE-Bench von MSC in [REI07] dargestellt ist.

Schwierigkeiten ergeben sich vor allem bei der durchgängigen Nachvollziehbarkeit der Entwicklungstätigkeiten, Datenverfügbarkeit bei Urlaub oder Krankenstand der Ingenieure oder auch eine unnötigen Systembelastungen durch Mehrfachspeicherung der Daten. Hinzu kommt, dass im Rahmen der Entwicklungstätigkeiten unterschiedliche Varianten notwendig sind, welche sehr häufig lediglich lokal gespeichert werden und dem restlichen Team somit nicht zur Verfügung stehen. Weitere Probleme sind, dass durch die separate Datenhaltung und auch durch die getrennten Entwicklungsprozesse neue Methoden wie disziplinübergreifende Simulation oder multidisziplinäre Optimierung nicht oder nur mit erheblichem Aufwand angewandt werden können. Desweiteren sind Lösungen wie sie in [REI07] dargestellt sind, vorwiegend für das Post-Processing im Einsatz, da hier das Verwalten von Daten im Vordergrund steht.

Der Bereich des Pre-Processings ist aufgrund der sehr komplexen Produkt- und Prozessstrukturen mit diesen Werkzeugen nicht abzudecken, vor allem da ständig neue Aufgaben und Fragestellungen an die Entwicklungsteams herangetragen werden. Außerdem spielt in diesem Bereich die Erfahrung und das Wissen der Entwicklungsingenieure eine wesentliche Rolle. Hier sind neue systemunterstützte Lösungen, die ein kombiniertes Prozess- und Datenmanagement beinhalten, gefordert.

4.1.2 Aufbau einer integrativen Entwicklungsplattform

Für die Realisierung der in den vorangegangenen Abschnitten skizzierten Herausforderungen werden neue Technologien, Methoden und Werkzeuge benötigt, die einzelne Bausteine in einem übergeordneten und integrierten Systemansatz vereinen.

Die Möglichkeit der übergreifenden Zusammenarbeit stellt dabei eine der wesentlichen Merkmale einer integrativen Plattform dar. In Abbildung 4.4 ist eine schematisch eine integrative Entwicklungsplattform mit drei großen Bereichen dargestellt. Das wesentliche Element der gesamten Entwicklungsumgebung, die *Engineering Platform* steht dabei im Zentrum. Das *User Interface* stellt die Schnittstelle zum Benutzer dar, und dient als Steuereinheit für die Entwicklungstätigkeiten. Die Basis der Entwicklungsumgebung bildet die *PLM Solution*, die die zentrale Verwaltung sämtlicher Daten und Informationen für die Entwicklung sicherstellt.

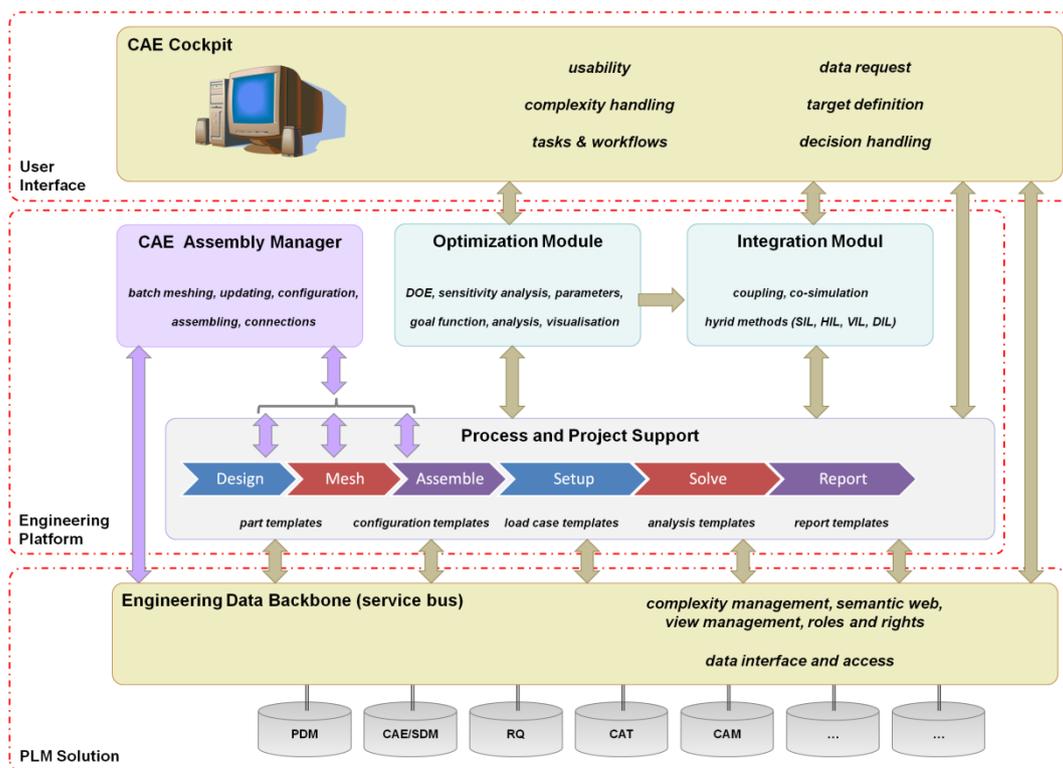


Abbildung 4.4: Aufbau einer integrativen Entwicklungsumgebung

Für die Entwicklungstätigkeiten ist das wichtigste Element das *CAE-Cockpit* als User-Interface für den Ingenieur. Im Gegensatz zu einer singulären Lösung werden hier keine lokal gespeicherten Daten verwendet, keine einzelnen Bauteile importiert oder bearbeitet, und nur einige Datenmanipulationsschritte manuell durchgeführt. Der Zugriff auf notwendige Daten erfolgt über in die *Engineering Platform* integrierte Verwaltungs- und Managementmodule, die die Daten für die Entwicklungstätigkeiten zur Verfügung stellen und auch unterschiedliche Manipulationsschritte ermöglichen. Diese Module sind so ausgelegt, dass einzelne Aufgaben und Prozesse systematisiert und automatisiert durchlaufen werden können. Mit Templates, die für jedes spezifische Projekt und jede Aufgabe entsprechend

definiert werden, können die Entwicklungsaufgaben voll- oder teilautomatisiert mit entsprechenden Auswahl- und Manipulationsmöglichkeiten des Users erfolgen.

Die wesentlichen Module der *Engineering Platform* sind:

- ein Modul für den Modellaufbau (*CAE Assembly Manager*),
- ein Supportmodul (*Process and Project Support*), welches Entwicklungstätigkeiten bei den einzelnen Lastfällen organisiert,
- ein Modul, das die singuläre und auch multidisziplinäre Optimierung im Entwicklungsprozess unterstützt (*Optimization Modul*), sowie
- ein Modul für die Integration (*Integration Modul*), wodurch die schrittweise Absicherung und Integration der einzelnen Bauteile bis hin zum Gesamtfahrzeug durch entsprechende Entwicklungsmethoden unterstützt wird.

Ein übergeordnetes Datenmanagement ist ebenfalls in der Entwicklungsumgebung integriert, dort werden alle für das Projekt bzw. die Simulationsaufgabe notwendige Informationen und Daten verwaltet. Der *Engineering Data Backbone* greift dabei als wesentliches Modul des Datenmanagements auf ein Netzwerk unterschiedlicher Daten-Management-Systeme (PDM¹, SDM², CAT³, RQM⁴,...) zu, dies erfolgt gezielt zu den einzelnen Prozessschritten. Zusätzlich werden im *Engineering Data Backbone* Methoden zur Beherrschung der Komplexität im Produktentwicklungsprozess zur Verfügung gestellt. Dies beinhaltet beispielsweise das Verwalten intelligenter Verknüpfung, wodurch Abhängigkeiten zwischen einzelnen Disziplinen, Bauteilen oder auch Prozessen aufgezeigt, sowie in weiterer Folge gewonnenen Erfahrungen für Folgeprojekte dokumentiert werden können. Dadurch kann ein wichtiger Beitrag für ein wissensbasiertes Engineering geliefert werden.

Der Aufbau der einzelnen Simulationsmodelle für die Entwicklungstätigkeiten wird durch den *CAE Assembly Manager* organisiert. Dafür notwendig sind aktuelle Geometrieinformationen sowie die dazugehörigen Netze, ebenso wie Informationen zur Struktur des Gesamtmodells und der Verbindungen zwischen den einzelnen Bauteilen. Die Informationen, wie beispielsweise Stücklisten, Daten zu den Verbindungstechniken, Geometrieinformationen aus einem PDMSystem oder bereits vorhandene vernetzte Bauteile werden aus den unterschiedlichen Datenmanagementlösungen gesammelt. Sollten für Bauteile Netze fehlen, werden diese durch ein vom *CAE Assembly Manager* gesteuerten Batchmesher erzeugt und in den Prozess eingebunden. Als Resultat dieses Moduls werden fertige Assemblies im Datenmanagement gespeichert und dem Entwicklungsingenieur für die weiteren Aktivitäten zur Verfügung gestellt.

Das *Process and Project Supportmodul* unterstützt den Entwicklungsingenieur während der einzelnen Phasen des Entwicklungsprozesses. Dies beginnt bei der Definition bzw. dem Aufsetzen der Lastfälle, wobei hier die erstellten CAE-Assemblies und notwendige Standarddaten wie Barrieren oder Impaktoren die Basis bilden. In diesem Schritt werden

¹ PDM: Produktdatenmanagement

² SDM: Simulationsdatenmanagement

³ CAT: Computer Aided Testing

⁴ RQM: Requirements Management

auch die Randbedingungen für die Simulation gesetzt, welche in einer Lastfallbibliothek abgerufen werden. Notwendige Kriterien und Instrumente für die Auswertung werden in die Berechnungsfiles inkludiert. Die entstandenen Solverdaten werden im Datenmanagement gespeichert, gemeinsam mit einem Lastverteilungssystem wird das Solving der einzelnen Simulationen durchgeführt. Die relevanten Resultate werden im Datenmanagement importiert und parallel einer lastfallabhängigen Auswertung unterzogen. Die Standardreporte, welche vor allem der Bewertung und Dokumentation der Entwicklungstätigkeiten dienen, werden erzeugt, sämtliche relevante Informationen im Datenmanagementsystem gespeichert und den Abteilungen zur Verfügung gestellt. Durch eine Entwicklungsumgebung mit Zugriff auf ein integriertes Daten- und Prozessmanagement können die Anzahl der manuell durchzuführenden Prozesse reduziert und die Arbeitsmethoden durch übergeordnete Prozesse gesteuert werden. Außerdem können die nicht kreativen Teile der Entwicklungstätigkeiten verringert werden, der Ingenieur kann sich verstärkt der Problemlösung widmen.

Das *Integration Modul* beinhaltet disziplinübergreifende Entwicklungs- und Absicherungsmethoden. Dabei gilt es einerseits geeignete Methoden zur Verbindung der einzelnen Disziplinen zur Verfügung zu stellen, andererseits schrittweise Hardware in die Entwicklungsabläufe einzubinden. Durch Kopplung oder Co-Simulation können die unterschiedlichen technischen Disziplinen miteinander verbunden werden, hierfür können verschiedene methodische Ansätze gewählt werden, wie sie beispielsweise in Abschnitt 4.4 erläutert sind. Bei der Integration von Hardware müssen echtzeitfähige Integrationsmethoden eingesetzt werden, um die vollständigen Funktionen unter realen Bedingungen zu testen. Notwendig sind diese Methoden vor allem bei Anwendungen, die mithilfe numerischer Methoden nicht oder nur unzureichend abgebildet werden können, aber auch bei der modulweisen Absicherung von Elektrik- und Elektronikkomponenten und Systemen.

Die Entwicklung der technischen Produkte kann mithilfe von unterschiedlichen Optimierungsmethoden unterstützt werden. Entscheidend dabei sind mehrere Faktoren: zum einen ist dies die Optimierung des Produkts, zum anderen die Bewertung der Robustheit und Zuverlässigkeit der technischen Lösung. Bei der Optimierung werden singuläre aber auch multidisziplinäre Methoden zur übergreifenden Entwicklung und Verbesserung eingesetzt. Bei der Robustheitsbewertung gilt es, das technische Produkt hinsichtlich einzelner möglicherweise unsicherer Parameter abzusichern, und somit eine Fehlentwicklung oder eine Lösung mit hohem technischem Risiko zu vermeiden. Herausforderungen sind einerseits bei der Definition geeigneter Zielfunktionen, der Bestimmung der Optimierungsparameter oder auch bei den Algorithmen zu finden. Außerdem müssen geeignete Methoden und Prozesse für die Umsetzung der multidisziplinären Optimierung eingesetzt werden, wie es auch in Abschnitt 4.5 dargestellt wird.

Die Entwicklung der technischen Produkte kann durch eine integrative Entwicklungsumgebung entscheidend beschleunigt und auch hinsichtlich der Qualität und Vollständigkeit der relevanten Informationen deutlich verbessert werden. Ein durchgängiges Simulationsdatenmanagement ermöglicht eine stabilere Entwicklung der Produkte, da sich Urlaube, Krankenstände oder auch das Ausscheiden einzelner Mitarbeiter nicht so entscheidend auf die Produktentwicklung auswirkt. Die lückenlose Dokumentation bzw. Triggerung der Daten

und Prozesse ermöglicht in Zukunft auch den Einsatz innovativer Technologien wie Wissensmanagement oder systemunterstütztes Changemanagement.

4.1.3 Herausforderung an eine integrierte Entwicklungsumgebung

Bei der Umsetzung einer integrativen Entwicklungsumgebung müssen eine Vielzahl an Aspekten berücksichtigt werden, die mit entsprechenden Herausforderungen einhergehen.

Datenverwaltung sowie Datenkonsistenz zwischen CAD und CAE

Zu jedem Zeitpunkt im Entwicklungsablauf bilden eine vollständige und konsistente Datenbasis und der Einsatz von prognosefähigen Simulationsmethoden für die einzelnen Berechnungsdisziplinen die Grundlage für die unterschiedlichen Entwicklungsaufgaben. Speziell in der Serienentwicklung müssen die virtuellen Prototypen auf derselben Geometrie bzw. CAD-Datenbasis aufbauen, um den Anforderungen der späten Entwicklungsphasen und einer stimmigen Fahrzeugentwicklung und Bewertung gerecht zu werden. Hier sind automatisierte Abläufe beim Modellaufbau, vom CAD bis zum rechenfähigen Modell, ein entscheidender Vorteil gegenüber manuellen Teilschritten, um die Konsistenz der Daten sicherzustellen und auftretende Änderungen zu verfolgen.

Schwierigkeiten treten vor allem bei Veränderungen der Geometrie am FE-Netz auf, in diesem Fall muss mit geeigneten Prozessabläufen der Informationsfluss zum CAD sichergestellt werden, um eine Integration entlang des Entwicklungsprozesses zu erhalten. Abhilfe schaffen hier beispielsweise parametrisierte CAD-Methoden.

Einen weiteren wesentlichen Punkt stellt der Datenaustausch zwischen Unternehmen dar, beispielsweise wenn Dienstleister in die Entwicklungsabläufe eingebunden sind. In diesem Fall muss durch eine klar definierte Datenstruktur und geeignete numerische Algorithmen der Datenaustausch zwischen den am Entwicklungsprozess beteiligten Partnern umgesetzt werden. Basis für diesen Datenaustausch können Referenzdatenmodelle sein, wie sie beispielsweise in [KRA08] beschrieben sind, wo ein XML-basierendes Datenmodell zur Beschreibung der geometrischen und funktionalen Eigenschaften eingesetzt wird.

Die Verwaltung der Geometrieinformationen bildet jedoch nur einen wesentlichen Block beim Datenmanagement, weitere Elemente sind beispielsweise Informationen zum Modellaufbau, die Verwaltung physikalischer Eigenschaften oder der Lastfallinformationen, aber auch das Thema Daten- und Informationssuche. Auf diese Aspekte wird in Abschnitt 4.3 sowie in Abschnitt 5 näher eingegangen.

Variabler Modellaufbau

Ähnlich wie bei einzelnen Bauteilen muss auch für Submodelle oder das Gesamtfahrzeug eine Systematik erarbeitet werden, um die einzelnen Bauteilfiles zu verwalten und den koordinierten Zusammenbau zu einem Gesamtmodell sicherzustellen. In [MLE08, SCH07b, SCH06d] sind Möglichkeiten für den Aufbau eines modularen Modellaufbaus dargestellt. Die Methoden verwenden eine file-basierte Strukturierung des Gesamtmodells, ergänzt um eigene Datensätzen für die Verbindungstechniken zwischen den einzelnen Bauteilen und Modulen. Zu berücksichtigen sind außerdem unterschiedliche Lastfälle, die sich durch

entsprechende Randbedingungen, eingesetzte Standardmodelle wie Barrieren oder Dummies, definierte Fahrzeugmassen sowie lastfallspezifischer Instrumentierung und Auswertung auszeichnen.

Auf Basis von automatisierten Abläufen können sehr einfach eine Vielzahl an Varianten aufgebaut und bewertet werden, dies ist für verschiedene Antriebsvarianten, die unterschiedlichen Lastfälle, oder auch während der Entwicklung für die Beurteilung der einzelnen Konzepte und Lösungsansätze notwendig. Unterstützung kann in diesem Abschnitt des Modellaufbaus auch die Parametrisierung der einzelnen Modelle bieten, um einfach Variantenstudien oder auch Optimierungen durchzuführen.

Details zum variablen und automatisierten Modellaufbau sind auch in Abschnitt 5.2 dieser Arbeit nachzuschlagen.

Standardisierung der Auswertung und Visualisierung der Resultate

Basierend auf den Lastfalldefinitionen müssen standardisierte Auswertungen hinsichtlich gesetzlicher oder interner Kriterien durchgeführt, und in entsprechenden Diagrammen, Animationen oder Reports dokumentiert und im Datenmanagementsystem abgelegt werden, wie es auch in [HAE00, REI07, SCH07b] dargestellt ist.

Zusätzlich müssen die wesentlichen Ergebnisse in einem übergeordneten Monitoringsystem abgelegt werden, um einen Überblick über den aktuellen Entwicklungsstand in den einzelnen Disziplinen und den Produktreifegrad zu erhalten. Durch ein Monitorsystem können die Trends in der Entwicklung sehr gut verfolgt, und somit Fehlentwicklungen leichter identifiziert werden. Auch Auswirkungen auf andere technische Disziplinen sind so sehr einfach darzustellen. Die gesammelten Resultate bilden die Basis für Entscheidungen im Entwicklungsprozess, aus diesem Grund muss auch die Nachvollziehbarkeit der Informationen zu jedem Zeitpunkt gewährleistet sein. Das Monitoringsystem kann einerseits in die Entwicklungsumgebung integriert sein, alternativ kann jedoch auch eine Schnittstelle zu einem separaten Projekt- und Produktmanagementwerkzeug vorgesehen werden, wie es in [FAC07] erläutert ist.

Neben dem Verfolgen von Ergebnissen ist auch der Vergleich der Simulationsresultate mit Testergebnissen ein entscheidender Faktor. Hier gilt es durch standardisierte Schnittstellen die Möglichkeiten zur Anbindung an die entsprechenden Testdatenmanagementsysteme sicherzustellen, und Methoden zum Abgleich der zu vergleichenden Resultate zu integrieren. Speziell hier muss auch auf die Konsistenz zwischen den experimentellen und numerischen Varianten geachtet werden.

Berücksichtigung disziplinübergreifender Fragestellungen

Durch die ständig steigende Komplexität der Fahrzeuge sowie durch die zunehmende Integration von mechatronischen Modulen müssen vor allem disziplinübergreifende Entwicklungsmethoden in den modernen Entwicklungsprozess integriert werden. Dazu zählen beispielsweise Methoden wie die Multidisziplinäre Optimierung oder die gekoppelte Simulation, um mechanische, thermische und elektrisch/elektronische Fragestellungen zu betrachten. Vor allem die Berücksichtigung und Verwaltung der spezifischen Größen,

auszutauschende Parameter bei der Co-Simulation oder der Optimierung, müssen in den Konzepten und Softwaretools einer Entwicklungsumgebung berücksichtigt werden. Mithilfe von Templates, die entsprechend im Engineering Data Backbone konfiguriert und abgelegt werden, können die einzelnen Simulationsaufgaben durchgeführt werden. Die Steuerung der Abläufe erfolgt in den entsprechenden Modulen der Entwicklungsumgebung, wie sie in Abbildung 4.4 dargestellt sind. Für einen detaillierten Überblick und Lösungsansätze der Co-Simulation bzw. zur multidisziplinären Optimierung sei hier auf die Abschnitte 4.4 bzw. 4.5 verwiesen. In diesen Abschnitten werden neben bereits etablierten Methoden neue Aspekte und Ansätze zur disziplinübergreifenden Entwicklung dargestellt, die bei einer integrativen Entwicklungsplattform eine essentielle Rolle spielen.

Bei der übergreifenden Co-Simulation ist ein weiteres Themengebiet relevant, nämlich die Einbindung von physikalischen Testmethoden, wobei hier vor allem Hardware-in-the-loop (HIL), Software-in-the-loop (SIL) oder Vehicle-in-the-loop (VIL) zu nennen sind. Einzelne Bereiche von komplexen Simulationsaufgaben werden dabei durch physikalische Modelle bzw. Hardware ersetzt. Ähnlich wie bei der rein numerischen Co-Simulation ist hier auf die auszutauschenden Parameter zu achten. Als weitere Herausforderung in diesem Themengebiet kommt die Echtzeitfähigkeit der beteiligten Systeme hinzu, um die einzelnen Systeme in realen Umgebungsbedingungen zu testen und zu optimieren.

Disziplinübergreifende Fragestellungen müssen jedoch nicht nur für einzelne sich beeinflussende Funktionen betrachtet werden, ebenso sind zeitliche Abfolgen und Abhängigkeiten im Entwicklungsprozess relevant. Dazu zählt vor allem die Kombination von Entwicklungs- und Entstehungsprozess des Produkts, welche eine zunehmend wichtige Rolle bei der ganzheitlichen Entwicklung spielt. Wesentlich ist dies unter anderem bei der Berücksichtigung der Fertigungseffekte bei der Produktentwicklung, speziell durch die Blechumformung bei der Struktursimulation. Durch die Berücksichtigung der produktionsbedingten Bauteiländerungen kann die Prognosefähigkeit für nachfolgende Struktursimulation erhöht werden. Zu erwähnen sind hier vor allem die Reduktion der Wandstärke, die Vorverfestigung und die Eigenspannungen durch den Tiefziehvorgang, die Einflüsse auf das Verhalten in der Struktursimulation haben. Die Bauteileigenschaften werden dafür in parallel durchgeführten Fertigungssimulationen ermittelt, die relevanten Eigenschaften werden mit geeigneten Algorithmen von meist detaillierten Netzen auf gröbere Crashnetze gemappt, die Fertigungseinflüsse können somit in der Crashsimulation berücksichtigt werden [LIN06]. Ähnliche Vorgehensweisen sind auch für die Berücksichtigung der Fertigungseffekte beim Strangguss oder beim Spritzguss möglich.

Darstellung des vernetzten Engineerings

Zu den Herausforderungen bei der übergreifenden Produktentwicklung zählen vor allem die Vernetzung der Entwicklungstätigkeiten und das Aufzeigen von Zusammenhängen. Ähnlich wie bei der Prozessunterstützung im Supportmodul sind hier Lösungen, die die komplexe Simulations- und Entwicklungsabläufe unterstützen, gefragt.

Mithilfe von Methoden zur Beschreibung von Abhängigkeiten und Beziehungen können diese Anforderungen in einer integrativen Entwicklungsumgebung umgesetzt werden. Dazu können beispielsweise semantische Netze oder Ontologien dienen. Semantische Netze oder

generell die Aufbereitung von Informationen und Beziehungen für numerische Verarbeitung bilden dabei die Basis, um die Zusammenhänge unterschiedlicher Objekte abzubilden. Diese Informationen werden in Form von Ontologien weiterverarbeitet und haben das Ziel, Zusammenhänge spezifisch und aus bestimmten Sichten darstellbar und angreifbar zu machen. Für die unterschiedlichen Sichten werden klar definierte Regeln eingesetzt, um beispielsweise Produktabhängigkeiten, Prozessabläufe oder auch Produktstrukturen darzustellen.

Ähnliche Fragestellungen werden auch beim Thema Data Mining, dem Erfahrungsgewinn aus Analysen bereits durchgeführter CAE-Simulationen, benötigt. Hier gilt es, erfolgreiche Lösungswege und Entwicklungsabläufe zu dokumentieren, und dieses Wissen dem Entwicklungsingenieur für neue Aufgaben zur Verfügung zu stellen.

Auf Basis dieser Informationen speichert man Erfahrung und Wissen im System welches in weiterer Folge für ein Changemanagement im Bereich der virtuellen Entwicklung eingesetzt werden kann. Speziell für die Serienentwicklung, wo eine umfassende Absicherung stattfindet und sich ständig wiederholende Tätigkeiten vorhanden sind, sind solche Methoden eine wesentliche Unterstützung.

4.2 Prognosefähige Methoden für die virtuelle Fußgängerschutzentwicklung

Die numerischen Methoden nimmt zunehmend eine stärkere Rolle im Entwicklungsprozess ein. Dies ist vor allem der Weiterentwicklung der numerischen Methoden in den letzten Jahren zu verdanken, wodurch sich die Qualität der Simulationsergebnisse deutlich verbessert hat. Um die Rolle der numerischen Simulation nochmals zu stärken sind Weiterentwicklungen der Methoden notwendig. Das Ziel sind belastbare Simulationsergebnisse, um eine virtuelle Abnahme in den einzelnen technischen Disziplinen zu ermöglichen. Aus diesem Grund wird in diesem Kapitel neben neuen Prozessen, Methoden und Systemen ein Schwerpunkt auf die Entwicklung numerischer Impaktmodelle für die prognosefähige Fußgängerschutzentwicklung gelegt.

4.2.1 Weiterentwicklung der Prognosefähigkeit in der Crashsimulation

In den letzten zehn Jahren hat sich die Modellbildung im Bereich der Crashberechnungen deutlich geändert. Die Anzahl der Finiten Elemente eines Gesamtfahrzeugmodells ist von wenig tausenden Elementen am Anfang der Crashberechnung, über einige hundert tausend Elemente gegen Ende der 1990iger Jahre, auf mittlerweile deutlich über eine Million gestiegen [FRI07]. Aus hybriden Fahrzeugmodellen, bei denen nur Teile des Fahrzeugs detailliert vernetzt wurden, der Rest mit einfachen Methoden wie Beam-Strukturen, wurden zum großen Teil einheitliche und detaillierte Crashmodelle für alle Lastfälle. Neben Gesamtfahrzeugmodellen wird sehr häufig für den Fußgängerschutz ein eigener virtueller Prototyp aufgebaut, da hier ein höherer Detaillierungsgrad notwendig ist.

Speziell beim Fußgängerschutz sind Methoden für hohe Prognosefähigkeit bzw. hoher Ergebnishöhe gefordert. Ein wesentlicher Grund hierfür sind die geringen Energieniveaus,

verglichen mit anderen Crashlastfällen, wodurch Fehlmodellierungen und Unsicherheiten verstärkt zum Tragen kommen. Deshalb werden für die Fußgängerschutzentwicklung zumeist eigene Simulationsmodelle eingesetzt, die sehr häufig qualitativ höheren Anforderungen entsprechen müssen. Hier sind vor allem höhere Detaillierungsgrade zu nennen, die Diskretisierung erfolgt zumeist mit geringeren Elementgrößen, Details wie Kanten und Fugen werden detailliert abgebildet. Außerdem müssen auch für eine normale Crashsimulation nicht relevante Bauteile in den numerischen Modellen berücksichtigt werden, beispielsweise die Scheibenwischer mit dem Antrieb, die elastischen Strukturen des Motors und der Aggregate, oder beispielsweise die Scheinwerferreinigvorrichtung.

Neben der Geometrie ist hier auch die Abbildung der elastischen und plastischen Bauteileigenschaften von entscheidender Bedeutung. Beim Fußgängerschutz sind hier vor allem Materialien wie kurz- oder langfaserverstärkte Kunststoffe oder unterschiedliche Schaumstrukturen zu nennen, aber auch die kontinuumsmechanischen Eigenschaften der Windschutzscheibe inkl. der Verklebung sind relevant, da auch in diesem Bereich die Simulation des Kopfanpralls durchgeführt wird. Dem Versagen der Materialien und der Bauteile ist eine wichtige Rolle zuzuschreiben, da beim Fußgängerschutz sehr häufig Bauteile mit Sollbruchstellen eingesetzt werden, beispielsweise nachgiebige Motorhaubenscharniere oder definierten Lastpfade mit Sollbruchstellen beim Beinanprall.

Die Verbindungstechniken zählen neben den Struktureigenschaften zu den wesentlichen Elementen, das Crashverhalten der Fahrzeugstruktur zu beeinflussen. Eine Vielzahl der Komponenten der Fahrzeugfront werden heutzutage durch Kleber miteinander verbunden, beispielsweise die unterschiedlichen Komponenten der Motorhaube. Beim Kopfanprall kann durch die Positionierung der Klebestellen die Performance deutlich beeinflusst werden, um dies gezielt für die Entwicklung zu nutzen, muss das Verhalten und Versagen in der numerischen Simulation detailliert abgebildet werden.

Ein weiterer Trend in der modernen CAE Berechnung sind Multi-Physics-Modelle. Im Bereich der Fahrzeugsicherheit kommen diese Methoden einerseits zur Beschreibung von Fluiden, wie beispielsweise zur Modellierung von Kraftstoff für Dichtigkeitsanalysen, zum Einsatz, andererseits für detaillierte Studien hinsichtlich Airbagströmung und Interaktionen mit dem Innenraum bzw. dem Dummy. Diese Simulationsmethoden sind auch im Bereich des Fußgängerschutzes gefragt, um beispielsweise Fußgängerairbags abzubilden. Neueste technische Systeme heben so die Motorhaube mit Airbags an und schützen den Fußgänger vor harter Struktur im Bereich der Fahrzeugfront.

Innovative Lösungsansätze sind vor allem im Bereich der gekoppelten Simulation zur Darstellung des Gesamtfahrzeuges inklusive der Interaktionen zwischen Verkehr und Fußgänger gefragt, hier gilt es die Sensorik, die Regelungstechnik, die Aktuatorik sowie die Informations- und Kommunikationstechnologien in eine gesamtheitliche Betrachtung zu integrieren, Beispiele und Ansätze hierfür sind in Abschnitt 4.4 dargestellt.

4.2.2 Modellierung und Validierung der Kopfimpaktoren

Für die Entwicklung hinsichtlich des Fußgängerschutzes sind numerische Modelle der unterschiedlichen Impaktoren notwendig. Im Rahmen der hier dargestellten

Forschungsvorhabens wurden numerische Modelle für die beiden expliziten Softwarecodes LS-Dyna® und PAM-CRASH® aufgebaut, und mit entsprechenden Versuchen validiert. Hier wird lediglich auf den Aufbau und die Validierung der Kopfimpaktoren näher eingegangen, da diese auch die Basis für weitere Forschungsaktivitäten, wie sie in Abschnitt 5 nachzuschlagen sind, darstellen.

Die Validierung der Impaktoren erfolgte dabei in mehreren Teilschritten. Basierend auf der Charakterisierung der Materialeigenschaften der Kopfhaut stellen einfache Prinzipversuche auf starre Unterlagen die erste Validierungsstufe dar. In den nächsten Stufen werden dynamische Versuche auf deformierbare Strukturen für die Validierung der numerischen Impaktormodelle verwendet. Die Verifikation der numerischen Impaktormodelle erfolgt abschließend mithilfe von Gesamtfahrzeugversuchen.

4.2.2.1 Modellierung des Impaktors

Beim Kopfanprall nach der Prüfmethode nach [EUR03] sind unterschiedliche Impaktoren notwendig. Diese sind der für die Phase 1 des Gesetzes notwendige ACEA-Kopfimpaktor und auch die beiden Impaktoren für die Phase 2, der Kinder- und der Erwachsenenkopf. Ziele beim Aufbau der numerischen Impaktoren sind neben einem einfach aufgebauten Modell vor allem eine geringe Rechenzeit und eine hohe Qualität der Berechnungsergebnisse. Die einzelnen Bauteile des physikalischen Prüfkörpers mit den physikalischen Eigenschaften sind entsprechend im numerischen Modell berücksichtigt, wie in Abbildung 4.5 unter a) anhand einer Schnittdarstellung zu erkennen ist.

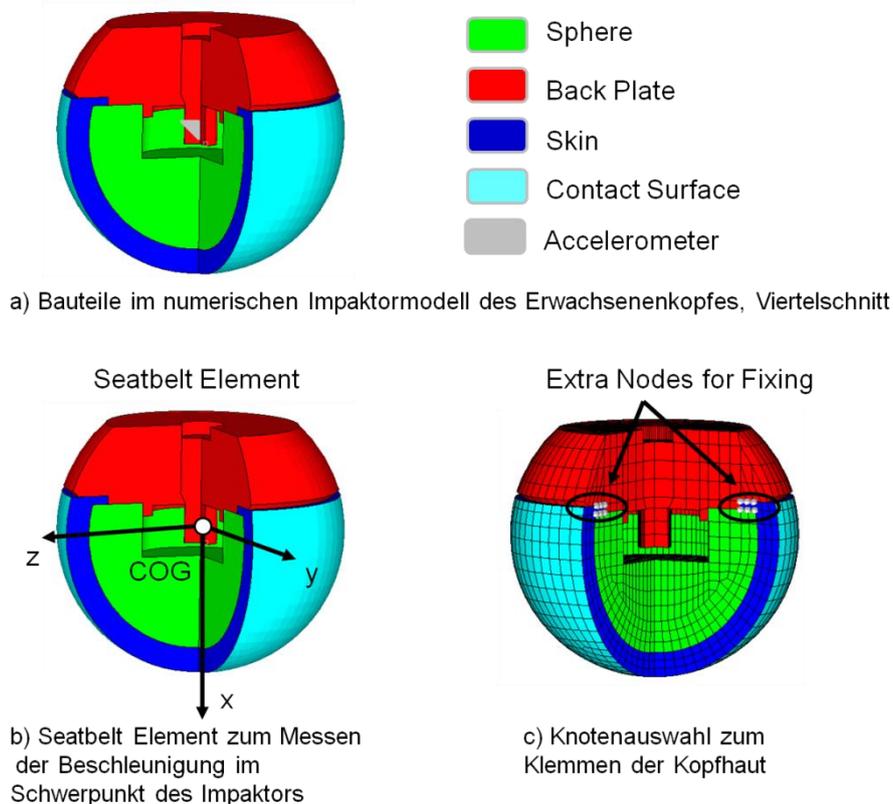


Abbildung 4.5: Aufbau des numerischen Impaktormodells

Die Halbkugel und die Endplatte, welche beide aus Aluminium bestehen, sind in der Simulation mit einem starren Material abgebildet und zu einem Starrkörper verschmolzen. Diese Annahme ist aufgrund der sehr großen Steifigkeitsunterschiede zwischen den Metallbauteilen und der Kopfhaut aus PVC legitim. Eine Kontrollrechnung mit elastischer Modellierung der Metallbauteile zeigt geringste Unterschiede in der Ergebnisqualität, die Starrkörpermodellierung ermöglicht deutlich geringere Rechenzeiten und wird somit für die weiteren Simulationen eingesetzt.

Die elastische Kopfhaut wird mit viskoelastischen Materialmodellen abgebildet, dabei stellt die numerische Abbildung der physikalischen Eigenschaften der Kopfhaut die größte Herausforderung dar, die detaillierte Vorgangsweise und die Validierung der viskoelastischen Kopfhaut ist in Abschnitt 4.2.2.2 dargestellt.

Die Kopfhaut wird über die Verbindung zwischen Endplatte und Halbkugel geklemmt, durch die gegossene Form liegt diese weitgehend spannungsfrei auf der Kugeloberfläche auf, es müssen in den numerischen Modellen keine Vorspannungen der Kopfhaut aufgebracht werden. Im numerischen Modell wird das Klemmen der Kopfhaut durch eine starre Anbindung von einzelnen Knotenreihen zum Starrkörper modelliert, wie in Abbildung 4.5 unter c) zu erkennen ist.

Der Beschleunigungsaufnehmer, welcher im Schwerpunkt des Kopfmodells positioniert ist, wird im numerischen Modell mit dem Elementtyp *Seatbelt-Accelerometer* abgebildet. Dadurch werden die Beschleunigungen im Schwerpunkt des Impaktors ausgegeben, die in weiterer Folge zur Analyse der Belastungen auf den Impaktor sowie zur Berechnung der gesetzlich definierten Kriterien herangezogen werden. Die Beschleunigungssignale werden, wie in Abbildung 4.5 b) zu sehen ist, im lokalen Koordinatensystem ausgegeben, damit ist ein direkter Vergleich mit den Versuchsdaten möglich.

Die Kontaktbedingungen zum Fahrzeug werden über eine Nullschale definiert, die zu diesem Zweck über beziehungsweise auf die Kopfhaut gelegt wird. Durch die Nullschalen können die Kontaktdefinitionen gesondert definiert werden, die Berechnung ist deutlich stabiler und die Rechenzeit geringer gegenüber Kontaktdefinitionen über Solid-Elemente. Innerhalb des Impaktormodells sind Kontakte zwischen der Kopfhaut und dem Starrkörper definiert.

Zur Auswertung werden die Output-Daten des jeweiligen Solvers verwendet. Die für den Kopfaufprall notwendigen Ergebnisse werden in die entsprechenden Files geschrieben. Darin sind die Ergebnisse des Beschleunigungssensors im Schwerpunktknoten des Kopfes aufgelistet. Bevor das Signal ausgewertet werden kann, muss es gefiltert werden, dazu wird wie in [MDV08] erläutert ein CFC 1000 Filter¹ eingesetzt. Die Belastungen auf den Impaktor werden üblicherweise in einem Vielfachen der Erdbeschleunigung angegeben. Aus diesen Belastungsverläufen lässt sich nun der HPC Wert ermitteln, der für die gesetzlich definierte Bewertung des Fußgängerschutzes angewandt wird.

¹ CFC: Channel Frequency Class; Als digitales Filter dient nach SAE J211 ein 4-poliger Butterworth-Tiefpass mit linearer Phase und speziellen Anfangsbedingungen. CFC Filter sind ein Standard für Crash-Versuche und auch für Crash-Simulationen.

4.2.2.2 Validierung der Materialeigenschaften der Kopfhaut

Für die Validierung der numerischen Modelle sind eine Vielzahl an Versuchen notwendig, einerseits um Ergebnisse hinsichtlich des Verhaltens der Impaktoren zu erhalten, andererseits aber auch um die Versuchsstreuung der einzelnen Anordnungen und Randbedingungen mit zu berücksichtigen. Ein wesentlicher Punkt bei der Validierung ist vor allem die Trennung der Einflüsse des Versuchsaufbaus. Aus diesem Grund werden einfache Versuche mit der Kopfhaut als Basis für die Validierung verwendet. Die Versuche werden mehrmals wiederholt, wodurch die Reproduzierbarkeit der Versuche geprüft werden kann.

Für diese einfachen Versuche wird die Versuchsanlage IMPETUS II¹ gewählt, damit können sehr einfach dynamische Prinzipversuche für die Materialcharakterisierung durchgeführt werden. Die Versuchsanlage, wie sie in Abbildung 4.6 dargestellt ist, besteht aus einem oder zwei Pendelarmen, die bei der Versuchsdurchführung das Probenmaterial entsprechend des vorgesehenen Aufbaus deformieren. Dabei können Impaktgeschwindigkeiten von bis zu 4.5 m/s beim einfachen Pendelaufbau, bzw. bis zu 9.0 m/s bei der Applikation mit dem Doppelpendel erzielt werden.



Abbildung 4.6: IMPETUS II, Versuchsanlage für die dynamische Materialcharakterisierung

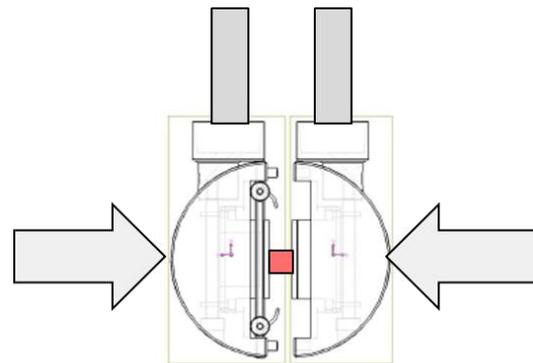


Abbildung 4.7: Versuchskonstellation für dynamische Druckversuche

Für den Versuchsaufbau zur Charakterisierung der dynamischen Materialeigenschaften der Kopfhaut wird die Doppelpendelapplikation gewählt, da sich dadurch höhere Impaktgeschwindigkeiten und daraus resultierend höhere Dehnraten erzielen lassen. An den Enden der beiden Pendelarmen sind Vorrichtung zum Fixieren und Belasten der Proben vorgesehen, in diesem Fall zwei ebene Flächen zum homogenen Belasten des dazwischen fixierten Probenmaterials. Durch die Druckbelastung, wie sie in Abbildung 4.7 zu erkennen ist, wird das zu prüfende Material verformt und die an den beiden Pendelarmen auftretenden Beschleunigungen gemessen. Diese Beschleunigungssignale werden gemeinsam mit den

¹ IMPETUS II: dynamische Pendelanlage für die Durchführung von Material- und Bauteilversuchen, speziell für Kunst- und Verbundwerkstoffe, entwickelt von *4a engineering*

definierten Randbedingungen des Versuchsaufbaus für die weiteren numerischen Analysen verwendet.

Bei der Charakterisierung der dynamischen Materialeigenschaften ist vor allem die Dehnratenabhängigkeit von entscheidender Bedeutung. Um diese entsprechend zu untersuchen werden Versuche mit unterschiedlichen Impaktgeschwindigkeiten durchgeführt. Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit werden mehrere Einzelversuche durchgeführt, für die weiteren Arbeiten werden die gemittelten Versuchsdaten jeder Impaktgeschwindigkeit verwendet.

In den unterschiedlichen expliziten FEM-Codes steht eine Vielzahl an unterschiedlichen mathematischen Modellen zur Abbildung des kontinuumsmechanischen Verhaltens zur Verfügung. In diesem Fall wird ein Materialmodell zur Beschreibung des viskoelastischen Verhaltens der gummiartigen Kunststoffhaut des Impaktors gewählt, welches sowohl im Softwarecode LS-Dyna[®] als auch PAM-CRASH[®] zur Verfügung steht. Wie in Formel 4.1 am Beispiel der Umsetzung in LS-Dyna[®] dargestellt ist, sind insgesamt drei Parameter für die Beschreibung des dynamischen Relaxationsverhaltens des Materials notwendig. Zusätzlich werden zwei weitere Parameter, die Dichte und der Kompressionsmodul, für die numerische Umsetzung im FEM-Code benötigt.

Zur Beschreibung des Verhaltens der einzelnen Materialmodelle müssen einzelne Parameter ermittelt werden. Die Bestimmung dieser erfolgt einerseits durch direkte Messungen, wie beispielsweise der Dichte, oder durch inverse Parameterbestimmung. Dabei werden die einzelnen Parameter des numerischen Materialmodells basierend auf den experimentellen Daten, die in Form von dehnratenabhängigen Kurvenscharen vorliegen, ermittelt.

Beschreibung des Relaxationsverhaltens:

$$G_{(t)} = G_{\infty} + (G_0 - G_{\infty})e^{-\beta t}$$

G_0 ... short – time shear modulus

G_{∞} ... long – time (infinite)shear modulus

β ... decay constant

zusätzliche Parameter für das Materialmodell:

ρ ... density

K ... elastic bulk modulus

Formel 4.1: Materialparameter zur Beschreibung des Relaxationsverhaltens für den Softwarecode LS-Dyna[®]

Für die inverse Materialparameterbestimmung wird in dieser Anwendung das Optimierungswerkzeug Ls-Opt von LSTC¹ eingesetzt, wodurch die einzelnen Parameter der Materialmodelle hinsichtlich einer komplexen Zielfunktion optimiert werden. Die Zielfunktion beinhaltet Teilziele jeder Impaktgeschwindigkeit, dies sind einerseits Kurveninformationen

¹ LSTC: Livermore Software Technology Corporation, programmieren den Softwarecode LS-Dyna

des Beschleunigungsverlaufes, maximale Deformationswege und auch innere Energien des Materials.

Der detaillierte Aufbau der Zielfunktion ist in Abbildung 4.8 ersichtlich. Die einzelnen Kriterien der Zielfunktion werden dabei unterschiedlich gewichtet, zusätzlich Gewichtungsfaktoren abhängig von der Impactgeschwindigkeit definiert. Vor allem die höheren Anprallgeschwindigkeiten, wo ähnlich hohe Belastungen und Energieaufnahmen wie bei Gesamtfahrzeugversuchen auftreten, werden mit höheren Gewichtungsfaktoren berücksichtigt. Für die Bewertung wird die Differenz aus Simulation und Experiment des jeweiligen Zielkriteriums berechnet und mit den Gewichtungsfaktoren multipliziert, die einzelnen Werte anschließend summiert. Während der Optimierung variiert der Algorithmus die Variablen des Materialgesetzes, in diesem Fall die drei Parameter zur Beschreibung des dynamischen Relaxationsverhaltens, wie sie in Formel 4.1 erläutert sind. Die Optimierung wird abgeschlossen, wenn das Minimum des Bewertungskriteriums erreicht ist.

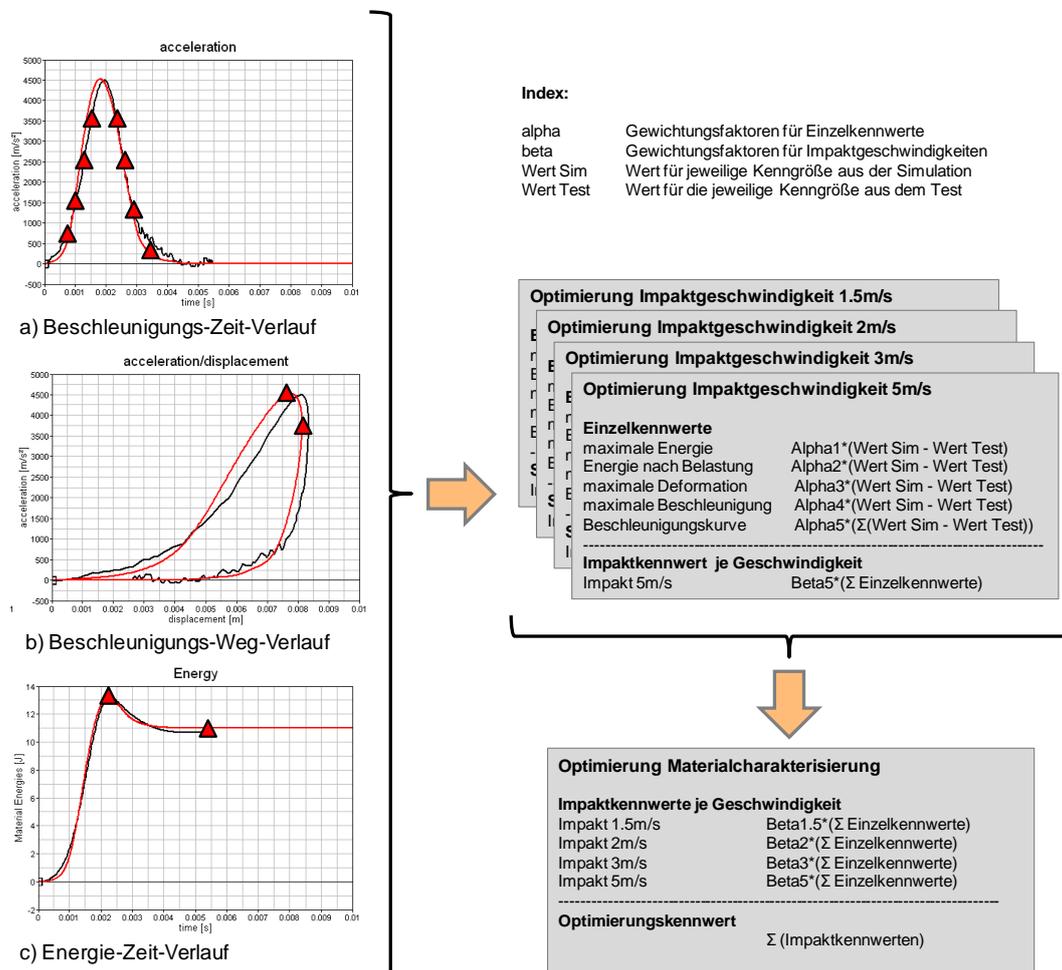
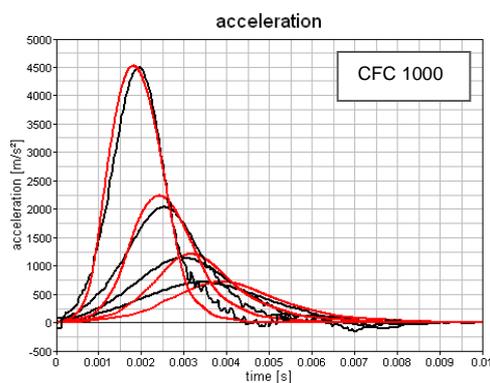


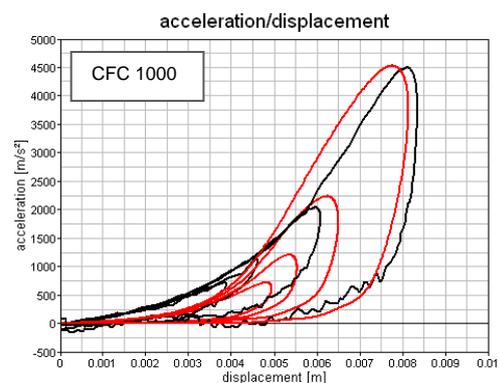
Abbildung 4.8: Optimierung der Materialkennwerte

In Abbildung 4.9 sind die Ergebnisse der Validierung abgebildet. Dabei stellen die einzelnen Kurven die Resultate bei den unterschiedlichen Impactgeschwindigkeiten dar, in schwarz jeweils die experimentellen Daten, in rot die numerischen Ergebnisse. Wie in den einzelnen Diagrammen zu erkennen ist, wird durch die angepassten Simulationsmodelle eine qualitativ

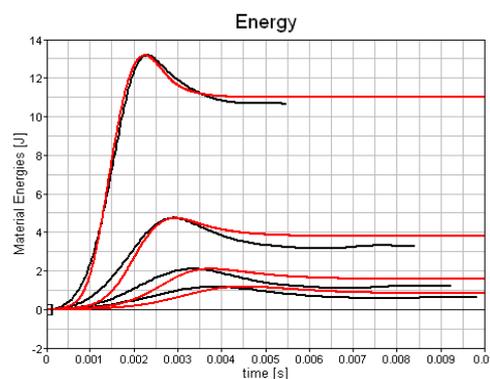
und quantitativ gute Übereinstimmung mit den realen Versuchsdaten erzielt. Die Belastungsphase, dies ist der ansteigende Bereich der Beschleunigungscharakteristik, wird sowohl über Zeit- als auch über den Wegverlauf sehr gut abgebildet, wie auch in Abbildung 4.9 a) und b) zu erkennen ist. Auch die Entlastungsphase kann mit dem Modell gut wiedergegeben werden, dies ist bei den unterschiedlichen Impactgeschwindigkeiten zu erkennen. Lediglich bei sehr geringen Anprallgeschwindigkeiten kommt es zu einem zeitlichen Delay des Responses, diese sind jedoch für die Anwendung beim Fußgängerschutz von untergeordneter Bedeutung, und werden auch bei der Optimierung mit geringerer Gewichtung berücksichtigt. Bei der Energieaufnahme des Probenmaterials kann eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Versuch und numerischer Simulation erzielt werden. Dies gilt sowohl für die maximalen Werte während der Belastung, als auch für die Werte nach Belastungsende, wie es in Abbildung 4.9 unter c) zu sehen ist.



a) Beschleunigungs-Zeit-Verlauf



b) Beschleunigungs-Weg-Verlauf



c) Energie-Zeit-Verlauf

Randbedingungen:

Impactmasse: 2 x 0.526 kg

Impactgeschwindigkeiten
1.5, 2.0, 3.0, 5.0 m/s

Abbildung 4.9: Validierung der dynamischen Materialeigenschaften

Für eine bessere und realitätsnähere Charakterisierung der Materialeigenschaften wären deutlich komplexere nichtlineare Materialmodelle notwendig, dazu sind zusätzliche frequenzabhängige dynamische Materialversuche notwendig. Speziell bei hochdynamischen Vorgängen, wie hier bei einem sehr kurzen Impact, sind aufgrund des frequenzabhängigen steifen Materialverhaltens die Unterschiede sehr gering, daher wird auf den Einsatz von komplexeren Materialformulierungen zugunsten einer kürzeren Rechenzeit und eines stabileren Materialmodells verzichtet.

4.2.2.3 Dynamische Versuche auf starre Platten

In der nächsten Validierungsstufe werden die einzelnen Kopfpaktoren gegen eine starre Unterlage geschossen. Dabei wird eine Versuchsanlage der Firma BIA verwendet, welche die Kopfpaktoren mithilfe eines hydraulischen Antriebes auf die gewünschte Geschwindigkeit beschleunigt und auf die gewählte Position schießt. Durch die Kombination der Abschussvorrichtung und der starren Unterlagen wird die Validierung der numerischen Modelle stufenweise erhöht, die Einflüsse der aktiv beschleunigten Kopfpaktoren sowie die hochdynamischen Vorgänge durch den harten Anprall können damit näher untersucht werden. Zusammengefasst werden in diesem Abschnitt die Prinzipversuche mit den Kopfpaktoren auf die starre Unterlage dargestellt und die Resultate der Simulationen den realen Versuchen gegenübergestellt. Exemplarisch werden diesmal die Resultate des Child Kopfpaktors dargestellt.

Versuchsaufbau

In Abbildung 4.10 ist der Versuchsaufbau für die dynamischen Impaktversuche zu sehen. Eine 25 mm dicke Stahlplatte wird auf ein starres Stahlgestell gespannt, welches wiederum mit einem massiven Betonfundament verschraubt ist. Die unterschiedlichen Kopfpaktoren werden unter einem Winkel von 75° auf die Platte geschossen, um einen exzentrischen Stoß auf den Kopfpaktor nachzustellen.

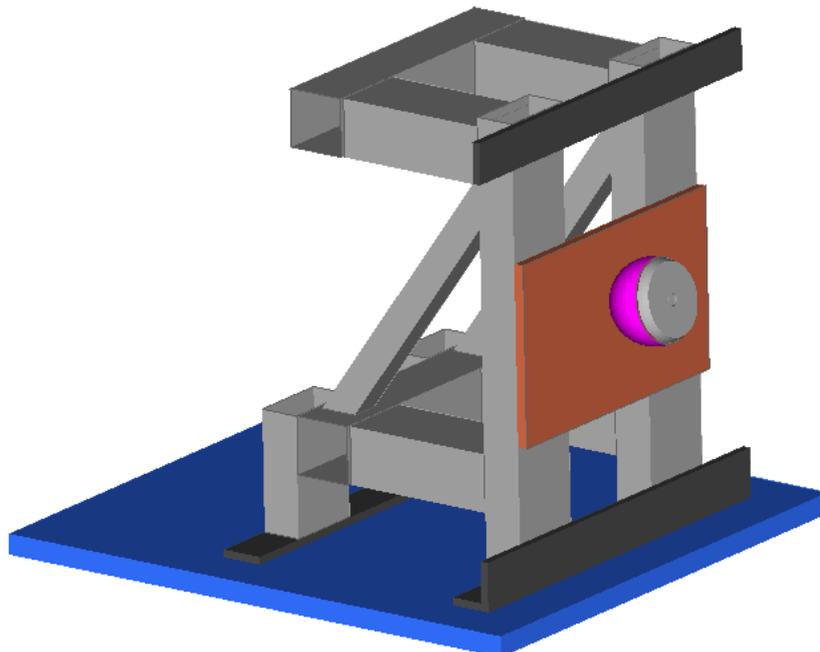


Abbildung 4.10: Versuchsaufbau mit starrer Platte

Die Versuche mit den unterschiedlichen Kopfpaktoren sind in den entsprechenden Simulationsmodellen nachgestellt. Der Versuchsaufbau wird als Starrkörper modelliert, eine Überprüfung dieser Annahme wurde mithilfe einer elastischen Modellierung durchgeführt, bei den Resultaten ist jedoch kein Einfluss der Elastizitäten des Versuchsaufbaus zu erkennen. Für die weiteren numerischen Untersuchungen wird somit der starr modellierte

Versuchsaufbau gewählt. In diesen Studien werden die Impaktoren mit einer Geschwindigkeit von 3 m/s und unter einem Winkel von 75° auf die starre Unterlage geschossen. Für die Validierung werden sowohl visuelle Bewertungen des charakteristischen Bewegungsablaufs als auch detaillierte Beschleunigungsverläufe herangezogen.

Bei den einzelnen Lastfällen konnten qualitativ und quantitativ sehr gute Übereinstimmungen zwischen Simulation und Versuch erreicht werden. Die Simulationsergebnisse der beiden verwendeten Softwarepakete LS-Dyna® und PAM-CRASH® zeigen gute Ergebnisse über den gesamten Zeitverlauf. Abweichungen beim Geschwindigkeits- und beim Wegverlauf treten erst nach der Entlastungsphase auf, dies hat auf die Belastung des Prüfkörpers und auf den gesamten Bewegungsablauf nur einen sehr geringen und zu vernachlässigenden Einfluss.

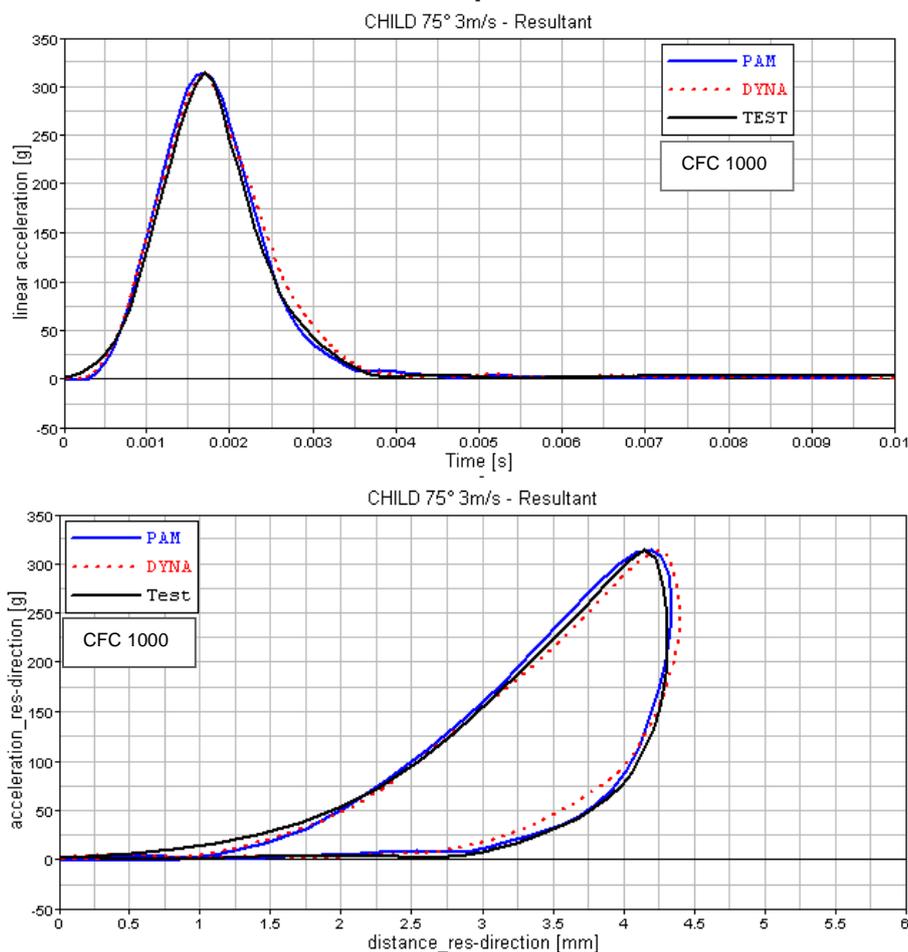


Abbildung 4.11: child headform to rigid plate, 75°, 3.0 m/s

Im Abbildung 4.11 ist zu erkennen, dass sowohl die Charakteristik der Belastungs- als auch die der Entlastungsphase beim Beschleunigungsverlauf mit den aufgebauten Simulationsmodellen sehr gut nachgestellt werden kann. Auch bei den Analysen des Beschleunigungsverhaltens über den Deformationsweg kann eine exakte Übereinstimmung von Versuch und

Simulation erzielt werden, die Entlastungshysterese wird mit den verwendeten Materialmodellen sehr gut beschrieben.

4.2.2.4 Dynamische Versuche auf Blechstrukturen

Vorrangiges Ziel der nächsten Versuchsreihe ist es, ein realistisches Deformationsverhalten der Blechstruktur und damit eine realistische Krafteinleitung auf die Kopfimpaktoren zu erhalten.

Versuchsaufbau

Für die Versuche werden ein massives Stahlgestell und ein Blechrahmen mit aufgeschweißtem Blech verwendet. Der Rahmen inkl. Blech wird nach jedem Versuch gewechselt. Bei den Versuchsreihen werden unterschiedliche Geschwindigkeiten und Anprallwinkel mit den drei Kopfimpaktoren untersucht.

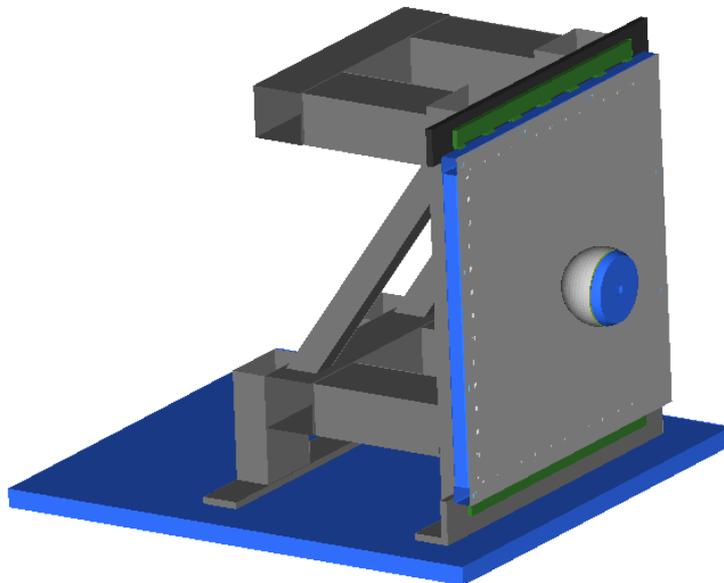


Abbildung 4.12: Versuchsaufbau mit Blechstruktur

Die Blechstruktur und die Randbedingungen für die Versuche sind so ausgelegt, dass sie möglichst realistische Niveaus und Resultate in Hinblick auf die Belastung bei einem Gesamtfahrzeugversuch nachstellen. Als Richtwerte dienen HIC Werte in der Höhe von 1000 bis 1500 und maximale Beschleunigungswerte in der Höhe von bis zu 200 g.

Das numerische Modell der Versuchsaufbauten ist detailliert nachgebildet. Neben der geometrischen Modellierung sind vor allem auch die nichtlinearen Materialeigenschaften der verwendeten Werkstoffe von entscheidender Bedeutung. Berücksichtigt sind sowohl das elastische und plastische Deformationsverhalten, aber auch die Dehnratenabhängigkeiten der metallischen Strukturen. Die Verbindungstechniken, in diesem Fall die Schweißnähte zur Verbindung der Bleche mit dem Rahmen, sind mit Solidelementen modelliert, die Position und Geometrie entsprechen denen der physikalischen Aufbauten. Damit können die mechanischen Eigenschaften des Aufbaus exakt nachgestellt werden.

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Validierungsergebnisse bei den Versuchen mit dem Adult Kopfimpaktor dargestellt. In Abbildung 4.13 sind die Beschleunigungsverläufe der Versuche mit einer Anprallgeschwindigkeit von 7 m/s und einem Anprallwinkel von 90° zu sehen. Die Ergebnisse bei einem Anprallwinkel von 60° und einer Anprallgeschwindigkeit von ebenso 7 m/s werden in Abbildung 4.14 gezeigt.

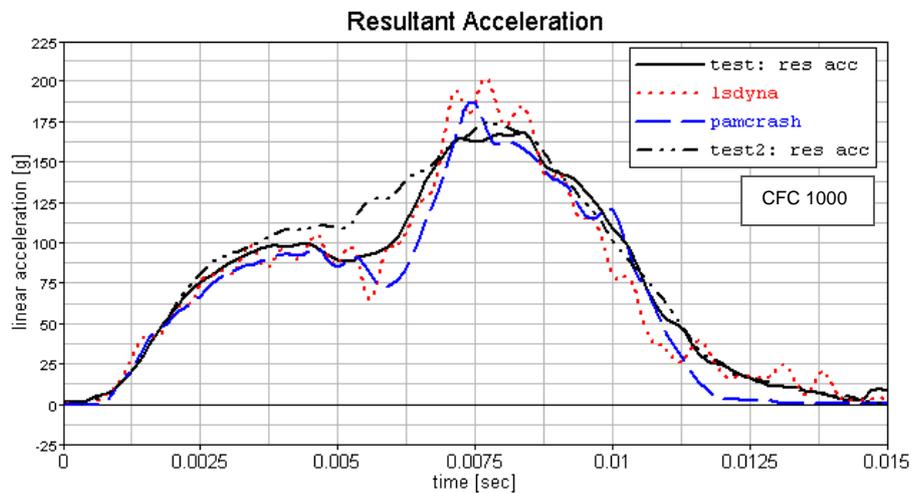


Abbildung 4.13: adult headform to frame, 90°, 7.0 m/s

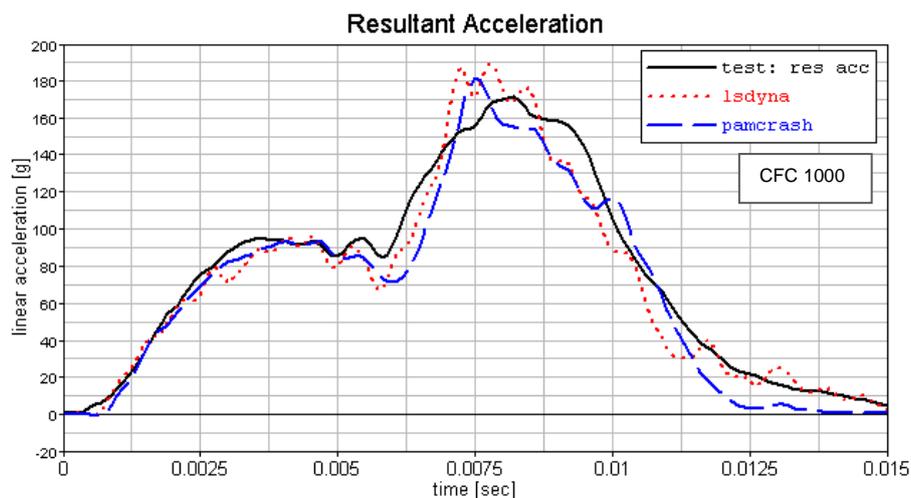


Abbildung 4.14: adult headform to frame, 75°, 7.0 m/s

Die erste Belastungsphase, die dem Eindringen des Impaktors in die deformierbare Blechstruktur entspricht, kann bei beiden Lastfällen qualitativ und quantitativ nachgebildet werden. Nach einer ersten kurzen Entlastungsphase tritt eine zweite Belastungsphase des Impaktors auf. Diese wird durch die elastoplastische Verformung des Rahmens sowie der plastischen Deformation der Blechstruktur hervorgerufen, die Frequenzen der dabei auftretenden Schwingungen entsprechen einer Eigenfrequenz des Versuchsaufbaus. Das Verhalten der physikalischen Struktur kann mit dem numerischen Modell hinsichtlich der maximalen Beschleunigungswerte quantitativ gut nachgestellt werden. Die Schwingungen in der Simulation weisen jedoch eine stärkere Amplitude auf, wodurch keine exakte Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation erreicht werden kann. Die

Unterschiede bei den Schwingungen sind auf das Dämpfungsverhalten der realen Aufbauten zurückzuführen, diese können in der Simulation nicht detailliert nachgebildet werden. Die zweite Entlastungsphase kann wiederum sehr gut nachgestellt werden.

Basierend auf den sehr guten Resultaten der unterschiedlichen Validierungsstufen kann die Modellbildung der Kopfimpaktoren bestätigt und für den weiteren Einsatz im Rahmen der Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten freigegeben werden. Zur abschließenden Bestätigung und Demonstration werden Versuche mit einem Gesamtfahrzeug herangezogen.

4.2.3 Verifikation der numerischen Modelle mit Gesamtfahrzeugversuchen

In diesem Abschnitt werden die Simulationsergebnisse auf Basis eines Gesamtfahrzeugmodells den realen Versuchen gegenübergestellt. Damit soll die vorher durchgeführte Validierungsarbeit an den numerischen Impaktormodellen überprüft werden. Aus Gründen der Rechenzeit wird nicht das gesamte Fahrzeugmodell verwendet, sondern ein eigens adaptiertes Fußgängerschutzmodell aufgebaut. Das Fahrzeug wird für die Versuche vollständig fixiert und starr aufgespannt. Dadurch werden Einflüsse des Fahrwerks eliminiert und auch jegliche horizontale Bewegungen des Fahrzeuges unterbunden. Basierend auf diesen Maßnahmen sind auch die starre Einspannung und die Vereinfachungen am numerischen Modell legitim.

Modellaufbau

Als Basis für den Aufbau des Simulationsmodells für den Fußgängerschutz steht das Gesamtfahrzeugmodell zur Verfügung. Ausgehend davon müssen in mehreren Schritten Anpassungen durchgeführt werden, um ein hinsichtlich Rechenzeit und Ergebnisqualität optimiertes Modell zu erhalten.

Den größten Anteil der Anpassung betrifft die Modellierung der Fahrzeugfront, da diese im Frontcrashmodell nicht bzw. nur mit sehr starken Vereinfachungen abgebildet ist. Die Netzfeinheit ist beim Fußgängerschutzmodell erhöht, um eine bessere Modellierungstiefe und Detaillierung zu erhalten. Dafür notwendige zusätzliche Bauteile der Fahrzeugfront werden diskretisiert und ins Gesamtmodell eingearbeitet, um das Fußgängerschutzmodell zu vervollständigen.

Als Basis wird die Blechstruktur der Fahrzeugfront verwendet, beginnend von der Crashbox, der Blechstruktur um den Kühler, der Befestigung der Scheinwerfer und diverser Halterungen für Stoßfänger und Kotflügel. Anschließend werden die fehlenden Teile auf Basis der vorhandenen Geometriedaten diskretisiert. Die einzelnen Bauteile sind mit dem vorhandenen Modell verbunden, vorwiegend mit deformierbaren Beam-Elementen um die Nachgiebigkeit der realen Befestigung zu berücksichtigen. Neben den Bauteilen an der Front sind Kotflügel, Motor, Antriebsstrang, Teile der Crashstruktur und die Federdome im Modell inkludiert.

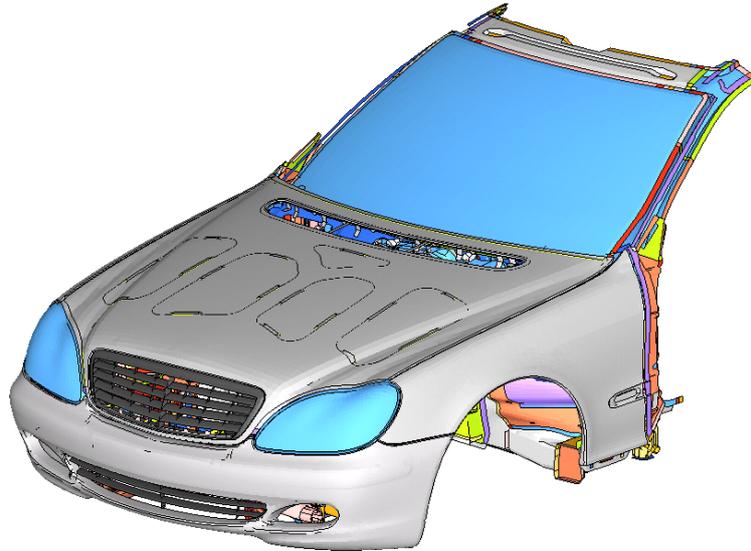


Abbildung 4.15: vereinfachtes Fußgängerschutz-Modell W220

Zusätzlich zu den geometrischen Abbildungen sind vor allem die Materialmodellierungen der Kunststoffbauteile den Belastungen im Fußgängerschutz angepasst. Auf Basis von zur Verfügung gestellten Materialinformationen werden die dehnratenabhängigen Materialeigenschaften modelliert. Vor allem beim Stoßfängerüberzug und beim energieabsorbierenden Schaum ist die Abbildung der elastischen und plastischen Materialeigenschaften von entscheidender Bedeutung, da dadurch die Interaktion mit dem Impaktor entscheidend beeinflusst wird.

Die Einspannung des Fußgängerschutzmodells erfolgt bei den Befestigungspunkten der Fahrwerkkomponenten. Zusätzlich werden die oberen Teile des Windschutzscheibenrahmens und Bereiche der A-Säulen fix eingespannt, um die realen Aufspannbedingungen des Versuchsaufbaus im numerischen Modell zu berücksichtigen.

Mit dem realen Fahrzeug wurden eine Vielzahl an Versuchen mit den unterschiedlichen Kopfimpaktoren, mit dem Hüft- und dem Beinimpaktor durchgeführt. Alle Resultate zeigen zufriedenstellende Übereinstimmungen mit den experimentellen Daten, vor allem sei hier darauf hingewiesen, dass dies kein eigens entwickeltes Fußgängerschutzmodell ist, und nur eingeschränkte Informationen zur Materialmodellierung zur Verfügung stehen. Zusätzlich kommt hinzu, dass dieses Fahrzeug nicht hinsichtlich des Fußgängerschutzes entwickelt ist, da zu diesem Zeitpunkt keine gesetzlich definierten Kriterien und Anforderungen vorhanden waren. Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse exemplarisch für den Kopfanprall dargestellt.

Versuche mit Kopfimpaktoren

Für die Verifikation stehen für jeden Kopfimpaktor die Resultate unterschiedlicher Kopfanprallpunkte zur Verfügung. Die Auswahl der Punkte entspricht dabei nicht den gesetzlich definierten Randbedingungen und Vorschriften. Vielmehr beruht die Auswahl der Anprallpunkte darauf, dass für die Validierung gezielt unterschiedliche Strukturen, Steifigkeiten und Geometrieausprägungen gesucht werden, und somit eine Variationen in

der Belastungshöhe und –situation des Kopfimpaktors sichergestellt werden kann. Ziel ist es, ein möglichst breites Spektrum des Einsatzgebietes der Impaktormodelle zu testen, und somit die Qualität der numerischen Modelle aufzuzeigen. In den folgenden Erläuterungen werden exemplarisch einige Resultate kurz dargestellt.

Versuch 04601K034F

Im Versuch 04601K034F wird mit dem 2.5 kg Childhead-Impaktor auf eine sehr steife Struktur geschossen. Zusätzlich befinden sich in der Nähe dieser Auftreffposition mehrere Klebestellen zur Verbindung der unterschiedlichen Bauteile der Motorhaube. Beim Anprall im Versuch werden HIC Wert in der Höhe von ca. 2500 erreicht, die max. Beschleunigung liegt bei ca. 200 g.

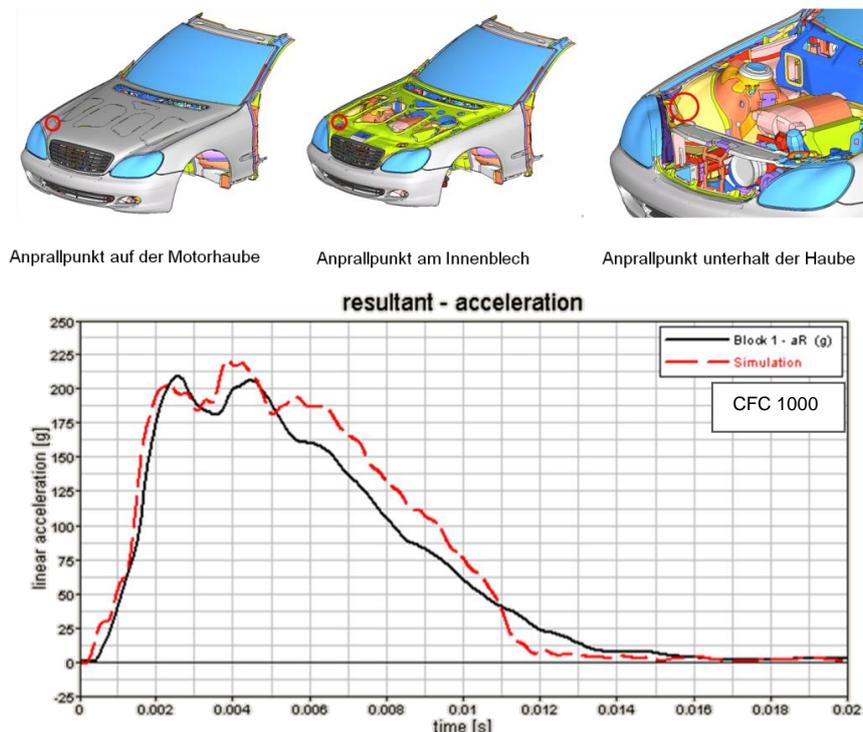


Abbildung 4.16: child headform to bonnet, position C1

Bei diesem Versuch kann vor allem in der Belastungsphase eine qualitativ und quantitativ gute Übereinstimmung zwischen Versuch und Simulation in der Belastungsphase erzielt werden, wie auch im Beschleunigungs-Weg-Verlauf in Abbildung 4.17 deutlich zu erkennen ist. Durch die in Abbildung 4.16 ersichtliche ausgeprägte Schwingung in der Reboundphase des Kopfanpralls und dem damit verbundenen höheren Beschleunigungsniveau, kommt es zu deutlichen Unterschieden bei den berechneten HIC Werten, im Versuch wird ein HIC Wert von 2411 ermittelt, in der Simulation jedoch 3104.

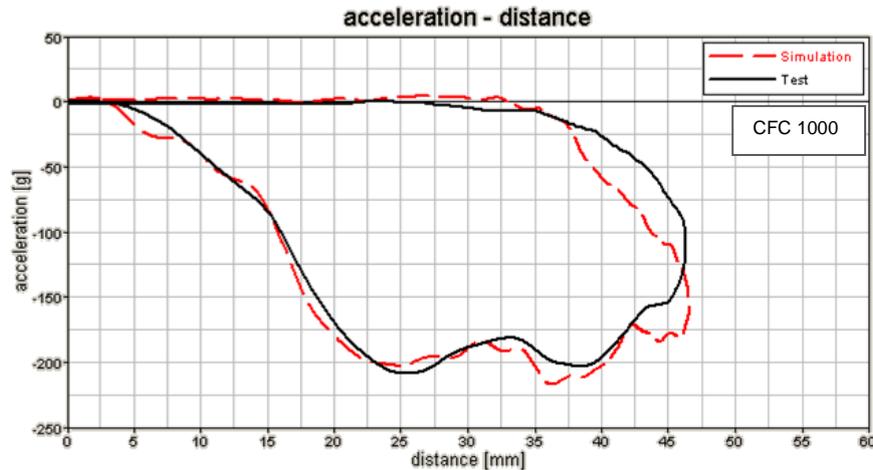


Abbildung 4.17: child headform to bonnet, position C1, acceleration versus displacement

Die ausgeprägten Schwingungen in der Simulation sind auf Strukturschwingungen zurückzuführen, welche bei den realen Versuchen durch Strukturdämpfung der Blechbauteile und der Klebestellen deutlich weniger ausgeprägt sind. Die Maxima bei den Beschleunigungen sowie der Eindringwege des Impaktors sind jedoch auf gleichem Niveau, wie in Abbildung 4.17 durch die sehr gute Übereinstimmung der maximalen Kurvenwerte bei beiden Achsen ersichtlich ist.

Versuch 04601K040F

Bei Versuche 04601K040F wird der ACEA Impaktor gegen eine steife Struktur der Motorhaube geschossen. Hier befinden sich diverse Versteifungen unter dem Außenkleid, die Scharniere befinden sich ebenfalls in der Nähe der Auftreffposition. Der maximal erreichte Beschleunigungswert im Versuch beträgt ca. 168 g, der HIC Wert 1537.

Ähnlich wie beim ersten Versuch kann auch in diesem Fall eine gute Übereinstimmung zwischen realen Messdaten und Simulation erzielt werden. Die Belastungsphasen können mit dem numerischen Modell wiederum sehr gut nachgestellt werden. Der erste Einbruch des Beschleunigungsverlaufes ist sowohl in der Simulation als auch im Versuch vorhanden, dieser entspricht der ersten Beschleunigung und Deformation der Struktur. Die Entlastungsphase kann in diesem Beispiel ebenfalls sehr gut wiedergegeben werden, wie man in Abbildung 4.18 erkennt. In Abbildung 4.19 ist ersichtlich, dass eine sehr gute Übereinstimmung der Eindringwege des Impaktors erreicht werden können, dies ist vor allem bei der Auslegung der Deformationszonen und des Packagekonzepts von entscheidender Bedeutung. Auch der HIC Wert der Simulation zeigt mit 1382 lediglich eine Abweichung von ca. 10%. Die Abweichungen beim HIC Wert sind auf die ausgeprägten Einbrüche der Beschleunigungskurve durch die auftretenden Schwindungen zurückzuführen.

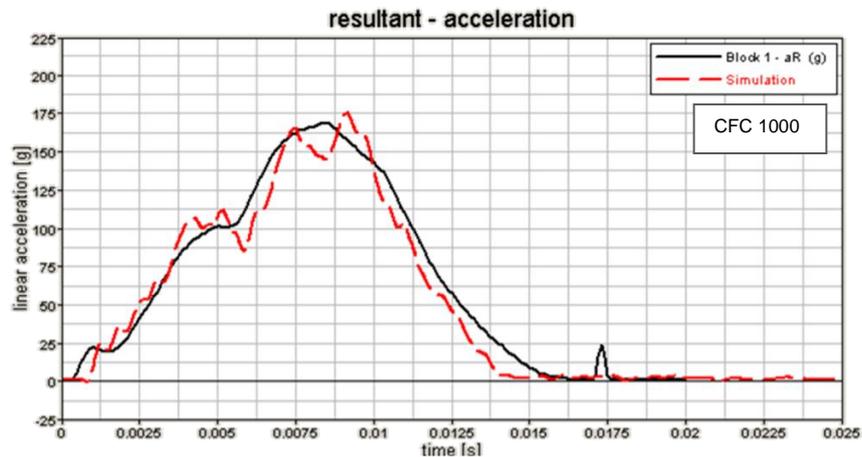
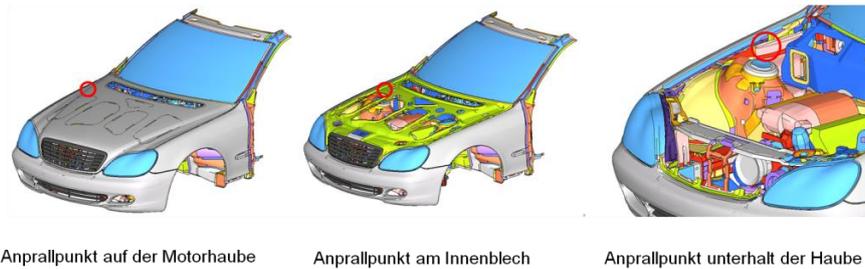


Abbildung 4.18: acea headform to bonnet, position AC3

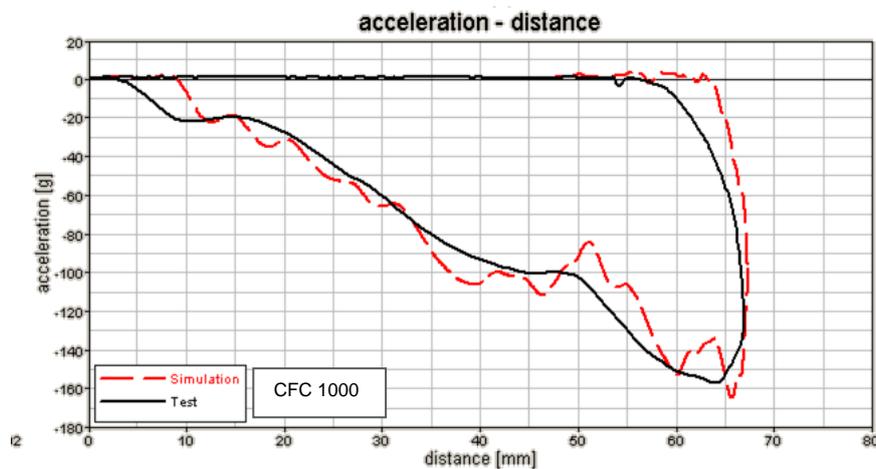


Abbildung 4.19: acea headform to bonnet, position AC3, acceleration versus displacement

4.3 Prozess- und Simulationsdatenmanagement

Die virtuelle Produktentwicklung ist eine der Schlüsseltechnologien für die modernen und die zukünftigen Entwicklungstätigkeiten in der Automobilindustrie. Für eine virtuelle Produktentwicklung sind dabei durchgehende und lückenlose Bauteilinformationen notwendig, die dem Entwicklungsingenieur lückenlos zur Verfügung gestellt werden. Dies beinhaltet neben geometrischen Eigenschaften vor allem technologische Informationen, wie beispielsweise detaillierte Materialeigenschaften, eingesetzte Fertigungsprozesse oder auch die Kosten des Bauteils. Um dies systemunterstützt zu realisieren sind neue Technologien im Bereich des Prozess- und Simulationsdatenmanagement erforderlich.

4.3.1 Die Rolle des Simulationsdatenmanagements

Getrieben durch die derzeitigen Anforderungen zur Reduktion von Zeit und Kosten, sowie zur Steigerung der Qualität, nimmt der Druck auf das gesamte Entwicklungsteam im Automotiven Bereich ständig zu. Vor allem die Reduktion der Entwicklungszeit, bis hin zum SOP¹ ist von entscheidender Bedeutung. Dies kann man durch ein Resultat einer McKinsey Studie, wie sie in [SCH06c] dargestellt ist, verdeutlichen. Eine Verzögerung des SOP und des damit verbundenen Produktlaunches reduziert den erzielten Gewinn um 33%, eine Überschreitung der Produktionskosten wirkt sich ebenfalls stark gewinnreduzierend aus, wie es in Abbildung 4.20 ersichtlich ist. Hingegen führt eine deutliche Überschreitung der Entwicklungskosten nur zu marginalen Gewinneinbußen. Somit ist die Reduktion der Entwicklungszeit mit höchster Priorität zu sehen. Speziell in der Serienentwicklung werden durch die zunehmenden Anforderungen in der Fahrzeugentwicklung die Anzahl der durchzuführenden Analysen und Simulationen weiter zunehmen, hier muss man die Prozesse standardisieren und automatisieren und dadurch die Zeiten für die Entwicklung reduzieren.

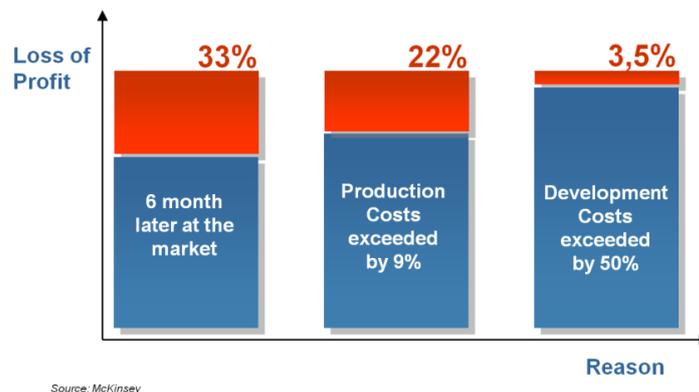


Abbildung 4.20: Gewinnreduktion durch Überschreiten von Zeiten und Kosten [SCH06c]

In [KRA01] ist der Simulationsprozess ausführlich analysiert und bewertet dargestellt. Ziel dieser Machbarkeitsstudie ist es, Ansätze des Simulationsdatenmanagements auf Basis von STEP² zu untersuchen. Als Teilergebnis der Studie ist die zeitliche Verteilung der Simulationstätigkeiten detailliert dargestellt. Wie in Abbildung 4.21 zu erkennen ist, stellt das Sammeln der Daten mit insgesamt 51% den größten Anteil an der notwendigen Simulationszeit dar. Bei den Befragten werden vor allem Gründe wie

- zeitliche Verzögerungen,
- fehlerhafte Daten,
- falsche Version / Variante,

¹ SOP: Start Of Production, einer der wichtigsten Meilensteine im Rahmen der Fahrzeugentwicklung

² STEP: STandard for the Exchange of Product model data, ist ein Standard zur Beschreibung von Produktdaten. Diese Beschreibung umfasst neben den physischen auch funktionale Aspekte eines Produktes. STEP ist formal in dem ISO-Standard 10303 definiert.

- manuelle Nacharbeiten,
- fehlende Daten und
- mangelhafte Möglichkeiten zur Datenübertragung

als besonders kritische Faktoren für das Unternehmen genannt. Diesen Faktoren und dem daraus entstehenden Risiko einer Falschentwicklung oder zeitlichen Verzögerung, kann man durch systematische Prozesse und einer vollständigen Versorgung der Entwicklungsingenieure mit allen relevanten Daten entgegenwirken.

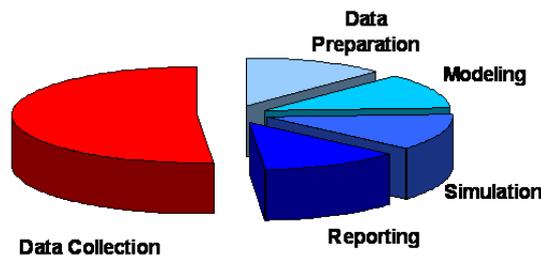


Abbildung 4.21: zeitliche Aufteilung der Tätigkeiten bei Simulationstätigkeiten

Hier sind vor allem eine zentrale und vollständige Datenbasis für die unterschiedlichen Disziplinen zu nennen. Dadurch können doppelte Teilprozesse zur Datenbearbeitung reduziert, sowie der Zugriff auf mangelhafte oder fehlerhafte Daten vermieden werden. Durch die zentrale Verwaltung der Resultate sowie der Möglichkeit der Integration von Versuchsdaten kann das Produktwissen systematisch verbessert, und vor allem der Entwicklungs- und Entscheidungsprozesse beschleunigt werden.

4.3.2 Einordnung des Simulationsdatenmanagements

Die Verwendung eines modernen CAD-Systems kann die Integration der Bauteilgeometrien, einzelner Features oder auch Baugruppeninformationen in ein PDM¹-System² (Produktdatenmanagement-System) sicher stellen. Zusätzlich zu den geometrischen Informationen sind hier vor allem die Produkt- und Bauteileigenschaften, die sogenannten Metadaten, relevant. Desweiteren müssen Produktstrukturen sowie die Verbindungstechniken zwischen den einzelnen Bauteilen betrachtet und abgebildet werden. Digital Mock Up Methoden (DMU) können weitere notwendige Informationen, wie Bauraum, Ergonomie oder relevante Hüllflächen im PDM-System abbilden, wodurch eine Absicherung des Bauteils oder der Baugruppe hinsichtlich der geometrischen Eigenschaften erreicht wird.

Eine weitaus größere Herausforderung ist das Management der Simulationsdaten. Hier kommt es durch die Vielzahl an Entwicklungsmethoden zu einem deutlich unterschiedlichen Informationsbedarf für die einzelnen Disziplinen. Die wichtigsten Punkte eines Simulations-

¹ Produktdatenmanagement (PDM) ist das Management des Produkt- und Prozessmodells mit der Zielsetzung, eindeutige und reproduzierbare Produktkonfigurationen zu erzeugen. [EIG09]

² PDM-Systeme sind IT-Lösungen zur Umsetzung des Produktdatenmanagements und Teil des betrieblichen Informations- und Koordinationssystems

datenmanagements sind dabei die Verfügbarkeit der Simulationsdaten für alle Beteiligten am Produktentwicklungszyklus, die Wiederverwendung von Simulationserfahrungen, die transparente Integration des Simulationsprozesses in den gesamten Entwicklungsprozess und die Zusammenarbeit mit Zulieferern und Kunden, wie es am Beginn dieses Abschnittes kurz beschrieben wird.

In Abbildung 4.22 ist die Rolle des Produktdatenmanagements, als auch die Berücksichtigung der funktionalen Informationen in der virtuellen Produktentwicklung als dritte Stufe der Integration zu sehen – dies ist der virtuelle Prototyp.

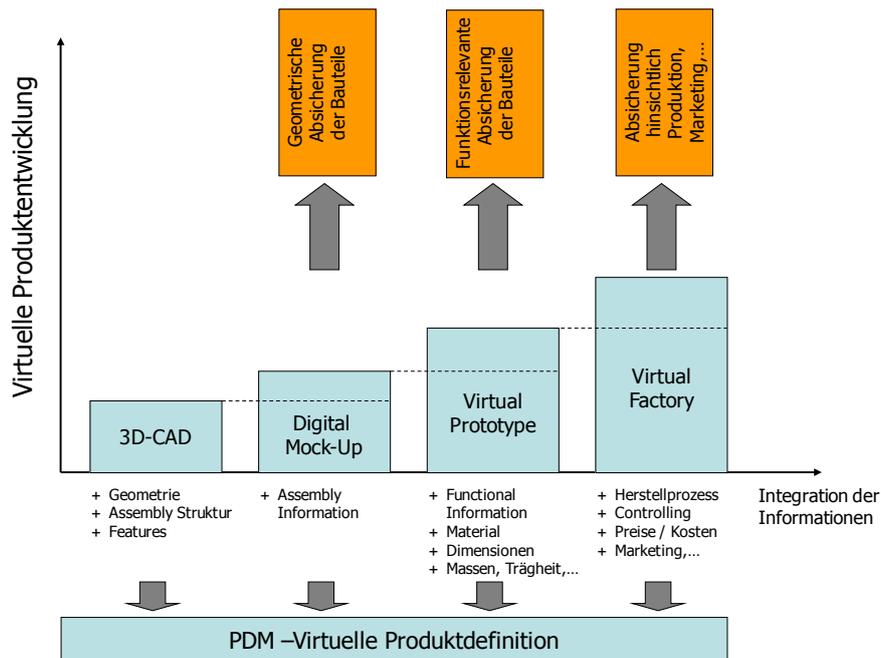


Abbildung 4.22: Integration der Informationen während der Produktentwicklung

In der Industrie wird dieser Schritt jedoch nicht mit einem zentralen virtuellen Prototypen abgebildet, vielmehr werden je nach Anforderungen unterschiedliche virtuelle Prototypen (VPT) eingesetzt. Beispielsweise werden beim OEM Porsche derzeit 14 unterschiedliche digitale Prototypen verwendet, um die verschiedenen Funktionen des Fahrzeuges abzusichern [SCH07d]. Für Einzelnen dieser VPT existieren Methoden zum Management der Simulationsdaten und zur Steuerung der Prozesse, ein übergreifendes Simulationsdatenmanagement kommt nicht zum Einsatz. Eine prozess- und disziplinübergreifende Integration der relevanten Daten der virtuellen Prototypen stellt das nächste zu erreichende Ziel dar. Wie in Abbildung 4.22 dargestellt, kann dadurch eine funktionsrelevante Darstellung und Absicherung des Produkts ermöglicht werden. Eine Ausdehnung der Informationen über den gesamten Produktlebenszyklus schließt ein vollständiges Produktdatenmanagement ein, in diesem Fall wird von Product-Lifecycle-Management (PLM¹) als strategisches Konzept zum Management eines Produkts gesprochen.

¹ Product-Lifecycle-Management (PLM, deutsch: Produktlebenszyklusmanagement) bezeichnet in dieser Arbeit ein ganzheitliches und strategisches Konzept zum Management eines Produkts, welches IT-Systeme, Methoden, Prozesse und Organisationsstrukturen beinhaltet.

Heutige PDM-Systeme sind vor allem auf die geometrische Daten (Digital Mockup, DMU) und Stücklisten ausgerichtet. Zudem wird nur sehr limitiert Wissen und Erfahrung bereitgestellt und genutzt. Mit dem zunehmend funktionsorientierten Ansatz in der zukünftigen Fahrzeugentwicklung werden sich die Anforderungen des Entwicklers deutlich ändern. Funktionsorientierte Sichten und Datenrepräsentationen, eine geeignete Produktstruktur und neue Prozesse - die die klassische Welt (z.B. Thermodynamik, NVH, Fahrzeugsicherheit und -dynamik) mit der E/E Welt verbinden - werden benötigt (multi-disziplinärer Prozess und Datenmodell). Daher wird eine zukünftige PLM-Lösung¹ den Anwender nicht nur dabei unterstützen, umfassende funktionale Sichten auf das ganze Fahrzeug zu bekommen, sondern zudem Wissen und adäquate Informationen bereitstellen.

4.3.3 Systematische Prozess- und Simulationsdatenmanagement

Strukturierung der Simulationsdaten

Der Aufbau von komplexen Simulationsmodellen stellt eine enorme Herausforderung an die CAE-Entwicklungsabläufe dar. Um die Daten geordnet abzulegen und auch mit sehr guter Performance wieder darauf zuzugreifen, müssen diese kategorisiert abgelegt werden. Damit können mithilfe von Suchalgorithmen Anfragen durchgeführt werden, sowie die Datenhaltung durchgängig und transparent für das gesamte Team zur Verfügung gestellt werden. Dies erfolgt auf Basis von gesetzten Attributen, welche beispielsweise der Kunde, das Projekt, Projektcode, Lastfall oder der User sein können. In Abbildung 4.23 ist exemplarisch dargestellt, wie ungeordnete Daten in Kategorien unterteilt werden, oder beispielsweise mit Tags für die erweiterte Suche versehen werden können.

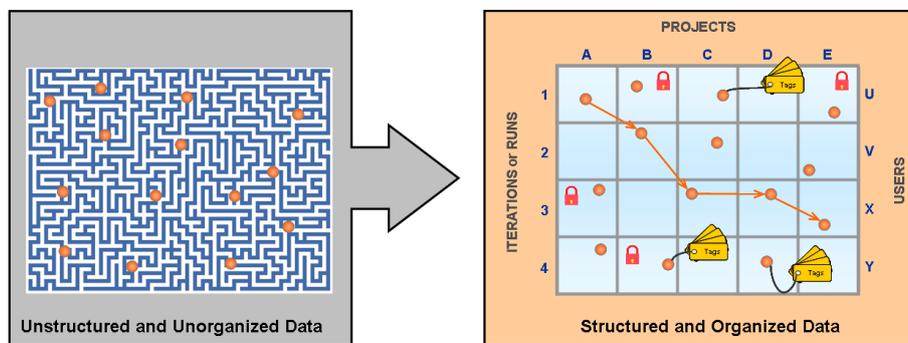


Abbildung 4.23: Ansätze für die Organisation der Simulationsdaten [SCH07b]

Im Bereich der FEM-Simulation können die Daten basierend auf den einzelnen Schritten des Simulationsprozesses gegliedert werden, beginnend bei den Daten der einzelnen Bauteile, über rechenfähige Solver Decks bis hin zum Reporting und der Bewertung der einzelnen Simulationstasks. Eine Strukturierung der im Rahmen der Simulationen anfallenden Daten ist in Abbildung 4.24 dargestellt, dabei wird ausgehend von unstrukturierten Daten die Gliederung in Projekte, Iterationsstufen und auch Teilschritte des Simulationsprozesses gezeigt.

¹ PLM Solution, PLM Lösungen: bilden den funktionalen und administrativen Backbone und sind als Erweiterung von PDM-Systemen entstanden [EIG09].

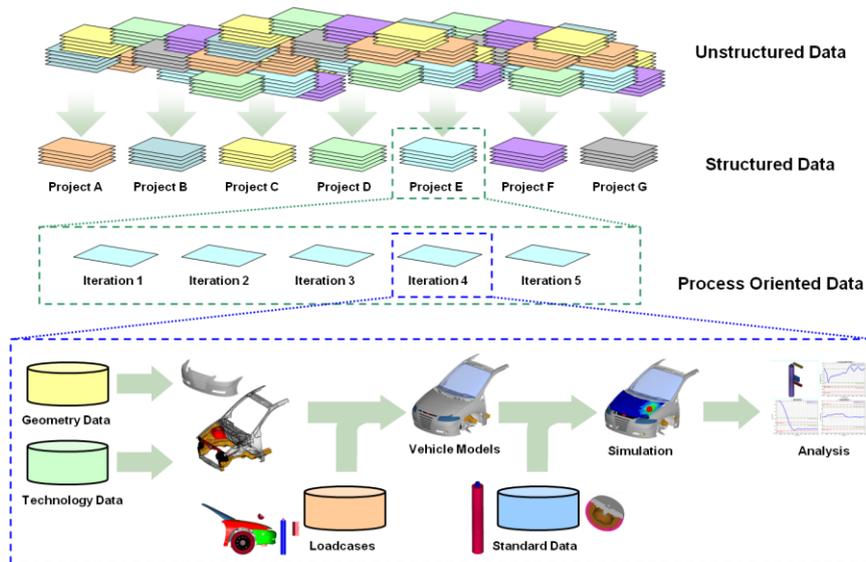


Abbildung 4.24: Strukturierung der Daten im Simulationsprozess, Beispiel Fußgängerschutz

Datenmanipulation für den Modellaufbau

Basierend auf einem zentralen Simulationsdatenmanagement können in Kombination mit voll- oder teilautomatisierten Prozessabläufen der Entwicklungsprozess enorm verkürzt, und in Hinblick auf die Qualität der vorliegenden Resultate und Daten deutlich verbessert werden.

- *Data Management, Batch Meshing and Assembling Functionality*
 - *Usage of product configuration structure*
 - *Material definition files*
 - *Import weld files*
 - *Manage part mesh variants*
 - *Manage CAE assemblies*
 - *Centralized data management*
 - *Data export and import*

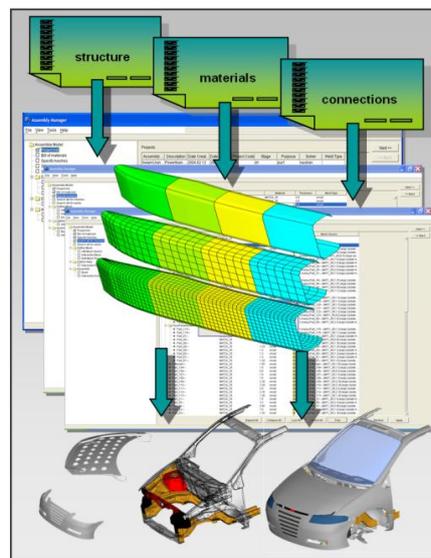


Abbildung 4.25: Datenmanipulation und –organisation für den Modellaufbau

Hier sind drei Schwerpunkte zu nennen: das Management der Daten inklusive dem Import und Export der relevanten Daten, das Manipulieren oder Erzeugen von Daten, sowie die strukturierte Kombination von Daten.

In Abbildung 4.25 sind einzelne Schritte der Datenmanipulation und –organisation schematisch dargestellt. Als Inputdaten werden hier die Informationen der Produktstrukturen, technologische Daten der einzelnen Bauteile bzw. Materialien und Informationen zu den einzelnen Verbindungen zwischen den Bauteilen verwendet. Abhängig von den einzelnen

Lastfällen und den daraus definierten Anforderungen werden einzelnen Baugruppen, Module oder Gesamtfahrzeugmodelle automatisch aufgebaut.

Solving und Post-Processing

In weiteren Prozessschritten werden die rechenfähigen Modelle inklusive eventuell notwendiger Standardberechnungsmodelle, wie beispielsweise den Impaktoren für den Fußgängerschutz, zu den endgültigen Lastfallmodellen zusammengestellt.

Durch eine Kombination mit Jobmanagement Systemen können die vorhandenen Rechnerressourcen optimal ausgenutzt werden und anschließend die berechneten Resultate in das Simulationsdatenmanagement importiert werden. Automatische Reporterstellung und Methoden zur Visualisierung der Resultate schließen den Simulationsprozess ab. In Abbildung 4.26 ist ein Überblick über den Simulationsprozess am Beispiel des Kopfanpralls dargestellt. Dabei sind zwei unterschiedlich Sichtweisen auf den gesamten Ablauf zu erkennen, einerseits die Betrachtung der Daten zu den einzelnen Schritten, andererseits die dafür notwendigen Prozessschritte, die teil- oder vollautomatisiert ablaufen können.

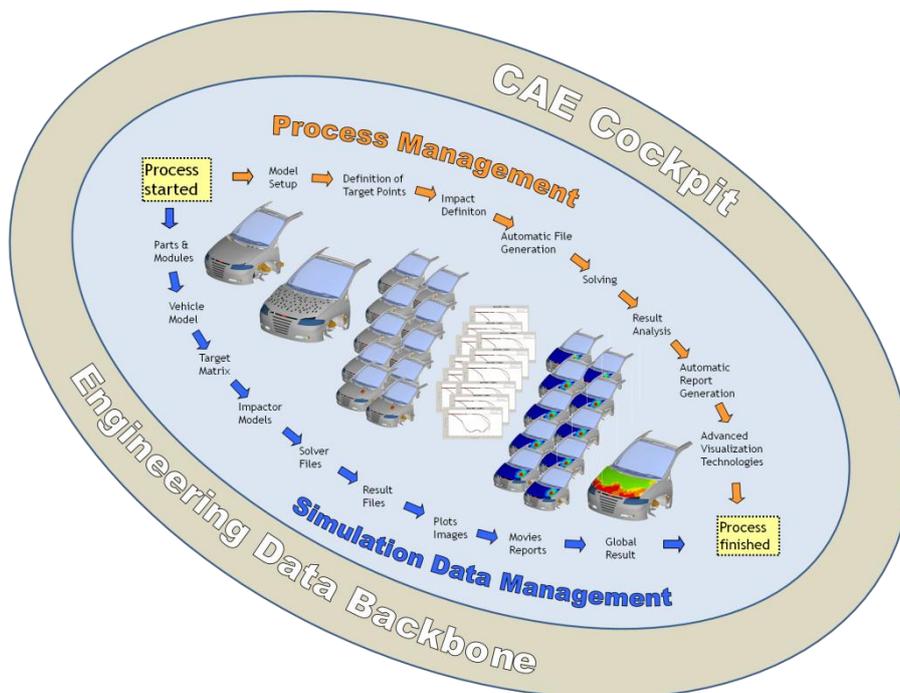


Abbildung 4.26: Überblick des Simulationsprozesses Kopfanprall

Die Vorteile und das Potential des Prozess- und Simulationsdatenmanagement werden vor allem bei der Betrachtung der Themen Variantenmanagement und Lastfallmanagement deutlich. In Abbildung 4.27 sind Simulationsabläufe mit unterschiedlichen Varianten und unterschiedlichen gesetzlichen Anforderungen beim Kopfanprall dargestellt. Hier kann man sehr deutlich erkennen, dass durch eine systematisierte Modellerstellung und ein Lastfallmanagement die Entwicklungsaufwände hinsichtlich Entwicklungszeit und Qualität optimiert werden können, da die einzelnen Lastfälle automatisiert durchlaufen und anschließend die Resultate komplett automatisiert bewertet werden können.

Die detaillierte Darstellung der Implementierung eines Prozess- und Simulationsdatenmanagements anhand der Fußgängerschutzentwicklung ist in Abschnitt 5 dargestellt.

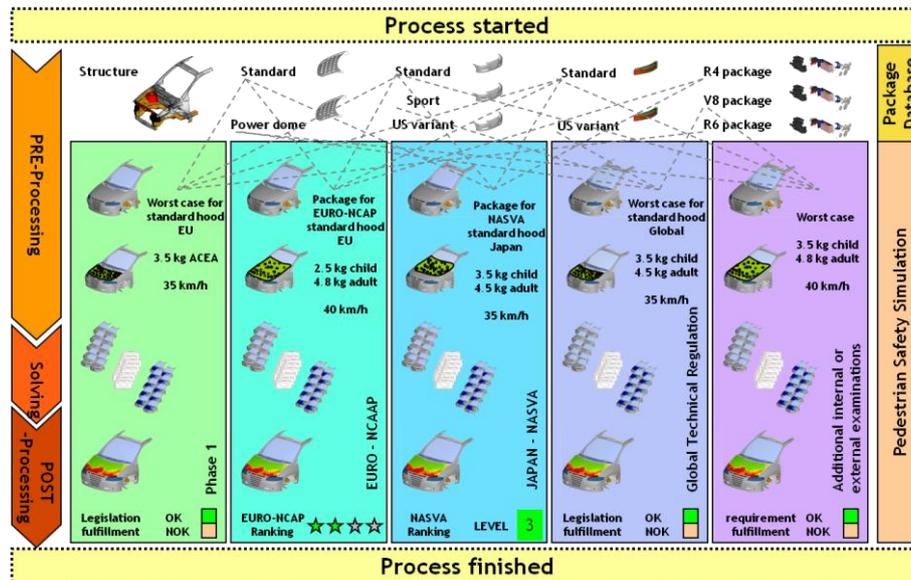


Abbildung 4.27: Kombination von Varianten und Anforderungen, Beispiel Kopfanprall

4.4 Co-Simulation zur disziplinübergreifenden Entwicklung

Speziell um den zukünftigen Anforderungen an die Fahrzeuge gerecht zu werden, und auch um das Potential der technischen Lösungen vollständig auszuschöpfen, müssen einzelne Teilsysteme gemeinsam betrachtet, und dadurch schließlich das Gesamtsystem optimiert werden. Der zunehmende Anteil der elektrischen und elektronischen Systeme im Fahrzeug sorgt dafür, dass die übergreifenden Betrachtungen nochmals an Bedeutung zunehmen. Sensoren und Aktuatoren leisten gemeinsam mit Regelalgorithmen einen entscheidenden Beitrag zur Erfüllung der Kunden- und Sicherheitsfunktionen in modernen Fahrzeugen. Zwei wesentliche Aspekte zum mechatronischen Fahrzeug müssen betrachtet werden: die thermischen, mechanischen und elektrischen Energieflüsse, sowie der softwarebezogenen Informationsfluss zwischen Aktuatoren und Sensoren. Mithilfe umfassender mechatronischer Fahrzeugmodelle werden die unterschiedlichen Energieflüsse im Fahrzeug betrachtet und analysiert, ebenso müssen die Informationsflüsse und vor allem deren Konsistenz im Gesamtsystem Software und Hardware beachtet werden.

Solche übergreifenden Entwicklungsmethoden, welche einzelne eng verknüpfte und sich beeinflussende Teilmodelle zu einer gesamthaften Systembetrachtung kombinieren, werden unter dem Begriff Co-Simulation zusammengefasst. Diese Methoden spielen vor allem im modernen Entwicklungsablauf komplexer Systeme eine zunehmend wichtigere Rolle. In diesem Abschnitt werden bereits umgesetzte Anwendungsbeispiele als auch neue Ansätze zur Simulation und Absicherung technischer Systeme im Bereich der Fahrzeugsicherheit dargestellt.

4.4.1 Aspekte der Co-Simulation

In einigen Fällen werden bereits gekoppelte Simulationen von Teilsystemen mit einer gemeinsamen Betrachtung der Aufgabenstellung durchgeführt, und somit erste Schritte einer disziplinübergreifenden Betrachtung im Entwicklungsprozess umgesetzt. Sehr häufig werden dabei zwei Teilsysteme miteinander gekoppelt, beispielsweise die Fahrdynamiksimulation und unterschiedliche Regelsysteme, wie Fahrwerkregelsysteme oder auch Fahrerassistenzsysteme. Zumeist kommen dabei fest gekoppelte Einzellösungen zum Einsatz, dies bedeutet, dass fixe Schnittstellen und Kontrollalgorithmen zwischen den beteiligten Programmen implementiert werden. Problematisch sind solche Lösungen vor allem dann, wenn vom Standard abweichende Fragestellungen betrachtet werden sollen. Ebenso können in Bezug auf Erweiterbarkeit (neue Versionen, neue Schnittstellen, zusätzliche Softwaretools) oder Flexibilität (Plattform, Betriebssystem, verteiltes Rechnen) sehr rasch die Grenzen der umgesetzten Lösung erreicht werden. Bei den verbreiteten Lösungen werden meist nur zwei Programme miteinander gekoppelt, die Erweiterung auf drei oder mehr unabhängige Softwaretools ist nicht vorgesehen.

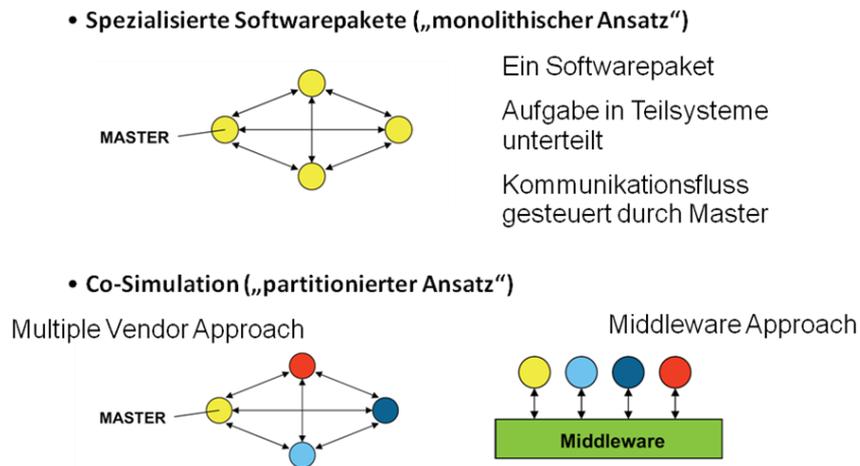


Abbildung 4.28: unterschiedliche Kopplungsansätze [LAN08]

Für einzelne disziplinübergreifende Fragestellungen werden eigens entwickelte Softwaretools eingesetzt. Mit diesen Paketen können komplexe Aufgaben aus dem Bereich Energiemanagement oder aktive Sicherheit simuliert werden, jedoch sind diese Lösungen häufig eigenständige Anwendungen mit eingeschränkten Kombinationsmöglichkeiten. Speziell für die Gesamtfahrzeugsimulation sind solche Spezialanwendungen aufgrund fehlender Kompatibilität nicht geeignet. In Abbildung 4.28 ist ein Überblick über unterschiedliche Kopplungsansätze dargestellt, wobei prinzipiell zwei Ansätze zu unterscheiden sind, der monolithische Ansatz und der partitionierte Ansatz. Beim monolithischen Ansatz werden, wie oben kurz dargestellt, verschiedene Disziplinen in einem einzelnen Softwarepaket vereint und somit eine komplexe Aufgabenstellung mit einem Einzelsystem gelöst. Geeignete Algorithmen steuern den gesamten Simulationsablauf, Datenaustausch mit externen Simulationsprogrammen ist nicht notwendig. Dabei werden einzelne Themen oft nur mit einfachen Modellen abgebildet, detaillierte Betrachtungen mit einer hohen Prognosegüte sind zumeist nicht möglich.

Beim partitionierten Ansatz, der Co-Simulation, muss man zwischen einem Multiple Vendor Approach und einem Middleware Approach unterscheiden. Beim Multiple Vendor Approach übernimmt eines der beteiligten Simulationspakete die Rolle des Masters, beim Middleware Approach wird eine neutrale Simulations- und Datenplattform als Master für die Co-Simulation eingesetzt. Die Vorteile eines Middleware Approaches sind die neutrale Kopplung mehrerer Simulationspakete, sowie die Flexibilität unterschiedliche Szenarien und Anwendungen miteinander zu kombinieren. Außerdem kann durch einen solchen neutralen Ansatz auch eine Kopplung mit unterschiedlichen Detaillierungsgraden realisiert werden. Somit können, beginnend von einer stark vereinfachten Simulationsaufgabe, bis hin zu einer sehr detaillierten Simulation, die einzelnen Module sukzessive durch detaillierte Modelle ersetzt und somit die Prognosefähigkeit erhöht werden.

Die wesentlichsten Vor- und Nachteile der beiden unterschiedlichen Kopplungsansätze sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

Tabelle 4.1: Überblick über Vor- und Nachteile unterschiedlicher Kopplungsansätze

+ Vorteil / o Neutral / - Nachteil	Spezialisierte Softwarepakete	Co-Simulation
Softwareumgebung	o Nur ein Programmpaket, verschiedene Teilsysteme	+ Softwarepakete wählbar (Voraussetzung: Schnittstelle zur Kopplung vorhanden)
Datenmanagement	+ Parameteraustausch integriert	- Co-Simulationsplattform zum Datenaustausch notwendig
Numerische Verfahren	- Numerische Lösungsverfahren für die Teilsysteme gleich	+ Numerische Lösungsverfahren dem Teilsystem angepasst
Flexibilität	- Flexibilität und Erweiterbarkeit (Hinzufügen eines neuen Teilsystems) eingeschränkt	+ Flexibilität und Erweiterbarkeit hinsichtlich neuer Teilsysteme, einfache Erweiterbarkeit
Aufwand Modellerstellung	- Vorhandene Modelle müssen konvertiert oder neu erstellt werden	+ Vorhandene Modelle können verwendet werden
Kopplung	o Starke Kopplung der Teilsysteme	o Schwache Kopplung der Teilsysteme
Rechenzeit und Stabilität	+ Rechenzeit und -stabilität durch monolithisches System sehr gut	- Rechenzeit und -stabilität hängt sehr von Teilmodellen ab

4.4.2 Unabhängige Co-Simulationsplattformen für die Entwicklung

Speziell bei der Gesamtfahrzeugsimulation müssen mehrere Teilmodelle miteinander gekoppelt werden um die Eigenschaften des Fahrzeuges abzubilden. Zumeist werden die einzelnen Modelle in unterschiedlichen Fachabteilungen oder auch unterschiedlichen Standorten entwickelt und aufgebaut, jedes Modell beschreibt dabei die Systemeigenschaften für die jeweilige Disziplin. Beispiele hierfür sind die Fahrdynamik und

unterschiedliche Regelsysteme (z.B. ABS, ESP, ADAS) oder auch das thermodynamische System des Gesamtfahrzeuges (Antrieb, Kühlung, Klimatisierung, Batterie,...). Die einzelnen Modelle werden in der Regel mit unterschiedlichen numerischen Methoden und Simulationsprogramme abgebildet. Hinzu kommt, dass die Simulationsprogramme oft auf unterschiedlichen Architekturen und Betriebssystemen zum Einsatz kommen. Bei einer gekoppelten Simulation müssen diese Gegebenheiten und die damit verbundenen Anforderungen berücksichtigt werden.

Beim Middleware Approach ist die Co-Simulationsplattform unabhängig von den eingesetzten Simulationsprogrammen und Modellen. Die Co-Simulationsplattform übernimmt dabei die Rolle einer neutralen Steuereinheit, mit der die einzelnen Simulationsprogramme gesteuert werden, und vor allem das Management der auszutauschenden Daten zwischen den einzelnen Simulationspaketen sichergestellt werden kann. Bei der Steuerung der einzelnen Teilsysteme muss auf die zeitsynchrone Steuerung geachtet werden, außerdem müssen dabei auch die Stabilität der einzelnen Teilsysteme und der Gesamtsimulation geprüft werden. Von entscheidender Bedeutung bei der Kopplung sind auch die physikalisch korrekte Vernetzung der einzelnen Teilmodelle, sowie intelligente Algorithmen zum Austausch der Informationen. Dies bedeutet, dass stets die physikalischen Erhaltungsgrößen wie Masse, Impuls und Energie betrachtet werden müssen. Die Forderungen an eine unabhängige Co-Simulationsplattform können wie folgt zusammengefasst werden:

- Plattform- und Betriebssystemübergreifender Datenaustausch
- Unabhängigkeit von Simulationsprogrammen und Programmversionen
- Modularer Aufbau der Co-Simulationsumgebung
- Flexibilität in der Anzahl der auszutauschenden physikalischen Parameter
- Anwendung unterschiedlicher Kopplungsalgorithmen, um Stabilität der Einzelsimulationen und der Gesamtsimulation sicher zu stellen
- Zeitsynchrone Steuerung der einzelnen Teilmodelle ohne Masterprogramm
- Berücksichtigung von physikalischen Erhaltungsgrößen zwischen Teilmodellen

ICOS als Beispiel einer Kopplungsplattform

Im Rahmen dieser Arbeit wird das Softwaretool ICOS¹ als die Co-Simulationsplattform vorgestellt. Die Simulationsplattform wurde am Virtuellen Fahrzeug im Rahmen von geförderten Forschungsprojekten entwickelt. Ursprünglich wurden mit dieser Plattform unterschiedliche Simulationsprogramme im Bereich der Thermodynamik gekoppelt. Schrittweise wurden auch Schnittstellen zu Simulationspakete für die Fahrdynamik und weitere numerische Methoden integriert. In dieser Arbeit werden Ansätze für die Umsetzung einer Simulations- bzw. Entwicklungsplattform für die integrierte Sicherheit auf Basis von ICOS skizziert.

¹ ICOS: Independent CO-Simulation

In Abbildung 4.29 sind die Einzelschritte für die Co-Simulation mit ICOS schematisch dargestellt. Dabei wird das Gesamtproblem in einzelne Sub-Systeme unterteilt (a), für diese können unterschiedliche Simulationsprogramme zur Abbildung der Eigenschaften und des Verhaltens eingesetzt werden. Jedes Simulationsprogramm wird über die programm-spezifischen Schnittstellen (b) mithilfe eines an die Kommunikationsroutinen angepassten Wrappers (c) mit der Plattform verbunden. Die Systeme werden miteinander gekoppelt, um die Interaktion und Wechselwirkung zwischen diesen zu betrachten (d). Bei der Kopplung der unterschiedlichen Sub-Systeme wird der Austausch der einzelnen physikalischen Parameter zwischen den Softwaretools erreicht. Dabei muss auf den zeitabhängigen Datenaustausch, die Interpolationen und Algorithmen zwischen den Zeitschritten sowie die Synchronisation der Co-Simulationsumgebung geachtet werden (e).

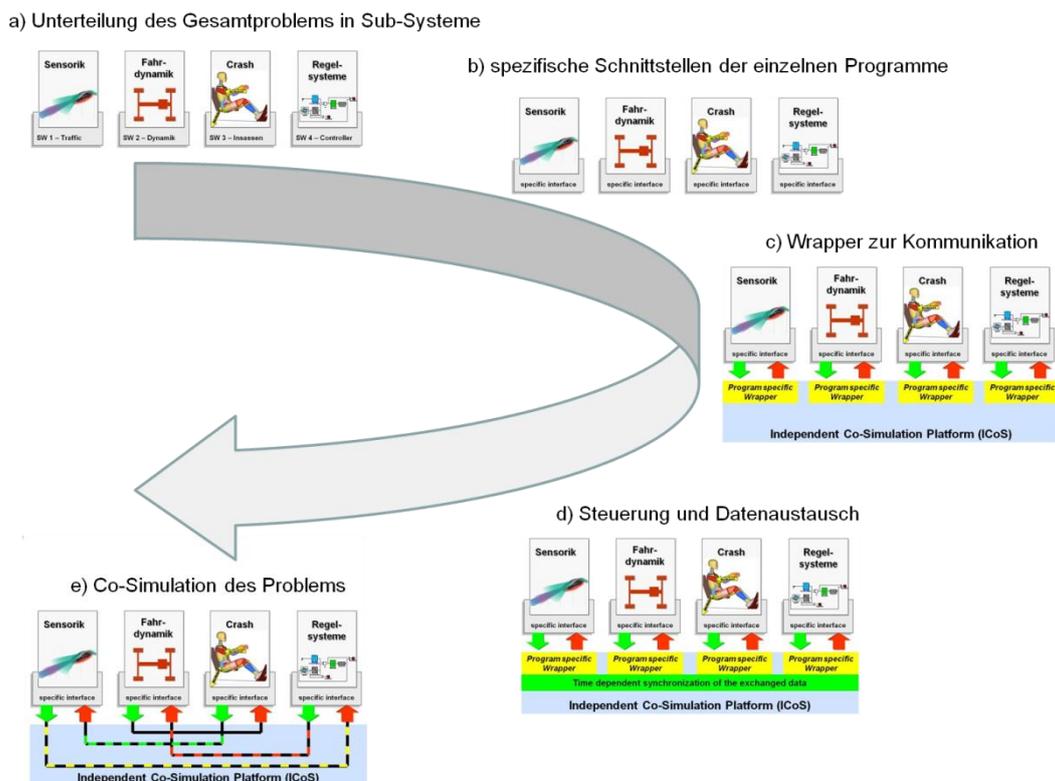


Abbildung 4.29: notwendige Einzelschritte bei der Co-Simulation mit ICOS

Verifikation der Kopplungsplattform anhand des thermischen Gesamtfahrzeugs

Im Rahmen mehrerer Forschungsvorhaben wurde die Co-Simulationsplattform ICOS zur Simulation komplexer Aufgabenstellungen eingesetzt. Hier soll ein typisches Beispiel aus der Gesamtfahrzeugsimulation dargestellt werden, um die Möglichkeiten der Plattform zu demonstrieren [LAN08, PUN07, SEI08].

In Abbildung 4.30 ist das Gesamtfahrzeug aus der Sicht des Thermischen Managements dargestellt, dabei sind die einzelnen Bereiche, die zum Thermischen Gesamtfahrzeug beitragen, zu erkennen. In Abbildung 4.31 sind die vier wesentlichen Module zu einer gekoppelten Simulation zusammengeschaltet: ein 1d-Simulationsmodell des Motors, welches mit dem Simulationspaket Boost abgebildet ist, ein Fahrdynamik- und

Antriebsstrangmodell im Simulationspaket Cruise, das Kühlpaket mit Kuli und ein vereinfachtes thermisches Netzwerk, welches mit Matlab realisiert ist.

Beim Demonstrationsbeispiel in [PUNT07] wird das Aufheizverhalten des Motors beim NEDC¹ simuliert. Im Rahmen der Entwicklungstätigkeiten wird dieser Lastfall mithilfe von Versuchen bewertet, entsprechende Simulationswerkzeuge sind nicht in die Standardentwicklungsprozesse integriert. Eine gekoppelte Simulation kann hier Abhilfe schaffen. In diesem Beispiel liefern die Gesamtfahrzeugversuche Messdaten für die Verifikation der komplexen Aufgabenstellung. Für die Verifikation werden die detaillierten Modelle der einzelnen betrachteten Systeme, welche bereits auf Komponentenebene entsprechend validiert wurden, eingesetzt und miteinander in der Co-Simulationsplattform gekoppelt. Herausforderungen bei diesem Beispiel sind der zeitgesteuerte Ablauf der einzelnen Simulationspakete sowie der Austausch der relevanten thermodynamischen Größen. Mit der Co-Simulation können sehr gute Korrelationen zwischen Simulation und Versuch erzielt werden. Ohne entsprechende Simulationswerkzeuge wären solche komplexen und systemübergreifenden Themenstellungen nicht simulierbar. Dies ist jedoch zwingend notwendig, um die technischen Systeme gesamtheitlich auszulegen und in weiterer Folge zu optimieren.

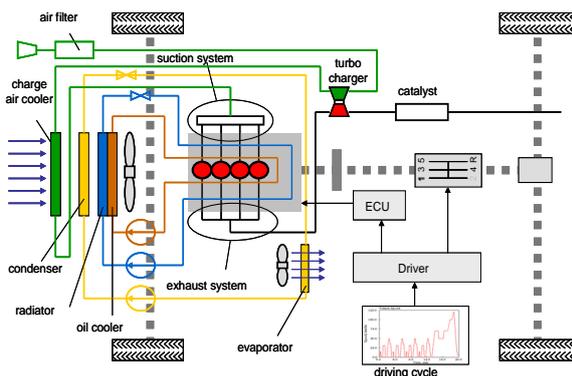


Abbildung 4.30: Gesamtsystem aus Sicht des Thermischen Managements [PUN07]

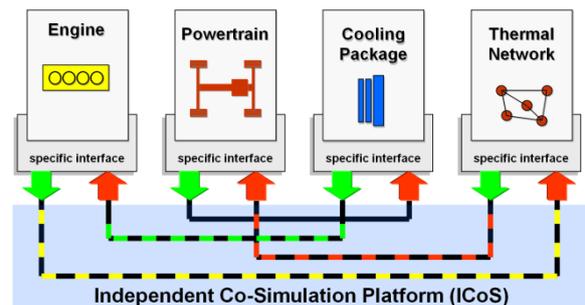


Abbildung 4.31: Gekoppelte Modelle für das Demonstrationsbeispiel [PUN07]

4.4.3 Anwendung der Co-Simulation bei der integrierten Sicherheit

Ähnlich wie bei thermodynamischen Fragestellungen kann die Co-Simulationsplattform ICOS auch für die Fahrdynamik oder die integrierte Sicherheit eingesetzt werden. Die Fragestellungen in diesen Disziplinen sind durch die starke Integration der Elektrik und Elektronik nicht mehr mit einem Simulationswerkzeug zu bearbeiten, die Disziplinen der Sensorik, Aktuatorik und der Regelungstechnik müssen in die klassischen Entwicklungswerkzeuge integriert oder damit gekoppelt werden.

¹ New European Driving Cycle: definierter Fahrzyklus um Energieverbräuche bei Kraftfahrzeugen zu messen und zu vergleichen

Für Anwendungen im Bereich der Fahrzeugdynamik existieren Simulationspakete, bei denen entsprechende Schnittstellen zu mathematischen Tools wie Matlab[®] vorhanden sind. Die wichtigsten Vertreter dabei sind Entwicklungswerkzeugen wie ADAMS[®] von MSC, vedyna[®] von TESIS dynaware oder Carmaker[®] von IPG. Speziell für Fragestellungen im Bereich der Integrierten Sicherheit müssen Tools in den nächsten Jahren weiterentwickelt werden, derzeit können nur sehr wenige Werkzeuge als umfassende Entwicklungsumgebung eingesetzt werden. Bei einigen der oben genannten Werkzeuge sind für die Themen Sensorik oder Verkehrssimulation entsprechende Module vorhanden, damit können bereits sehr gut Fahrerassistenzsysteme entwickelt werden.

Auf dem Gebiet der passiven Sicherheit existieren unterschiedliche Werkzeuge auf Basis der FEM und MKS, hier sind die Codes LS-Dyna[®] von LSTC, PAM-CRASH[®] von ESI, Abaqus[®] von Dassault Systèmes, Radioss[®] von Altair oder Madymo[®] von TNO zu nennen. Desweiteren gibt es speziell für die Unfallrekonstruktion technische Simulationswerkzeuge, wie beispielsweise PC-Crash[®] von DSD, mit deren Hilfe die Fahrmanöver, die Verkehrssituation und die detaillierte Unfallkonstellationen entsprechend nachgestellt werden können.

Bei der Simulation der elektrischen und elektronischen Komponenten werden in der Industrie unterschiedliche Werkzeuge eingesetzt, hier sei beispielsweise das Werkzeug SyAD[®] von CISC genannt, mit dessen Hilfe die gesamte Mikroelektronik inklusive der Kommunikation im Fahrzeug simuliert werden kann.

Für die Entwicklung innovativer Sicherheitssysteme ist ein Zusammenwirken sämtlicher technischer Disziplinen notwendig, vom Fahren in Standardsituation, über Fahrmanöver in kritischen Fahrsituationen, aktive und crash-aktive Sicherheitssysteme im Fahrzeug, passive Sicherheitssystem zum Schutz der Insassen bis hin zur Kommunikation, um andere Verkehrsteilnehmer entsprechend zu informieren. Um die Interaktionen der einzelnen Systeme bei diesen komplexen Szenarien auszulegen und vor allem hinsichtlich der technischen Anforderungen abzusichern, sind gekoppelte Simulationsmethoden unumgänglich. In diesem Abschnitt werden Ansätze für eine Co-Simulationsplattform auf Basis von ICOS dargestellt, und vor allem das Zusammenwirken der einzelnen Systeme aufgezeigt.

Herausforderungen bei der Entwicklung integrierter Sicherheitssysteme

In Abbildung 4.32 ist, nach einer Studie von Mercer Management Consulting, das Marktpotential von unterschiedlichen Sicherheitssystemen dargestellt. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass vor allem für neuartige Sicherheitssysteme - wie Fahrerassistenzsysteme, Sicherheitselektronik für den Insassen, aber auch Passantenschutz oder Bremseselektronik - ein sehr hohes Potential vorhanden ist, diese jedoch noch entsprechend erforscht und weiterentwickelt werden müssen.

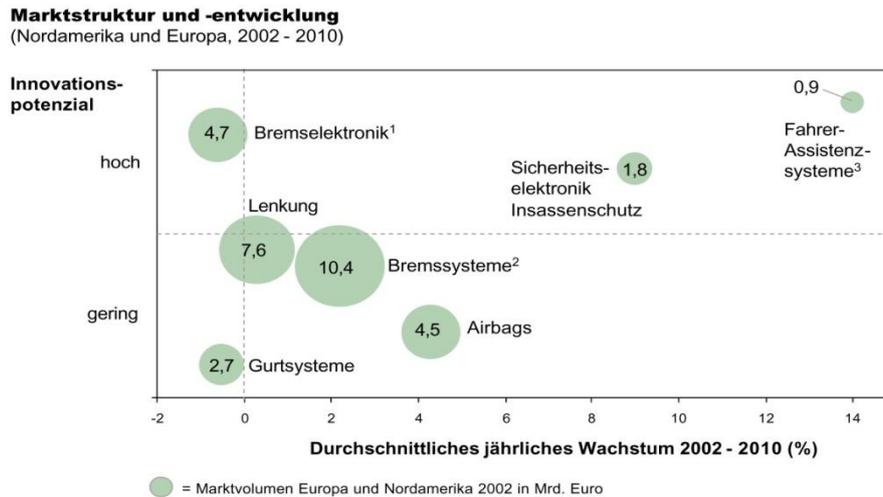


Abbildung 4.32: Marktstruktur und -entwicklung im Bereich Fahrzeugsicherheit [MER04]

Heutzutage werden zum Schutz der Insassen vor allem unfallmindernde Maßnahmen wie Gurte, Straffer, Gurtkraftbegrenzer und Airbags in die Fahrzeuge implementiert. Diese passiven Sicherheitselemente und –systeme haben in den letzten Jahrzehnten für die Insassen von Fahrzeugen ein hohes Maß an Sicherheit erwirkt. Aus der Sicht der Fahrdynamik und der Fahrsicherheit hat man vor allem durch den Einsatz von Regelsystemen wie ABS und ESP einen weiteren bedeutenden Sprung im Sicherheitsgewinn für den Insassen erzielt, zusätzlich liefern solche aktiven Systeme ein zusätzliches Schutzpotential für andere Verkehrsteilnehmer im Sinne der Unfallvermeidung. Durch eine intelligente Kombination dieser beiden sicherheitsrelevanten Themen, der Aktiven und der Passiven Fahrzeugsicherheit, können neue Wege beschritten werden. Diese Kombination erfolgt sehr häufig unter dem Schlagwort der *Integrierten Sicherheit*.

Für das Thema der Integrierten Sicherheit müssen noch eine Vielzahl an Einflussfaktoren berücksichtigt werden, um eine optimale Sicherheit im Straßenverkehr zu gewährleisten, die sich in die drei Bereiche

- Umwelt (Straße, Witterungsverhältnisse, Verkehrssituation, ...),
- Fahrzeug (Sicherheitssysteme, Fahrdynamik, Fahrzeugzustand, ...), und
- Fahrer (Alter, Fähigkeiten, Reaktion, ...)

unterteilen lassen.

Eine Kopplung dieser Teilbereiche sowohl in der physikalischen als auch in der virtuellen Welt ist die Voraussetzung für die Entwicklung Integraler Sicherheitssysteme. Mithilfe einer übergreifenden Entwicklungsmethode können nicht nur die Potentiale der einzelnen Elemente ausgeschöpft werden, vor allem können ihre gegenseitigen Abhängigkeiten und Beeinflussungen sehr gut dargestellt werden. Dabei kann der für die integrierte Sicherheitslösung notwendige Daten- und Informationsaustausch zwischen den einzelnen Disziplinen betrachtet werden, auch die Möglichkeiten der Kombination unterschiedlicher Systeme kann mit einer integrativen Entwicklungsumgebung aufgezeigt werden, dies ist beispielsweise beim Thema Sensorfusion notwendig. Zusätzlich ermöglicht eine solche

Entwicklungsumgebung eine deutlich bessere Beschreibung und Abbildung des realen Gesamtsystems, das Systemverständnis kann erhöht werden, wodurch sich auch Zeiten und Kosten während der Entwicklung reduzieren lassen.

Simulationsmodelle für die integrierte Sicherheit

Bei der Integrierten Sicherheit müssen, wie in Abbildung 4.33 zu erkennen ist, unterschiedliche Teilaspekten und Teilmodellen der drei wesentliche Bereich, dem Fahrzeug, des Fahrer und der Umwelt, betrachtet werden.

Bei der Umwelt sind einerseits die Verkehrssituation mit mehreren beteiligten Fahrzeugen zu berücksichtigen, andererseits auch die unterschiedlichen Randbedingungen für das Fahren, wie beispielsweise die Sichtverhältnisse oder das Wetter. Die Kommunikationen zwischen Fahrzeugen sowie zwischen Fahrzeugen und der Umwelt (Infrastruktur) sind ebenso von entscheidender Bedeutung, dies ist vor allem bei Systemen wie automatisieren Notruf oder Warnsystemen für weitere Fahrzeuge notwendig.

Die Schnittstelle von der Umwelt zum Fahrzeug stellt die Sensorik dar. Hier müssen unterschiedliche Sensorkonzepte betrachtet und in der numerischen Simulation abgebildet werden, vor allem die Algorithmen zur Identifikation und Bewertung der Sensorsignale sind relevant, da diese die Basis für Fahrerassistenzsysteme, wie beispielsweise die Spurhaltung, die Notbremsung oder ähnliche Sicherheitssysteme bilden.

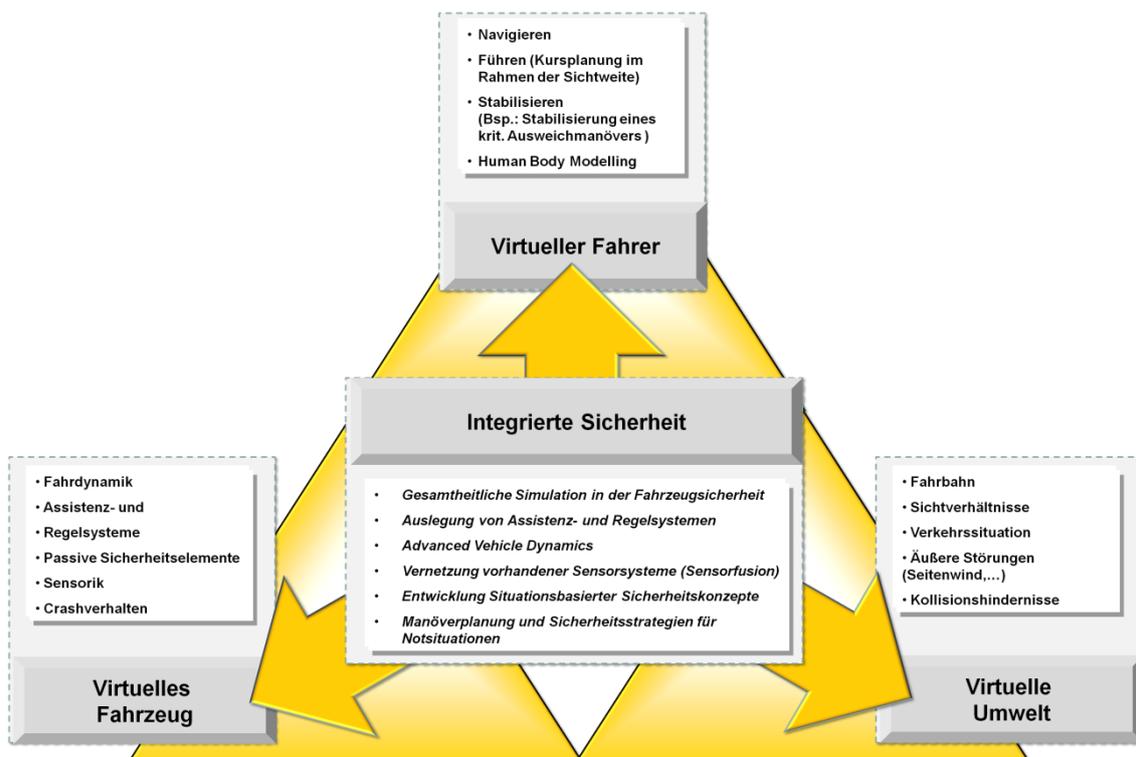


Abbildung 4.33: Elemente der integrierten Sicherheit

Die Modellierung des Fahrers ist Schwerpunkt von einer Vielzahl unterschiedlichster Forschungsprojekte. Hier sind psychologische und physiologische Faktoren wichtig, die in einzelne mathematische Algorithmen und Regelstrategien übersetzt werden müssen. Die

größten Schwierigkeiten entstehen dadurch, dass der Mensch sehr unterschiedlich reagiert und Fehler begeht. Die mathematischen Modelle in der technischen Entwicklung sind hingegen weitgehend perfekt und fehlerfrei und liefern dadurch teilweise unrealistische Resultate. Durch neue Forschungsansätze, die das realistische und natürliche menschliche Verhalten in den unterschiedlichen Algorithmen abbilden, muss das menschliche Verhalten zukünftig besser berücksichtigt werden. In weiterer Folge können mithilfe realistischer Menschmodelle neuen Sicherheitssysteme entwickelt, sowie Systemchwachstellen bereits in der virtuellen Welt identifiziert werden.

Beim dritten Bereich, dem Fahrzeug, sind zwei wesentliche Aspekte von Bedeutung, die Fahrzeugdynamik und die Fahrzeugsicherheit. Bei der Fahrzeugsicherheit sind unterschiedlichste Aspekte wichtig, einerseits die Sicherheit gegenüber anderen Verkehrsteilnehmer, andererseits die Sicherheit der Insassen. Bei der Sicherheit der anderen Verkehrsteilnehmer spielt vor allem der Fußgänger eine entscheidende Bedeutung, wo aktive oder crash-aktive Sicherheitssysteme zu nennen sind. Adaptive Sicherheitssysteme und Pre-Crash Systeme spielen zunehmend eine wichtige Rolle beim Insassenschutz.

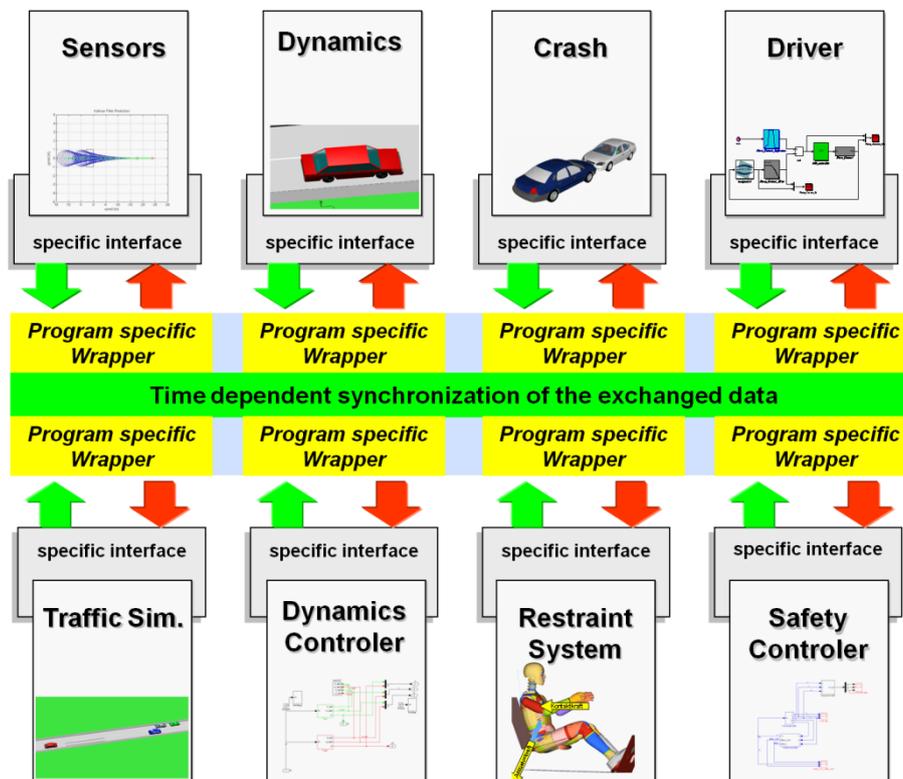


Abbildung 4.34: Beispiel einer komplexen Co-Simulation der integrierten Sicherheit

Bei all diesen neuartigen Sicherheitssystemen sind die Betrachtung und die Berücksichtigung der Umwelt oder der aktuellen Fahr- und Fahrzeugsituation notwendig, um die optimale Wirksamkeit der Systeme sicherzustellen. Durch eine gekoppelte Simulation kann dies in der virtuellen Welt abgebildet und nachgestellt werden, die wichtigsten Aspekte für die Gesamtbetrachtung sind in Abbildung 4.33 zusammengefasst. Für die Entwicklung müssen die Gesamtaspekte in Teilmodelle unterteilt werden, exemplarisch ist diese

Systematik in Abbildung 4.34 dargestellt. Für die einzelnen Teilsysteme werden unterschiedliche Simulationsmodelle und auch Simulationsprogramme verwendet, die mithilfe der Schnittstellen und programmspezifischen Wrappern (Kommunikationsprogramme und –algorithmen) mit der neutralen Co-Simulationsplattform verbunden werden. Die Co-Simulationsplattform übernimmt dabei die Rolle der Management- und Steuereinheit für die Gesamtsimulation. In der in Abschnitt 4.1.2 dargestellten übergeordneten Entwicklungsplattform ist die Steuerung der Co-Simulationsplattform im *Integration Modul* platziert.

Im Rahmen der Entwicklungstätigkeiten wird das geplante Fahrmanöver exakt definiert und die gesamte Verkehrssituation beschrieben, dazu sind Informationen zum Fahrzeug mit dem entsprechenden Fahrzustand und geplanter Fahrstrecke, aber auch zu weiteren Fahrzeugen oder anderen Verkehrsteilnehmern notwendig. Außerdem ist hier auch eine Beschreibung der Umwelt inklusive der Randbedingungen, wie Sonnenstand, Wetter oder Straßenverhältnisse durchzuführen. Die definierten Szenarien werden in Lastfallbibliotheken abgelegt und können somit jederzeit, beispielsweise für Simulationen mit geändertem Fahrzeugsetup oder verbesserten Algorithmen, wiederverwendet werden, und die erhaltenen Resultate miteinander verglichen werden. Dies kann auch als Pre-Processingphase der Co-Simulation betrachtet werden, weitere Pre-Processing Schritte sind im Normalfall nicht notwendig, da für die Co-Simulation die Standardrechenmodelle der einzelnen Entwicklungsabteilungen, welche im Engineering Data Backbone verwaltet sind, eingesetzt werden.

Die Co-Simulation besitzt ein sehr breites Einsatzspektrum, dies beginnt bei der normalen Fahrt, über kritische Fahrzustände mit hin zum Crash. Mithilfe der Co-Simulationsplattform können innovative Regelkonzepte, welche vor allem im oder kurz vor der kritischen Fahrsituation stufenweise ins Gesamtsystem eingreifen, zum Schutz der Insassen und der anderen Verkehrsteilnehmer abgebildet und im virtuellen Testlabor entwickelt werden [SCH08, LAN07, EIC09].

4.4.4 Herausforderungen bei der Entwicklung innovativer Sicherheitssysteme

Wie bereits im Abschnitt 3.3 dargestellt, ist heutzutage eine stufenweise Validierung und Absicherung der komplexen Systeme notwendig. Dazu werden im V-Modell auf den unterschiedlichen Ebenen auch unterschiedliche Werkzeuge und Methoden verwendet. Im rechten Ast des V-Modells werden vorwiegend Methoden zur Absicherung und Verifikation eingesetzt, dazu zählen in der modernen Entwicklung vor allem hybride Entwicklungsmethoden wie Software-in-the-loop (SIL), Model-in-the-loop (MIL) oder Hardware-in-the-loop (HIL). Zusätzlich sind heutzutage auch Driver-in-the-loop (DIL) und Vehicle-in-the-loop (VIL) verbreitet. Die Verwendung dieser Methoden stellt die schrittweise Implementierung von realen Modellen bzw. Komponenten im Entwicklungsablauf dar, beginnend von einfachen Softwaremodulen bis hin zum gesamten Fahrzeug.

Für die Entwicklung werden unterschiedliche Co-Simulationsumgebungen eingesetzt, um die vollständige Funktionalität der einzelnen Module sukzessive zu überprüfen und abzusichern. Voraussetzung ist die Echtzeitfähigkeit der Co-Simulationsumgebung und der einzelnen Module, um auch die reale Funktionalität der einzelnen Module zu analysieren. Speziell bei

sehr aufwändigen Modellen stellt dies eine sehr große Herausforderung an die verwendeten Werkzeuge und Methoden dar.

Um das Gesamtsystem Fahrzeug hinsichtlich sämtlicher mechatronischer Funktionen zu testen, sind komplexe Versuchs- und Evaluierungsmethoden notwendig. Von entscheidender Bedeutung ist hierbei auch die Interaktion zwischen den Systemen, die Integration der einzelnen Module in das Gesamtsystem oder auch Themen wie Sensordatenfusion. Für die Absicherung werden zu den unterschiedlichen Entwicklungsphasen gezielt Werkzeuge und Methoden eingesetzt.

Am Beispiel von Audi werden die unterschiedlichen Werkzeuge für die Entwicklung von aktiven Sicherheitssystemen durch eine zentrale Daten- und Informationsbasis stark miteinander verknüpft, die unterschiedlichen hybriden Absicherungsmethoden greifen dabei auf die relevanten Daten zu, wie es in Abbildung 4.35 zu sehen ist. Während der Entwicklung wird die Komplexität schrittweise erhöht, bis man mit der Methode Vehicle-in-the-loop schließlich in einer abgesicherten Fahrumgebung das Gesamtsystem überprüft [WEI07].

Vehicle-in-the-loop besteht aus einem realen Fahrzeug auf einem realen Testgelände sowie einer virtuellen Umgebung. Diese kann dem Fahrer mittels einer Brille vorgetäuscht werden, oder durch einen Prüfstand, beispielsweise einem Rollenprüfstand, nachgestellt sein. Dem Fahrzeug bzw. der Sensorik werden zeitsynchron entsprechende Daten vorgegeben. Vorteile sind vor allem die vollständige Reproduzierbarkeit der zu betrachtenden Situation, die zeit- und ressourcenschonenden Entwicklungsabläufe sowie ein minimalen Risikos. Die Methode ist zudem bereits in der frühen Entwicklungsphase einsetzbar, das Potential neuer Systeme kann mit stark reduziertem Risiko analysiert und bewertet werden.

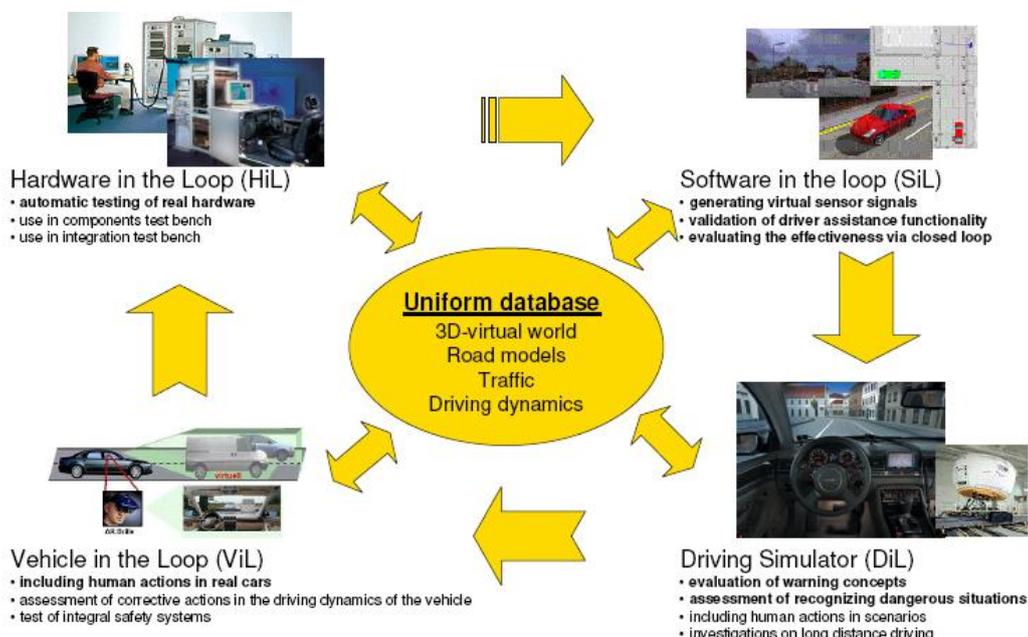


Abbildung 4.35: Zusammenspiel unterschiedlicher hybrider Absicherungsmethoden [WEI07]

Eine Weiterentwicklung der gesamten in Abbildung 4.35 dargestellten Entwicklungsplattform, vor allem die Erhöhung der Prognosefähigkeit einzelner Tools, wie beispielsweise der

Sensorsimulation, ist jedoch notwendig, um diese Technologien weiter voranzutreiben und vollständig in den Entwicklungsprozess zu integrieren [WEI07].

Eine umfassende und flexible Entwicklungsumgebung ist für die Entwicklung innovativer Sicherheitssysteme notwendig, vor allem die Interaktionen und Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Systemen müssen betrachtet werden. Wie in diesem Abschnitt dargestellt werden hierzu verstärkt Co-Simulationsplattformen eingesetzt, für das Thema der hybriden Absicherung ist zusätzlich die Integration unterschiedlicher Hardware unumgänglich.

4.5 Einsatz multidisziplinärer Optimierungsmethoden im Entwicklungsprozess

Der Begriff Optimierung taucht heutzutage in allen Bereichen der Fahrzeugentwicklung auf. Getrieben durch die ständig steigenden Anforderungen an die Fahrzeuge, stehen laufende Verbesserungen der Systeme auf der Tagesordnung der Entwicklungsabteilungen. Zunehmend werden disziplinübergreifende Optimierungsstrategien im Entwicklungsprozess eingesetzt, wodurch zusätzliche Potentiale der Fahrzeuge genutzt werden können. Neben der Kreativität und des vorhandenen Wissens der Ingenieure sind hier vor allem aktuelle numerische Methoden gefragt, die der Komplexität heutiger Produkte mit leistungsfähigen Algorithmen begegnen. Teilaspekte der multidisziplinären Optimierung sind bereits im modernen Entwicklungsprozess umgesetzt, hier werden jedoch sehr häufig nur ausgewählte Lastfälle gemeinsam betrachtet und optimiert [MLE08a, DUD05, SCH05, DUD08]. Die vollständige Integration der multidisziplinären Optimierung ist Inhalt zahlreicher Forschungsaktivitäten, hier zählen neben der durchgängigen und konsistenten Betrachtung des Prozesses vor allem das Daten- und Informationsmanagement sowie die strukturierte Vernetzung der einzelnen Disziplinen zu den großen Herausforderungen [FAC08b, KOE08], wesentliche Aspekte werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

4.5.1 Einführung in die disziplinübergreifende Optimierung

Bei einzelnen technischen Disziplinen, wie beispielsweise der passiven Sicherheit, der Akustik, Strukturdynamik oder NVH, werden Optimierungsmethoden bereits sehr häufig und erfolgreich eingesetzt. Als Anwendungsgebiete sind der effiziente Materialeinsatz oder die verbesserten mechanischen Eigenschaften wie Steifigkeit und optimierte Energieabsorption zu nennen. Hier sind vor allem Optimierungsaufgaben betreffend Topologie, Materialeinsatz oder Geometriegestaltung zu nennen. Eingesetzt werden vorwiegend monokriterielle Methoden, in denen eine Zielgröße verfolgt wird. Multikriterielle Optimierung findet zunehmend Verwendung, vor allem um gegensätzliche Zielrichtungen innerhalb eines Rechenszenarios zu betrachten und dadurch das Gesamtoptimum zu finden.

Als Beispiel für die Multidisziplinäre Optimierung, bei der mehrere Lastfälle unterschiedlicher technischer Disziplinen aber nur ein Gesamtziel berücksichtigt sind, wäre hier die Optimierung der Karosserie hinsichtlich der statischen und dynamischen Steifigkeit kombiniert mit einer Verbesserung der Performance und Intrusionen bei definierten Crashlastfällen zu nennen, wie sie in Abbildung 4.36 anhand eines Industriebeispiels dargestellt ist.

Eingesetzt werden in erster Linie Methoden, die direkt auf die Solverfiles zugreifen, und hier auf Materialeigenschaften oder Blechdicken der unterschiedlichen Bauteile zugreifen. Zunehmend kommen Optimierungsverfahren zur Gestaltung der Bauteile zum Einsatz. Hier sind innovative Methoden und Werkzeuge notwendig, die die Form der Bauteile – zumeist parametrisiert – beeinflussen und an die Solver weitersenden können. Dabei können sie entweder direkt auf die Geometrie oder alternativ auf die vernetzten Strukturen zugreifen, wobei man hier von netzverändernden Verfahren oder Morphing-Methoden spricht.

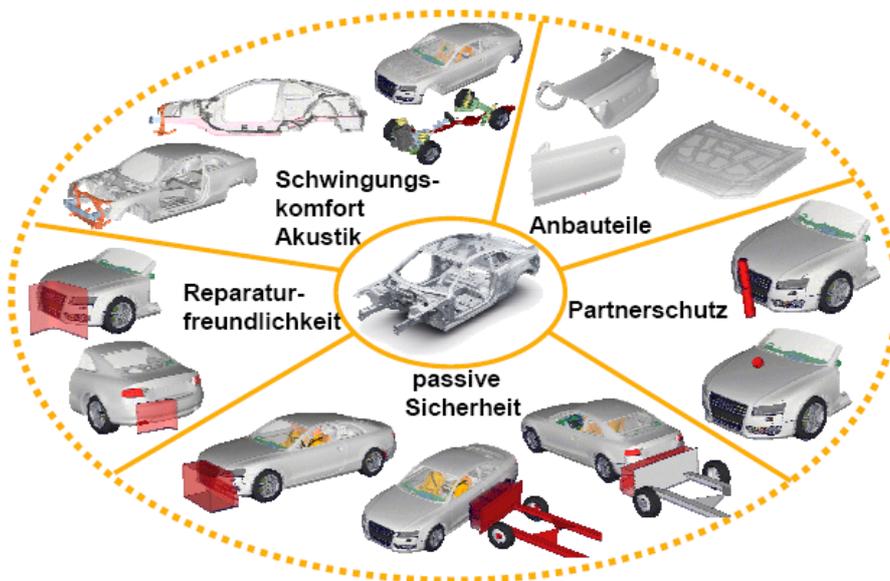


Abbildung 4.36: Multidisziplinäre Optimierung der Karosserie [MLE08a]

Neben diesen beiden Optimierungsverfahren, die zumeist als Parameter- und Formoptimierung tituliert werden, werden vor allem für die frühe Entwicklungsphase Topologieoptimierungsverfahren eingesetzt. Mit diesen Algorithmen lässt sich die Form der Bauteile anhand definierter Lastfälle optimieren, wobei die optimale Form quasi aus einem umhüllenden Bauraum gefräst wird. Nachteil dieser Verfahren ist derzeit, dass sie nur für implizite und lineare Anwendungsfälle zur Verfügung stehen. Für nichtlineare und dynamische Fragestellungen können Ersatzmodelle definiert werden, oder auch eine schrittweise Optimieren der Struktur verfolgt werden. In Abbildung 4.37 sind die drei unterschiedlichen Verfahren am Beispiel zur Optimierung der Rohkarosserie dargestellt.

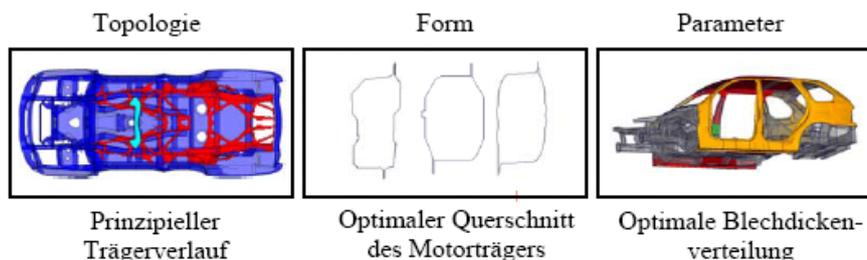


Abbildung 4.37: unterschiedliche Optimierungsverfahren ab Beispiel des Rohbaus [DUD05]

Die Einbindung technischer Disziplinen, die nicht auf die Rohkarosserie bzw. mittels FEM diskretisierte Komponenten zugreifen, zählt zu den relevanten Herausforderungen der domainübergreifenden Optimierung. Als Beispiel sei hier die Kombination Fußgängerschutz und Motorraumdurchströmung zu nennen. Der Fußgängerschutz greift direkt auf die Karosserie oder einzelne Bauteile zu, bei der Motorraumdurchströmung müssen die strömungsrelevanten Volumina für das thermische Management des Vorderwagens optimiert werden. Beide technische Disziplinen haben jedoch eine direkte Abhängigkeit von der Geometrie der Fahrzeugfront und insbesondere des Stoßfängerbereichs und des Freiraums unterhalb der Motorhaube, können jedoch in einem Optimierungswerkzeug nur sehr schwierig kombiniert werden. Dies muss mit geeigneten Methoden sichergestellt werden.

In den nächsten Abschnitten dieser Arbeit wird der Begriff *Multidisziplinäre Optimierung* (MDO) generell für die domain- oder disziplinübergreifende Optimierung verwendet, da in beiden Fällen mehrere Simulationswerkzeuge beteiligt sind, und die Herausforderungen weitgehend identisch sind.

4.5.2 Die Rolle der multidisziplinären Optimierung

Um eine domänenübergreifende Optimierung in der Fahrzeugentwicklung einzusetzen, müssen vor allem systemunterstützte Methoden und Prozesse zur Verfügung gestellt werden. Dies kann durch eine übergeordnete intelligente Verwaltung und Organisation der unterschiedlichen Domänen realisiert werden. Wie in Abschnitt 4.1.2 dargestellt, wird in einer integrierten Entwicklungsplattform ein separates Servicemodul für die Optimierung eingesetzt. Dieses Modul greift auf die unterschiedlichen Bereiche der technischen Disziplinen zu, und kombiniert sämtliche relevante Informationen zu einem übergreifenden Gesamtprozess, wie er in Abbildung 4.38 schematisch dargestellt ist.

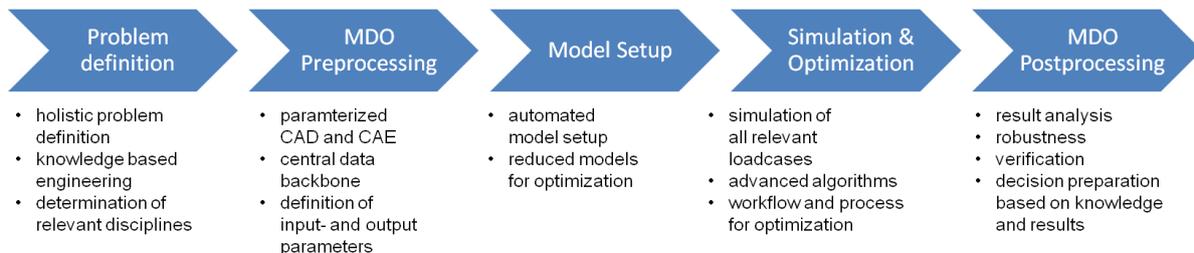


Abbildung 4.38: schematisch Darstellung eines MDO-Prozesses

Durch eine Vereinheitlichung bzw. Standardisierung der Simulationsprozesse wird die Basis für die MDO, eine neutrale Darstellung der CAx-Modelle, welche alle relevanten Informationen für die betroffenen technischen Disziplinen beinhaltet, erreicht. Darauf aufbauend werden durch entsprechende Prozesstemplates die solverspezifischen Modelle erstellt und die definierten Lastfälle abgeleitet. Von entscheidender Bedeutung ist, dass die Parameter, welche für die Optimierung verwendet werden, beim Modellaufbau entsprechend berücksichtigt sind. Außerdem ist auf eine einheitliche Datenbasis bei der Modellerstellung zu achten, da ansonsten keine objektive Bewertung des Entwicklungsstandes durchgeführt werden kann. Durch das Optimierungsmodul werden die Input-Parameter in den einzelnen

Solverfiles angesprochen, zusätzlich werden Output-Parameter zur Bewertung der Resultate definiert und in das MDO-Modul importiert. Die einzelnen Simulationen inklusive der Auswertungen werden mit entsprechenden Rechnerressourcen durchgeführt. Für die Steuerung der einzelnen Simulationen werden definierte Prozesse verwendet. Basierend auf den Ergebnissen werden stets neue Varianten mit den geänderten Input-Parametern aufgesetzt, bis mithilfe der geeigneten Algorithmen das Ziel der Gesamtoptimierung erreicht ist. Durch intelligente Optimierungsalgorithmen muss vor allem darauf geachtet werden, dass keine singuläre Optimierung, also eine Optimierung hinsichtlich eines Lastfalles, erreicht wird, sondern eine gesamtheitliche Lösung des Problems. Zusätzlich muss darauf geachtet werden, nicht nur ein lokales Extremum, sondern das globale Optimum zu erhalten.

Herausforderungen im Bereich der MDO ist vor allem die Definition der Zielfunktion. Bei der Optimierung der Rohkarosserie wird sehr häufig die minimale Intrusion, ein maximales Kraftniveau, Eigenfrequenzen oder das minimale Gewicht als Zielwert herangezogen. Betrachtet man jedoch unterschiedliche Disziplinen wird die Formulierung einer Zielfunktion deutlich schwieriger. Ansätze hierzu sind beispielweise die Optimierung hinsichtlich einer ökologischen Zielfunktion, einerseits die Reduzierung des Gewichts und die Optimierung hinsichtlich dem Einsatz von recyclingfähigen Materialien, andererseits die Minimierung der CO₂ Belastungen durch optimierte Aerodynamik und geringe Emissionen. Ein weiteres Beispiel für eine Zielfunktion ist die Minimierung der Kosten. Hier stellen vor allem Methoden zur Modellierung der funktionsorientierten Kosten der einzelnen Bauteile Forschungsgebiete dar, die die Basis für eine übergreifende Kostenfunktion darstellen. Zusätzlich zur Optimierung hinsichtlich der Zielfunktion müssen während der Optimierung die sekundären Ziele bzw. Restriktionen erfüllt werden. Hierzu zählen zumeist gesetzliche Anforderungen oder andere technische Rahmenbedingungen, wie beispielweise akustische oder komfortorientierte Anforderungen.

Betrachtet man die unterschiedlichen Disziplinen, so wird sehr rasch klar, dass die Rechenzeit bei einer Optimierung enorme Ausmaße annimmt. Um diese Rechenzeit zu reduzieren gibt es unterschiedliche Ansätze, einerseits die Reduktion und Vereinfachung der verwendeten Modelle in den einzelnen Disziplinen, wie es beispielsweise in [DUD08] dargestellt ist, oder den Austausch der komplexen und rechenzeitintensiven Modelle durch geeignete Ersatzmodelle. Solche Ersatzmodelle werden beispielsweise in [KOE08] oder auch in Abschnitt 4.5.4 kurz vorgestellt. Durch beide Methoden kann die Rechenzeit deutlich reduziert werden, jedoch unter dem Nachteil, dass die Modelltiefe und dadurch auch die Aussagefähigkeit der Modelle verringert werden.

Ein weiterer Faktor um die Optimierungszeit erheblich zu reduzieren ist der Einsatz geeigneter Optimierungsalgorithmen. Speziell im Crash stellen die numerischen Ausprägungen der Solver die Algorithmen vor enorme Herausforderungen. Hier ist beispielweise das hochgradig nichtlineare Verhalten der Strukturen, das numerische Rauschen der expliziten Codes, oder auch die oftmals mangelhafte Reproduzierbarkeit von Crashergebnissen zu nennen. Im Bereich NVH zählt vor allem das Mode Tracking, also das stabile Verfolgen der definierten Eigenschwingformen, Herausforderungen an die Algorithmen und Auswerteroutinen dar. Problemstellungen sind jedoch auch außerhalb der

Strukturlastfälle vorhanden, wenn man beispielsweise die Turbulenzmodelle im Bereich der Aerodynamik betrachtet.

Die MDO hat gegenüber einer singulären Optimierung wesentliche Vorteile: das Systemverständnis und die Systemrobustheit kann deutlich erhöht werden, zudem können Erkenntnisse über interdisziplinäre Zusammenhänge gewonnen werden, und der Reifegrad der virtuellen Prototypen in den unterschiedlichen Stadien des Entwicklungsprozesses kann gesteigert werden. Dadurch, dass bei der MDO oftmals mehrere hundert Input- und Output-Parameter definiert und in den Auswertungen betrachtet werden, können Zusammenhänge zwischen den einzelnen relevanten Parametern oder den Bauteilen sehr gut und effizient aufgezeigt werden. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt dabei zumeist in Korrelationsmatrizen, wobei hier Zusammenhänge zwischen Input- und Output-Parametern, aber auch zwischen zwei Antwortgrößen dargestellt werden, wodurch auch die Grenzen der Optimierung des Gesamtsystems sehr gut veranschaulicht werden können.

4.5.3 Integration der MDO in den Produktentwicklungsprozess

In den letzten Jahren wurden unterschiedliche numerische Methoden in den Produktentwicklungsprozess der Automobilindustrie integriert, dies führt dazu, dass die Produktentwicklung zunehmend durch virtuelle Methoden getrieben und auch bestimmt wird. Vor allem in den frühen Entwicklungsphasen können numerische Methoden sehr effizient zur Konzeptbewertung eingesetzt werden. Hier wäre es nicht möglich physikalische Prototypen zu erzeugen und damit die Erfüllung der funktionalen Anforderungen zu überprüfen. Wie bereits in Abschnitt 3 dargestellt, nehmen die Anforderungen und dadurch die Komplexität der Produkte stetig zu.

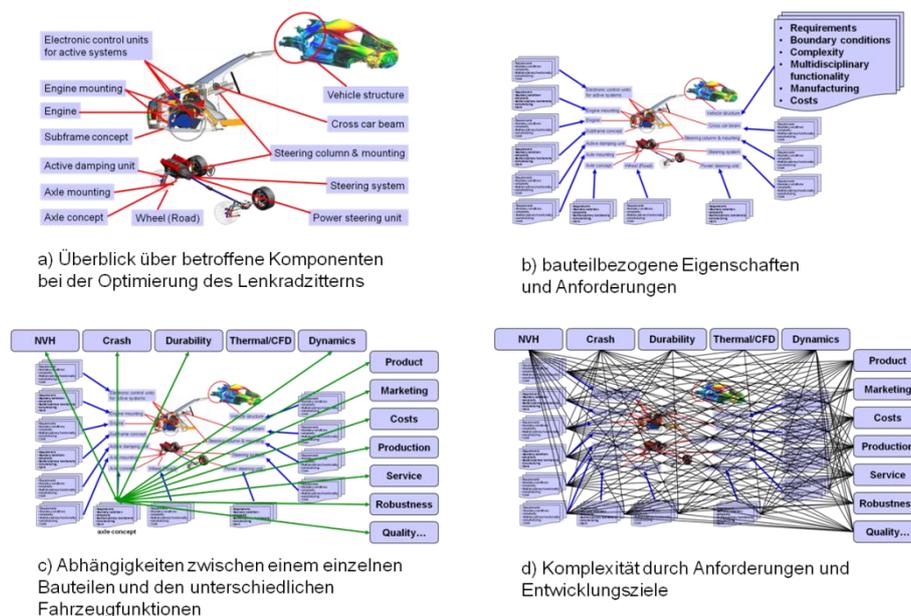


Abbildung 4.39: Komplexität bei der multidisziplinären Optimierung, nach [FAC08b]

Um die Komplexität einer MDO zu demonstrieren ist in Abbildung 4.39 als Beispiel die Optimierung des Lenkradzitterns exemplarisch dargestellt. Ausgehend von der Analyse des

Lenkradzitterns mit den betroffenen Komponenten (a) werden die Anforderungen und Eigenschaften der Bauteile definiert (b). Betrachtet man nun die Rolle der einzelnen Bauteile in den unterschiedlichen technischen und wirtschaftlichen Disziplinen (c), wird bereits ersichtlich, dass komplexe Zusammenhänge innerhalb des Gesamtfahrzeuges vorhanden sind. In (d) wird die gesamte Komplexität dieses dennoch sehr einfachen Beispiels dargestellt, welche durch einfache ingenieurmäßige Betrachtungen nur sehr schwer handzuhaben sind.

Mithilfe der MDO können Konzepte aber auch Bauteile bzw. Fahrzeuge in der Serienentwicklung effektiv und effizient entwickelt und optimiert werden. Für die breite Einsetzbarkeit der MDO ist jedoch die Integration der Optimierung in den gesamten Produktentwicklungsprozess von entscheidender Bedeutung. Um dies sicher zu stellen, ist eine systemunterstützte Vorgehensweise notwendig, wie bereits in Abschnitt 4.1.2 schematisch dargestellt wurde. Dies bedeutet, dass Prozesse angepasst werden müssen und sämtliche relevante Daten für die MDO entsprechend zur Verfügung gestellt werden müssen. Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Bauteilen und Disziplinen müssen aufgezeigt, und eine Verbindung zwischen den Anforderungen und den dafür notwendigen Bauteileigenschaften geschaffen werden. Darauf basierend sind für die Bauteile relevante bzw. zulässige Parameter für die entsprechenden Disziplinen und damit verbundenen numerischen Modellen festzulegen. Sämtliche Informationen und Verknüpfungen werden in entsprechenden übergreifenden Strukturen eingebettet, dies erfolgt in Form von semantischen Informationen und wird im Engineering Data Backbone als intelligente Zwischenschicht hinterlegt. Bei einer MDO werden die Informationen der betroffenen Bauteile gesammelt und in einem übergreifenden Parameterraum gespeichert. Mithilfe dieser Informationen werden beim MDO Pre-Processing die numerischen Modelle der einzelnen Disziplinen aufgesetzt, zusätzlich werden die Input-Parameter für die Optimierung in den Modellen berücksichtigt, sowie die für die Lastfälle relevanten Output-Parameter als Ausgabegrößen definiert.

Die Abläufe während der MDO sind synchronisiert, alle involvierten Disziplinen beruhen auf denselben Informationen bzw. Modellständen. Im Gegensatz dazu wird heutzutage sehr häufig eine singuläre Optimierung in den einzelnen Disziplinen durchgeführt, die Resultate müssen nach einer singulären Optimierung in den einzelnen Disziplinen abgeglichen bzw. synchronisiert werden, wie es in Abbildung 4.40 a) zu sehen ist. Durch das parallele Vorgehen bei der MDO kann einerseits Entwicklungszeit, aber vor allem Abstimmungsaktivitäten und Entwicklungsschleifen reduziert werden, der Produktreifegrad kann bereits zu früheren Zeitpunkten auf ein höheres Niveau gebracht werden. Dieses Vorgehen ist in Abbildung 4.40 b) schematisch skizziert.

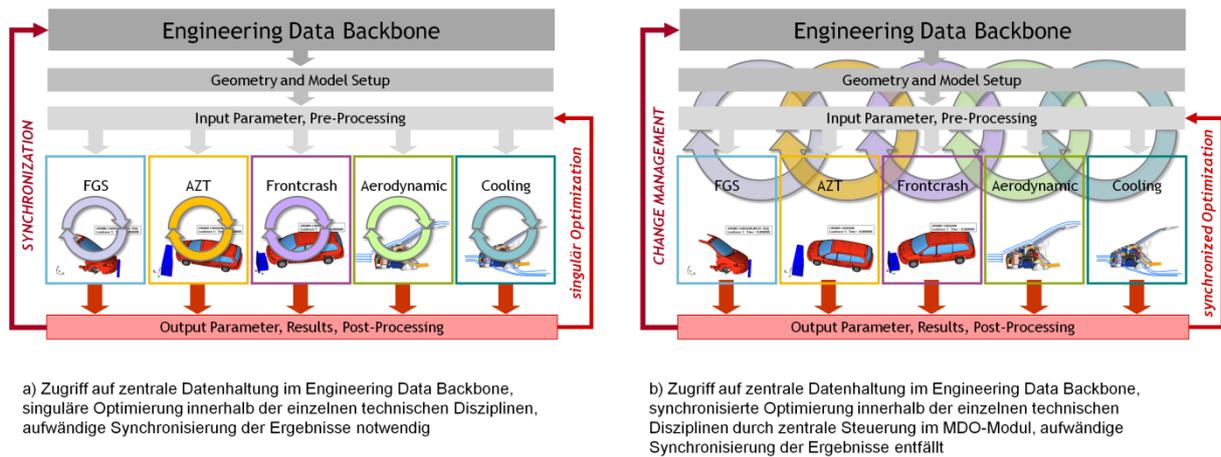


Abbildung 4.40: Unterschiede zwischen singularer und multidisziplinärer Optimierung

Um die MDO im Produktentwicklungsprozess zu integrieren sind komplexe Prozesse notwendig. Ein wesentlicher Faktor ist die Sicherstellung der geeigneten numerischen Modelle, dies beinhaltet die Verwendung eines robusten numerischen Modells, die Berücksichtigung aller relevanten Parameter und die Abstimmung der Modellstände zwischen den einzelnen Disziplinen. Umgesetzt wird dies durch einen Datenfreeze im Entwicklungsprozess, basierend auf diesem Entwicklungsstand werden für die involvierten Disziplinen einer Multidisziplinären Optimierung die jeweiligen Modelle aufgebaut. In Abbildung 4.41 ist der Ablauf bei der MDO dargestellt, dabei ist der Workflow, beginnend vom Datenfreeze bis zu den Resultaten der Optimierungsschleife, sehr deutlich dargestellt.

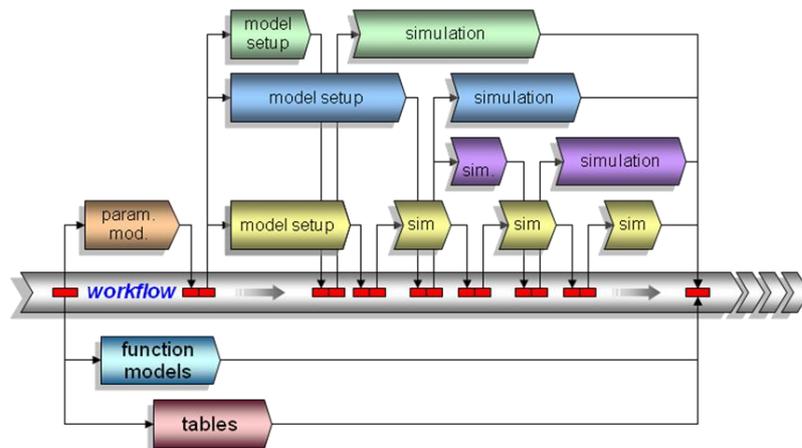


Abbildung 4.41: Prozessablauf einer Optimierungsschleife bei der MDO [FAC08b]

Zu erkennen ist auch die zentrale Verwaltung der Parameter, die für die einzelnen Simulationsmodelle notwendig sind. Die einzelnen Disziplinen bestehen jeweils aus einem Setup der numerischen Modelle und der Simulation. Bei einigen Simulationen können mehrere Teilschritte notwendig sein, wenn beispielsweise Zwischenresultate anderer Disziplinen mit einfließen müssen, oder durch Engpässe bei der Rechenkapazität die Simulation kurzfristig unterbrochen werden muss. Parallel zu den aufwändigen Simulationsdisziplinen werden funktionale Modelle oder auch einfache Kalkulationsaufgaben

durchgeführt, die Ergebnisse werden ebenfalls bei der Gesamtbewertung der Optimierungsschleife berücksichtigt.

Eine übergeordnete Steuerung des gesamten MDO-Prozesses erfolgt durch das CAE-Cockpit und den Engineering Data Backbone, wie es in den Abschnitten 4.1.2 und 4.6 erläutert wird. Dadurch können, basierend auf intelligenten semantischen Verknüpfungen, komplexe Abläufe in der Entwicklungsplattform umgesetzt werden. Zusätzliche Aspekte, die bei der MDO berücksichtigt werden müssen, sind einerseits die Integration der Co-Simulation bzw. des Hardware-Software Co-Designs, wie sie in Abschnitt 4.4 dargestellt sind, sowie intelligente Methoden zur Reduktion der Komplexität und der Rechenzeit.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt im Bereich der MDO ist vor allem das Thema Auswertung und Visualisierung der Optimierungsergebnisse, welche in einen (teil-)automatisierten MDO-Prozess berücksichtigt werden müssen. In [KOE08] sind drei wesentliche Visualisierungsmethoden angeführt: die Analyse des Fahrzeugverhaltens für einzelne Lastfälle auf Basis der Sensitivitäten der Antwortgrößen, Analysen der Interaktionen zwischen den Lastfällen durch Erstellung von Korrelationsmatrizen und Zielkonfliktanalysen, sowie die Unterstützung bei der Interpretation der Optimierungsergebnisse.

4.5.4 Komplexitäts- und Modellreduktion bei der MDO

Durch moderne Rechencluster können Simulationen parallel, und auf mehrere Prozessoren verteilt, durchgeführt werden. Bedenkt man jedoch, dass bei einer MDO oftmals mehrere hundert Parametern variiert und bewertet werden müssen, sind auch moderne Rechencluster nicht ausreichend, um die Optimierung innerhalb einer vernünftigen Zeit durchzuführen. Wie bereits in Abschnitt 4.5.2 kurz erläutert, gibt es mehrere Vorgehensweisen um eine Reduktion der Komplexität bzw. zur Reduktion der Rechenzeit zu erreichen.

Eine der wichtigsten und eine einfache Methode, die Rechenzeit der verwendeten Modelle zu reduzieren, ist die Vereinfachung der Modelle innerhalb der jeweiligen Simulationsumgebung. Dies kann beispielsweise durch eine gröbere Diskretisierung, durch Modellannahmen, wie beispielsweise Symmetrien, oder auch durch modulare Reduktion der Modellierungstiefe erfolgen. Bei einer modularen Reduktion der Modellierungstiefe werden gezielt Bauteile oder Module des Fahrzeuges mithilfe einfacher Modelle, wie beispielsweise Beamstrukturen oder starrer Bauteile, abgebildet. Die für die Optimierung relevanten Bauteile werden mit einer detaillierten Diskretisierung im Modell berücksichtigt, wodurch prognosefähige Aussagen in diesem Bereich getroffen werden können. Diese Vorgehensweise kann mithilfe der Entwicklungsumgebung und des CAE Assembly Manager sehr einfach umgesetzt werden, anstelle der detaillierten Netze werden die stark vereinfacht diskretisierten Teilmodelle in den Setup-Prozess eingebunden, die weitere Vorgehensweise entspricht dem oben beschriebenen MDO-Prozess.

Um jedoch die disziplinübergreifenden Optimierungsmethoden weiter zu verbessern und vor allem die Prozessintegration sicher zu stellen, sind innovative Ansätze notwendig. Hier werden zunehmend, vor allem bei rechenzeitintensiven Simulationsdisziplinen, unterschiedliche Ersatzmodelle eingesetzt. Im Bereich der multidisziplinären Optimierung

werden vor allem globale Approximationsverfahren¹ eingesetzt, da hiermit das globale Verhalten des Systems sehr gut und multidimensional nachgebildet werden kann.

Global bedeutet in diesem Zusammenhang, dass diese Optimierungsverfahren das Optimum innerhalb des gesamten Entwurfsraums ermitteln. Lokale Optima werden in der Regel nicht berücksichtigt. Die Abhängigkeit der Zielfunktion von den sich verändernden Optimierungsvariablen kann bei komplexen Analysemodellen unter Umständen nicht exakt beschrieben werden, es sei denn, es existieren analytische Zusammenhänge. Globale Approximationsverfahren beschreiben den Zusammenhang zwischen Optimierungsvariablen und Zielfunktion nur annähernd. Sie versuchen mithilfe einzelner weniger Auswertungen des Analysemodells, den sog. Stützstellen, den Zusammenhang zwischen Input- und Output-Parameter zu erkennen, und mit einer analytischen Funktion (z. B. einem Polynom) oder einem numerischen Zusammenhang (Neuronale Netze) annähernd zu beschreiben. Dieser numerische Zusammenhang, das sog. Ersatzmodell auch die Ersatzfläche, (engl. Response Surface oder Metamodel) stellt eine Approximation des realen Systemverhaltens dar. Unter Berücksichtigung der Randbedingungen kann dann ohne weitere Simulationen das Optimum auf dieser Ersatzfläche ermittelt werden. Ziel aller globalen Approximationsverfahren ist die Abhängigkeit der Zielfunktion von den Optimierungsvariablen so genau und so effizient wie möglich zu beschreiben.

Nach [SCH05] haben globalen Approximationsverfahren vor allem bei rechenzeitintensiven Disziplinen entscheidende Vorteile: hierzu zählt beispielsweise, dass die Zielfunktion ohne weitere Simulationen an jeder Stelle im Entwurfsraum ermittelt werden kann. Außerdem können sehr einfach zusätzlich Studien mit unterschiedlichen Ziel- und Restriktionsfunktionen durchgeführt werden, wodurch das Systemverständnis erhöht, und vor allem die Robustheit des gesamten Systems beurteilt werden kann. Als wesentliche Nachteile sind einerseits der erhebliche Rechenaufwand zur Generierung des Ersatzmodells und andererseits modellbedingte Ungenauigkeiten zu nennen.

In der Industrie sind drei globale Approximationsverfahren sehr weit verbreitet: die Response Surface Methodology, Neuronale Netze und Kriging. Diese drei unterschiedlichen Verfahren werden vor allem in strukturmechanischen Fragestellungen eingesetzt, und ermöglichen durch die einfache mathematische Abbildung der physikalischen Zusammenhänge eine effiziente und effektive Optimierung. Speziell die Response Surface Methodology (RSM) wird erfolgreich angewandt, da mithilfe geeigneter Ansatzfunktionen auch hochgradig nichtlineare und komplexe Systeme zufriedenstellend abgebildet werden können [DUD08].

Bisher werden solche Ersatzmodelle vor allem im Bereich der Strukturmechanik erfolgreich eingesetzt. Aufbauend auf diesen Erfolgen werden die Methoden sukzessive auf weitere technische Disziplinen, wie beispielsweise Thermisches Management, Aerodynamik oder Klimatisierung, erweitert. Diesbezüglich sind nach [DUD08, KOE08] jedoch noch Forschungsaktivitäten im Bereich der Modellerstellung und der Ersatzmodellierung notwendig.

¹ In der Strukturmechanik werden vorwiegend drei Kategorien von Optimierungsverfahren angewandt: mathematische Methoden basierend auf dem Gradientenverfahren, stochastische Suchstrategien und globale Approximationsverfahren.

Um die Ersatzmodelle in einen Optimierungsprozess einzubinden muss dieser entsprechend angepasst werden. Im MDO-Pre-Processing müssen die Ersatzmodelle für die betroffene technische Disziplin erzeugt werden. Die Modelle müssen parametrisiert erzeugt, sowie die Verteilung der Parameter mithilfe einer Versuchsplanung (DOE – Design of Experiments) bestimmt werden. Basierend auf einer Vielzahl an Basissimulation und den extrahierten Resultaten werden die numerischen Ersatzmodelle aufgebaut. Im Anschluss werden die Ersatzmodelle anstelle der Simulationsmodelle in den MDO-Prozess implementiert, wodurch die Rechenzeit für die Disziplin deutlich reduziert werden kann.

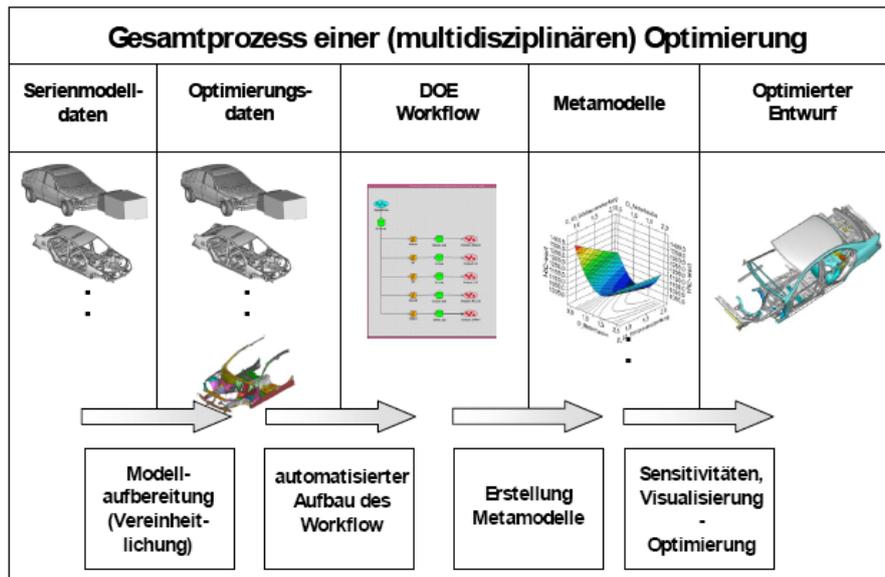


Abbildung 4.42: Einbindung von Ersatzmodellen in die MDO [KOE08]

In Abbildung 4.42 ist der Ablauf einer MDO auf Basis von Ersatzmodellen (hier Metamodelle genannt) dargestellt. Dabei wird der Ablauf der multidisziplinären Strukturoptimierung bei Daimler kurz dargestellt. Als relevante Lastfälle sind neben Crashlastfällen vor allem statische und dynamische Steifigkeiten und Betriebsfestigkeit berücksichtigt. Der Aufwand zur Erstellung der Ersatzmodelle darf dabei keinesfalls unterschätzt werden. In [KOE08] wird für die Erstellung der Metamodelle einer komplexen MDO ein Gesamtrechenzeitbedarf von 2 Mio. CPU (Core)-Stunden angegeben. Darin beinhaltet sind insgesamt 10 Crashlastfälle mit jeweils 300 Läufen, die durchschnittliche Rechenzeit der Lastfälle beträgt 20 Stunden auf 32 Cores. Trotz genügend Rechenressourcen müssen somit für die Erstellung der Ersatzmodelle oftmals mehrere Wochen eingeplant werden.

Die Bewertung der Resultate erfolgt gleichsam wie bei den Optimierungsabläufen mithilfe der Simulationsmodelle. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass das Resultat nicht auf Basis von berechneten Simulationen, sondern aufgrund der berechneten Optima der Ersatzmodelle bestimmt wurde. Zur Sicherheit müssen also in einem nächsten Schritt die Resultate und die Robustheit der bestimmten Lösung anhand detaillierter Simulationen bestätigt werden.

4.5.5 Herausforderungen und Ausblick

In den letzten Jahren stand die multidisziplinäre Optimierung im Zentrum unterschiedlicher Forschungs- und Entwicklungsprojekte. Dabei wurden Teilaspekte der MDO in den Projekten umgesetzt und in Softwaretools integriert. Nichtsdestotrotz sind noch sehr viele Fragestellungen und Weiterentwicklungen offen [DUD08, KOE08]. Ein wesentlicher Punkt bei der Weiterentwicklung ist die Flexibilität einer MDO-Plattform. Flexibilität muss in diesem Zusammenhang mehrdimensional gesehen werden: einerseits müssen schrittweise weitere Disziplinen in die Plattform inkludiert werden, die Zielfunktion sollen frei gestaltbar sein, außerdem ist es notwendig neue Methoden wie die Formoptimierung oder die Topologieoptimierung in den Gesamtprozess zu integrieren.

Ebenso nimmt die Bedeutung der Robustheit der technischen Systeme hinsichtlich unterschiedlicher Lastfälle und definierter Randbedingungen stetig zu. Die Erfahrung aus dem Versuch zeigt, dass auch bei Serienbedingungen oder standardisierten Versuchen selbst bei sehr einfachen Versuchsaufbauten deutlich unterschiedliche Ergebnisse zu beobachten sind. Zielsetzung der Fahrzeugauslegung ist es, ein möglichst reproduzierbares und stabiles Systemverhalten einer Lösung zu erhalten, damit Streuungen aus Fertigung, Materialien oder Versuchsbedingungen möglichst geringe Auswirkungen haben. Die Robustheit oder Sensitivität einer Lösung ist somit von entscheidender Bedeutung, und muss während der Entwicklung und Optimierung mit geeigneten numerischen Methoden berücksichtigt werden.

Ein weiterer wesentlicher Punkt ist die Verbesserung der Performance bzw. die Reduktion der Durchlaufzeiten einer MDO innerhalb des Entwicklungsablaufes. Hierzu zählen vor allem automatisierte Abläufe, die optimale Nutzung der Rechenkapazitäten, aber auch ein hinsichtlich Rechenzeit optimierter Modellaufbau. Bei der Qualität der numerischen Ersatzmodelle sind vor allem hinsichtlich der stark nichtlinearen Antwortgrößen Verbesserungen notwendig.

Im Bereich der Auswertung und der Analysen von komplexen Optimierungsaufgaben steckt ebenso Entwicklungsbedarf, vor allem, um dem Entwicklungsingenieur ein besseres Systemverständnis zu ermöglichen und intelligente Entscheidungshilfen zur Verfügung zu stellen. Dies kann beispielsweise durch die Integration von wissensbasierten Systemen erfolgen, wo Erfahrungen und erfolgreiche Entscheidungsabläufe vergangener Entwicklungsabläufe als Wissensbasis hinterlegt sind.

4.6 Engineering Cockpit und die Rolle des Entwicklungsingenieurs

Von den Entwicklungsingenieuren wird heutzutage eine Vielzahl an unterschiedlichen Skills gefordert. Dazu zählen einerseits fachliche Fähigkeiten wie Umgang mit unterschiedlichen numerischen Methoden und Solvern, Kenntnisse im Bereich der experimentellen Methoden, IT und Mathematik, Entwicklungs- und Lastfallknowhow - aber vor allem auch Soft Skills, die in der modernen übergreifenden Entwicklungstätigkeit eine zunehmend stärkere Rolle einnehmen, wie sie in Abbildung 4.43 zusammengefasst sind.

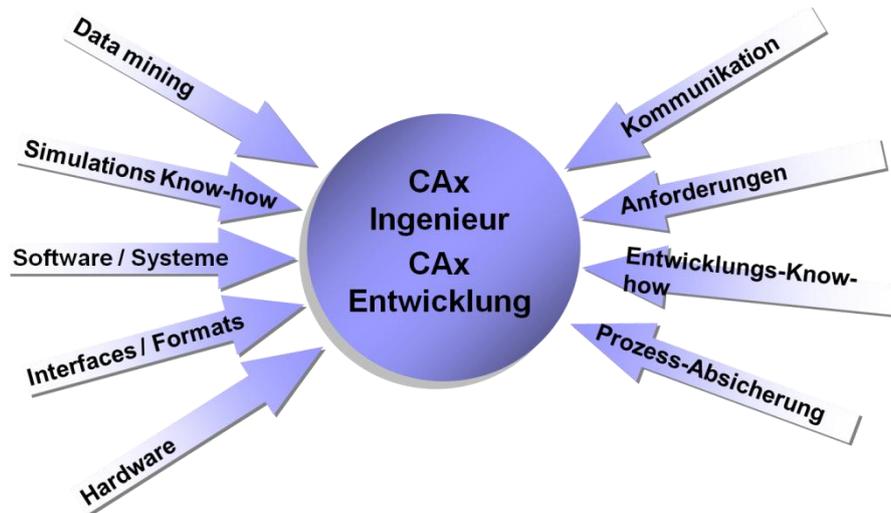


Abbildung 4.43: Anforderungen an den Entwicklungsingenieur der Zukunft nach [FAC08b]

Um deutliche Verbesserungen im modernen Entwicklungsablauf realisieren zu können, ist einerseits eine Entlastung der Entwicklungsingenieure und andererseits eine Änderung in den Abläufen und Prozessen notwendig. Ziel der Aktivitäten muss die Förderung der ingenieurmäßigen Entwicklungstätigkeiten und der kreativen Problemlösung durch die Entwickler sowie eine Reduktion der administrativen Tätigkeiten sein. Dazu zählt beispielsweise, wie bereits in Abschnitt 4.3 dargestellt, die Reduktion der Datensuche, der Datenmanipulation, des Modellaufbaus oder der Dokumentation. Durch den Einsatz und die kontinuierliche Weiterentwicklung der CAE- und IT-Methoden werden eine durchgängige Unterstützung im Entwicklungsablauf und eine Verknüpfung unterschiedlicher Disziplinen realisiert, wozu beispielsweise teil- oder vollautomatisierte Workflows eingesetzt werden.

Für die Umsetzung in der Praxis sind unterschiedliche Ansätze möglich, einer davon wird hier kurz dargestellt. Dabei geht man von einer maßgeblichen Änderung der Rolle des Entwicklungsingenieurs aus, eine Auftrennung der derzeit vorhandenen Bereiche in *Experten* sowie in übergeordnete *Generalisten*, die für die Entwicklung gesamtheitlich verantwortlich sind, ist hier vorstellbar.

Ansatz Rollentrennung zur Effizienzsteigerung

Der *Generalist* bedient das CAE-Cockpit der integrativen Entwicklungsumgebung, welches als Steuerinstrument die unterschiedlichen Disziplinen mit einbezieht. Dabei werden durch den Generalist mithilfe automatisierter Abläufe die wichtigsten Funktionen laufend überprüft und somit eine rasche Evaluierung von Designänderungen sichergestellt, anschließend werden die Ergebnisse interpretiert und entsprechende Maßnahmen gesetzt. Von entscheidender Bedeutung sind hier entsprechende Evaluierungs- und Visualisierungsmethoden, die eine Bewertung der unterschiedlichen Designstände und eine Gegenüberstellung mit den Produkthanforderungen sicherstellt.

Dem Generalisten stehen zusätzlich zu manuell zu startenden Entwicklungsschritten auch systemunterstützte Entwicklungsabfolgen zur Verfügung. Wie bereits in Abschnitt 4.1 erläutert, sind intelligente Methoden wie semantische Netze und Ontologien für zukünftige

Entwicklungsumgebungen notwendig. Außerdem wird durch diese Technologie das Wissen vorangegangener Projekt bzw. die Erfahrung der Entwicklungsingenieure abgebildet, indem die erforderlichen Entwicklungsschritte in das System eingearbeitet und somit vollständig dokumentiert werden. In weiterer Folge werden diese Entwicklungsabläufe durch die Systemunterstützung teil- oder vollautomatisiert wiederverwendet. Sowohl funktionsrelevante als auch produktionsrelevante Anforderungen können so überprüft und den Zielwerten des Lastenheftes gegenübergestellt werden.

Hauptaufgaben des Generalisten sind die ganzheitliche Entwicklung und Optimierung des Fahrzeuges, hierfür muss er nicht Spezialist einzelner Disziplinen sein, sondern vor allem einen Überblick über alle beteiligten Bereiche in der Fahrzeugentwicklung behalten und die damit verbundenen Entwicklungstätigkeiten koordinieren. Dazu zählt unter anderem das Sammeln aller relevanten Informationen, das Aufbereiten und Kommunizieren der Resultate und das Koordinieren der damit verbundenen Entwicklungsaktivitäten im Sinne einer gesamtheitlichen multidisziplinären Optimierung. In Abbildung 4.44 ist ein Überblick über Aktivitäten bei der disziplinübergreifenden Auslegung und Optimierung dargestellt, dies entspricht auch im Wesentlichen den Hauptaufgaben des Generalisten im Entwicklungsablauf, welche er systemunterstützt durchführen muss. Die Rolle des Generalisten ist somit sehr gut in einer übergeordneten Entwicklungsplattform darstellbar, er bedient den *CAE Desktop* und steuert damit unterschiedlichste Entwicklungsschritte in den einzelnen Disziplinen, zusätzlich greift er auf die Prozesse der Entwicklung und auch auf die Prozessintelligenz zu. Ebenso zählen die multidisziplinäre Optimierung und die Co-Simulation zu den Aufgaben des CAE-Generalisten.

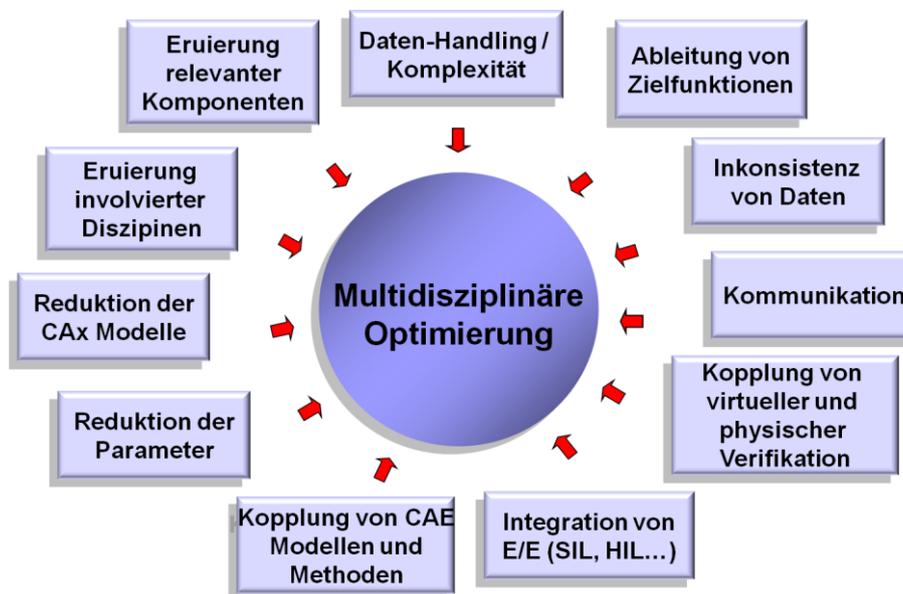


Abbildung 4.44: Aspekte der multidisziplinären Optimierung im Entwicklungsablauf [FAC08b]

Für Detailfragen oder zur fachspezifischen Problemlösung werden *Experten* eingesetzt, die sich durch entsprechend ausgeprägtes Fachwissen und Problemlösungskompetenz auszeichnen. Die *Experten* designen auch die entsprechenden Lastfälle, die für die automatisierten Abläufe während der Entwicklung benötigt werden.

Durch die zunehmende Komplexität der Produkte zählt vor allem die Verfolgung des Produktreifegrades, die Darstellung von Abhängigkeiten oder kritischen Bereichen zu den großen Herausforderungen im Bereich des virtuellen Engineerings. Hier könnten neben dem Engineering Cockpit vor allem intelligente Visualisierungstechniken für die unterschiedlichen Entwicklungs- und Managementteams, sowie die Verknüpfung zum Projektmanagement einen wesentlichen Beitrag leisten.

5 Integration der Simulation in den Entwicklungsprozess

Um das Potential einer integrativen Entwicklungsmethode, wie sie in Abschnitt 4 beschrieben wurden, zu demonstrieren, wird in diesem Abschnitt die Umsetzung einzelner Technologien am Beispiel der Fußgängerschutzsimulation dargestellt.

Als Use-Case zur Demonstration eines integrierten numerischen Entwicklungsprozesses wird der Fußgängerschutzkopfanprall im Serienentwicklungsprozess verwendet. Durch die Darstellung dieses Anwendungsfalles wird das systematische Vorgehen bei der Implementierung eines teil- bzw. vollautomatisierten Entwicklungsablaufes in allen notwendigen Einzelschritten erläutert. Für die weiteren Lastfälle beim Fußgängerschutz können durch Adaptierung der einzelnen Methoden und Arbeitsabläufe ähnlich Prozesse erarbeitet werden.

5.1 Darstellung des Use-Cases

Im Rahmen des hier behandelten Use-Cases werden die einzelnen Entwicklungsabläufe beim Fußgängerschutzkopfanprall dargestellt. Dabei wird der gesamte Prozess, beginnend bei den notwendigen geometrischen und funktionalen Daten, den zu definierenden Randbedingungen und Annahmen, bis hin zur automatisierten Simulation, Auswertung und Visualisierung der gesamten Resultate des Lastfalls betrachtet.

Zu diesem Zweck wird der gesamte Prozess, wie in Abbildung 5.1 gezeigt, in mehrere Abschnitte unterteilt, wodurch sich konkret folgende Teilprozesse ergeben:

- Aufbau des Fahrzeugmodelles
- spezielle Pre-Processing Abläufe für den Fußgängerschutz
- Job-Management und Solving
- lastfallspezifische Auswertung der einzelnen Simulationsläufe
- Visualisierung der globalen Resultate des Lastfalls

Heutzutage ist in der modernen Fahrzeugentwicklung die Zusammenarbeit mit externen Dienstleistern unumgänglich. Aus diesem Grund wird bei den einzelnen Prozessschritten besonders auf eine einfache Handhabung des Prozesses, auf die Möglichkeit der Verwendung der Methodik sowohl im Haus als auch bei externen Partnern und vor allem auf den unternehmensübergreifenden Austausch der Simulationsdaten in den einzelnen Prozessschritten Wert gelegt. Für den Use-Case ist dadurch die Verwendung der zu erarbeitenden Methodik sowohl als Stand-alone Applikation für die externe Anwendung, als auch als integrierter Bestandteil der internen Systemlandschaft von Bedeutung. Die entsprechenden Anforderungen an diese komplexe Problematik werden in Form von zwei parallel laufenden Prozessschienen im Rahmen dieses Use-Cases betrachtet, wie es auch in Abbildung 5.1 zu erkennen ist.

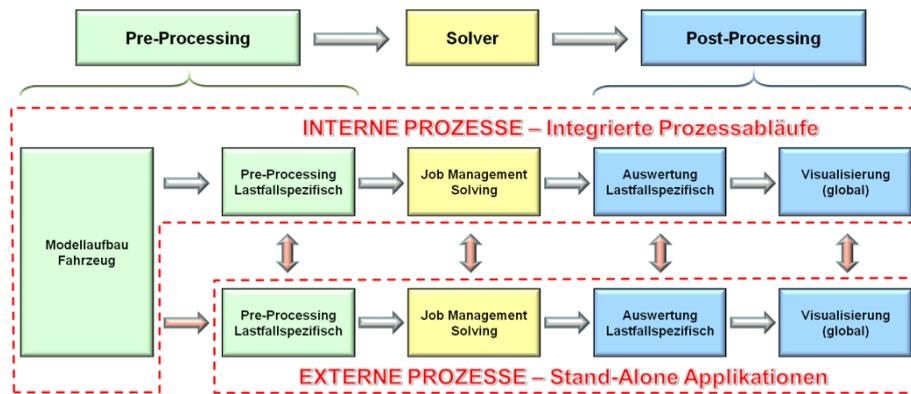


Abbildung 5.1: Prinzipdarstellung der parallelen Prozesse für den Use-Case

Bei den Stand-alone Applikationen werden Skript-basierende Methoden und mathematische Algorithmen für die Datenmanipulation und die Prozesssteuerung verwendet. Als Systemvoraussetzung werden lediglich die frei verfügbare TCL/TK¹ Umgebung und die Post-Processing Software HyperView[®] zur Visualisierung definiert. Eine Anpassung der spezifischen Auswertungs- und Visualisierungsmethoden an eine davon abweichende Post-Processing Software ist durch die mathematischen Algorithmen und Skripts sehr einfach möglich, wird in diesem Use-Case jedoch nicht behandelt.

Bei den internen Prozessen muss die Methodik in die existierende Systemlandschaft integriert werden. Dafür werden für das Pre-Processing das Produkt HyperMesh[®] und für das Post-Processing HyperView[®] definiert. Für das Datenmanagement wird während des gesamten Prozessablaufes das Produkt Altair Data Manager[®] eingesetzt. Notwendige Datenmanipulationen und Abläufe werden wie bei der Stand-alone Applikation mit mathematischen Algorithmen und Skripts realisiert. Beim Simulationsdatenmanagement-Tool Altair Data Manager[®] wird Teamcenter als Datenbanklösung verwendet. Der Altair Data Manager[®] dient ebenso als Schnittstelle zu den Produktdatenmanagement-Systemen, welche für die Verwaltung der unterschiedlichen Produktdaten verantwortlich sind.

Modellaufbau des Fahrzeuges

Für die einzelnen technischen Disziplinen oder Lastfälle gibt es verschiedene numerische Prototypen. Dabei kommt für die meisten Crashlastfälle ein numerisches Basis-Gesamtfahrzeugmodell zum Einsatz, welches auch für weitere FEM Disziplinen² verwendet wird. Für den Fußgängerschutz ist auf Grund der speziellen Anforderungen, welche in Abschnitt 4.2 beschrieben wurden, ein zusätzliches bzw. stark adaptiertes numerisches Modell notwendig.

¹ Tcl (Tool Command Language) ist eine Open Source-Skriptsprache, welche plattformunabhängig für eine Vielzahl unterschiedlicher Anwendungen eingesetzt werden kann.

Tk (Toolkit) ist ein offenes, freies und plattformübergreifendes Toolkit zur Programmierung von grafischen Benutzeroberflächen (GUIs).

www.tcl.tk

² Crash, Crush, NVH, Steifigkeit, Betriebsfestigkeit

In dieser Arbeit wird die prinzipielle Vorgehensweise einer teil- oder vollautomatisierten Modellerstellung erläutert. Des Weiteren wird hier speziell auf die Verwendung eines modernen Simulationsdatenmanagementsystems Wert gelegt, da dadurch neuartige Prozessabläufe im Bereich des Pre-Processing ermöglicht werden.

Dieses Modul des Gesamtprozesses wird lediglich in der internen Prozesslandschaft umgesetzt, da der Einsatz einer Simulationsdatenmanagementlösung bei Dienstleistern nicht als Voraussetzung gesehen werden kann.

Ein rechenfähiges Fahrzeugmodell für die weiteren Schritte schließt diesen Teilprozess ab.

Lastfallspezifisches Pre-Processing

Der Lastfall Fußgängerschutz besteht aus einer Vielzahl an einzelnen Entwicklungsaufgaben. Bei einem durchschnittlichen Fahrzeug sind während der Entwicklung oft mehrere hundert einzelne kritische Auftreffpunkte zu berücksichtigen. Hinzu kommt, dass es verschiedenste Prüfkörper und vor allem unterschiedliche gesetzliche Randbedingungen und Kriterien zu erfüllen gilt. Dies macht es notwendig, systematische Methoden für die Entwicklung hinsichtlich all dieser Anforderungen zur Verfügung zu stellen.

Durch eine Entwicklungsmethode, welche eine flexible Positionierung der einzelnen Impaktoren und eine einfache Definition der Randbedingungen für die einzelnen Lastfälle erlaubt, kann die Entwicklungstätigkeit deutlich vereinfacht werden. Die wichtigsten Methoden dafür sind mathematische Algorithmen zur Positionierung der Impaktoren sowie Skript-basierte Datenmanipulationen zur Steuerung der notwendigen Pre-Processing Aktivitäten.

Am Ende des Teilprozesses liegen vollständige Solver-spezifische Inputdaten für die Simulation vor.

Job Management und Solving

Für den Use-Case werden die beiden expliziten Finite Elemente Codes LS-Dyna[®] und PAM-CRASH[®] als Solver der technischen Aufgabenstellung eingesetzt. Der prinzipielle Arbeitsablauf ist für beide Solver identisch, jedoch muss die Methode aufgrund der unterschiedlichen internen Algorithmen und Abläufe individuell angepasst werden. Eine Adaption der Methodik an weitere Berechnungscodes ist jederzeit möglich.

Für das Jobmanagement werden unterschiedliche Möglichkeiten in die Prozesse integriert. Bei den integrierten Arbeitsabläufen wird das in den Altair Data Manager integrierte Tool zum Jobmanagement und zur Lastverteilung basierend auf den zur Verfügung stehenden Rechnerressourcen eingesetzt. Für die stand-alone Prozesse wird eine leicht zu adaptierende flexible Lösung zur Generierung und Steuerung der einzelnen Berechnungsjobs in die Routinen eingearbeitet.

Nach diesem Teilprozess liegen die Solver-spezifischen Ergebnisse der einzelnen Jobs vor.

Auswertung der Einzelsimulation

Die einzelnen Resultate der Berechnungen müssen entsprechend ausgewertet und aufbereitet werden. Durch die hohe Anzahl an Berechnungsläufen ist eine systematische Auswertung der Resultate unbedingt notwendig, einerseits um eine einheitliche und qualitativ hochwertige Darstellung der Ergebnisse zu erzielen, andererseits um Zeit und Kosten während der Entwicklungstätigkeit zu sparen.

Die Auswertung der einzelnen Simulationsläufe erfolgt mithilfe der Funktionalität der Software HyperView[®] sowie mit notwendigen Skripten zur Steuerung der einzelnen Abläufe. Diese Methodik kommt sowohl für die internen als auch für die externen Abläufe zum Einsatz, lediglich die Einbindung in den Prozess muss an die Systembedingungen angepasst werden.

Als Resultate dieses Teilprozesses liegen die Auswertungen der einzelnen Simulationen vor, diese umfassen einerseits Auswertedateien für HyperView[®] sowie Grafiken und Bilder, andererseits aber auch eine automatisierte Aufbereitung der Resultate in PowerPoint.

Visualisierung der Resultate des gesamten Lastfalls

Als Spezifikum des Fußgängerschutzes ist die Vielzahl von Einzelsimulationen zu nennen. Dies ist einerseits durch die hohe Anzahl von Auftreffpunkten, die unterschiedlichen Impaktoren und gesetzlichen Randbedingungen, andererseits aber auch durch die verschiedenartigen Modellvarianten des Fahrzeuges bedingt. Dadurch ist es während der Entwicklung sehr schwierig, den Überblick über die einzelnen berechneten Jobs zu behalten.

Durch geeignete Visualisierungsmethoden wird ein Zusammenhang zwischen den gesetzlich definierten Randbedingungen und Auftreffflächen sowie den erzielten Resultaten für den gesamten Lastfall hergestellt. Durch eine systematische Zusammenfassung und Aufbereitung der Resultate aus den einzelnen Simulationen kann ein sehr guter Überblick über die erlangten Ergebnisse gewonnen werden. Die Methodik arbeitet mit mathematischen Algorithmen und TCL/TK basierenden Skripten, die Visualisierung der Resultate erfolgt in HyperView[®]. Eine visuelle Aufbereitung der gesammelten Resultate eines Lastfalles schließt diesen Teilprozess ab.

5.2 Automatisierter Modellaufbau

Wie bereits in Abschnitt 4.3 dargestellt, ist dem Sammeln der relevanten Daten 51% der gesamten Simulationszeit zuzuschreiben. Zählt man das Aufbereiten der Daten sowie die Modellerstellung – also das klassische Pre-Processing – ebenfalls zu diesem Zeitkonto, so wird deutlich, dass ca. 70% der notwendigen Zeit für die Vorbereitung der einzelnen Simulationen aufgewendet wird [KRA01].

Im Bereich des Modellaufbaus kann durch die Automatisierung der einzelnen Teilschritte eine erhebliche Reduktion der Durchlaufzeiten erzielt werden. Dazu bedient man sich einer systematisch unterteilten Gliederung des Modellerstellungsprozesses. Ansätze hierzu wurden bereits in Abschnitt 4.3.3 kurz erläutert und sind in Abbildung 4.24 exemplarisch dargestellt.

5.2.1 Prinzipieller Aufbau eines Berechnungsmodells

Bei den meisten Berechnungsdisziplinen sind die für den Solver notwendigen Inputdecks bzw. Berechnungsmodelle als ASCII-Dateien vorhanden. Im Allgemeinen werden diese Berechnungsmodelle mit einem Master-Inputdeck und einer Vielzahl von Include-Files aufgebaut. Durch die Trennung in einzelne Include-Files erlangt man eine gute Übersichtlichkeit, des Weiteren die Möglichkeit, die Arbeiten parallel durchführen zu können und vor allem einen systematischen Aufbau des gesamten Berechnungsmodells. Zusätzlich zu den geometrischen Informationen sind technologische Informationen, Solverinformationen und lastfallspezifische Randbedingungen notwendig, um ein vollständiges Berechnungsmodell zu erhalten, wie es in Abbildung 5.2 gezeigt wird.



Abbildung 5.2: Unterteilung des Berechnungsmodells in einzelne Teilbereiche

Um ein vollständiges Modell des Gesamtfahrzeuges bzw. je nach Anforderung auch nur ein Teilmodell dessen zu erhalten, werden einzelne Include-Files kombiniert. Dabei wird, wie in Abbildung 5.3 schematisch dargestellt, ein hierarchischer Ansatz verwendet, welcher die Unterteilung des Gesamtfahrzeugmodells in einzelne Baugruppen oder Bauteile erlaubt. Jedes einzelne Include-File ist dabei mit kleinen Ergänzungen für sich selbst rechenfähig, wodurch auch eine sehr gute Kontrolle der einzelnen Files gewährleistet werden kann.

Zusätzlich zu den einzelnen Bauteilen müssen die Verbindungen zwischen den einzelnen Bauteilen und Baugruppen realisiert und in das Gesamtmodell integriert werden. Modelle für Schweißpunkte, Schweißnähte, Klebungen oder andere Techniken dienen zur fixen Verbindung von Bauteilen. Für variable Verbindungen zwischen einzelnen Bauteilen und Modulen werden beispielsweise Scharniere oder Schlösser, wie sie bei Türen oder Klappen zum Einsatz kommen, verwendet. Beide Arten der Verbindungstechnik müssen mit geeigneten Modellen in der Simulation abgebildet werden.

Die strukturmechanischen Eigenschaften der einzelnen Bauteile sowie die Verbindungstechniken werden mithilfe technologischer Informationen, welche in Form von Materialkarten im Berechnungsmodell enthalten sein müssen, berücksichtigt.

Sämtliche Informationen zur Steuerung der Berechnung werden im Control-File abgelegt. Die wichtigsten Anweisungen darin betreffen die Kontrollparameter für den Solver und die Angaben zu den gewünschten Resultaten wie beispielsweise 3d-Plotdaten, Binary- oder ASCII-Dateien der Berechnungsergebnisse. Eine einfache Dokumentation über das Modell und den Lastfall wird ebenfalls sehr häufig im Header des Control-Files inkludiert.

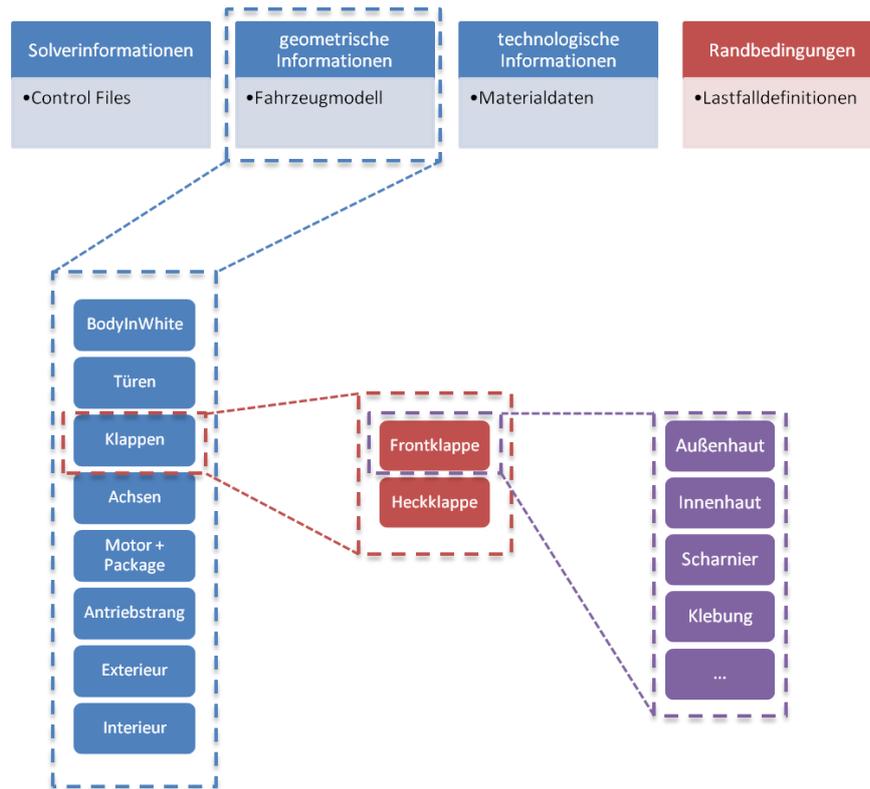


Abbildung 5.3: Hierarchisch strukturierter Modellaufbau des Gesamtfahrzeugmodells

5.2.2 Bausteine für den Modellaufbauprozess

Die wichtigsten Elemente, welche beim Modellaufbau verwendet werden, sind in Abbildung 5.4 dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass unterschiedliche Systeme über definierte Schnittstellen miteinander verbunden sind und dass die Kommunikation zwischen diesen Systemen von entscheidender Bedeutung ist. Analog zum Aufbau der Entwicklungsplattform in Abschnitt 4.1.2 findet auch hier eine Unterteilung in einzelne Bereiche, nämlich Design, Mesh und Assemble, statt.

Diesen drei Bereichen übergeordnet ist der Engineering Data Backbone, der als Schnittstelle zu allen relevanten Daten für den Modellaufbau dient. Hierbei handelt es sich um allgemeine Daten zum Projekt, zur Konfiguration des jeweiligen Lastfalls, sämtliche Informationen zum Modellaufbau sowie notwendige Routinen und Templates für die Durchführung und Analyse der Simulationen.

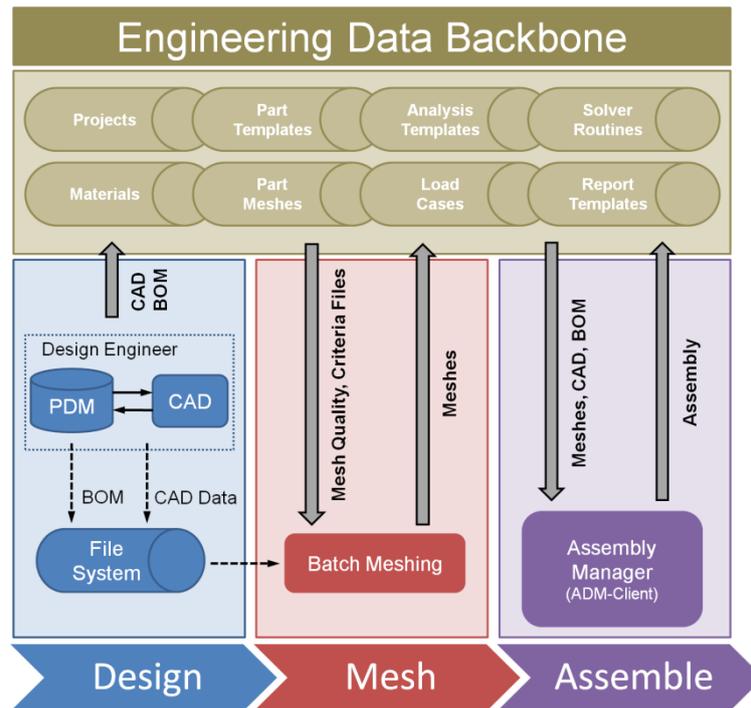


Abbildung 5.4: Darstellung der allgemeinen Assembly-Generierung

Bereitstellung der Daten

Basis für den gesamten automatisierten Modellaufbau sind Informationen über das Design. Diese werden in einem übergreifenden PDM-System, welches direkt mit der jeweils verwendeten CAD Umgebung interagiert, verwaltet. Für den Modellaufbau werden daraus einerseits die relevanten CAD Daten und andererseits sämtliche Informationen zur Produktstruktur und zu den Eigenschaften der einzelnen Bauteile benötigt. Zu diesem Zweck werden Stücklisten und sogenannte BOM¹ Dateien, woraus eine vollständige Produkt- bzw. Modellstruktur abgeleitet werden kann, verwendet.

Für den automatisierten Modellaufbau müssen zu den einzelnen Bauteilen alle notwendigen Informationen vorliegen, dazu zählen:

- Eindeutige Bauteilbezeichnung (Bauteilnummer, Versionsnummer)
- Materialbezeichnung aus dem CAD bzw. PDM System
- Blechstärken bzw. Kennzeichnung, ob es sich um ein Solid Bauteil handelt
- Kennzeichnung symmetrischer Bauteile
- Transformationsmatrix für mehrfach verbaute Bauteile

¹ BOM: Bill Of Material: Eine Materialstückliste ist eine strukturierte Anordnung von Teilen oder Baugruppen, welche zur Herstellung eines Produkts benötigt werden. Mittels Stückliste wird die Vollständigkeit eines in Einzelteilen gelieferten Systems überprüfbar. Im Bereich des automatisierten Modellaufbaus wird die BOM als „MASTER“ verwendet, da durch deren Verwendung auch die Vollständigkeit des numerischen Modells sichergestellt werden kann.

Zusätzlich müssen Angaben zu den unterschiedlichen Verbindungen zwischen den Bauteilen und Baugruppen vorhanden sein. Für den vollständigen Modellaufbau müssen auch noch zum Teil projekt- und lastfallspezifische Modellspezifika wie beispielsweise Ersatzmassen für Insassen oder Zusatzmassen hinterlegt sein, welche schließlich im Modell berücksichtigt werden.

Festlegen der Modellstruktur

Die Produktstruktur, welche im BOM File dargestellt ist, wird in das Assembler Modul des ADM importiert. Der Assembler des Altair Data Managers unterstützt den direkten Import von Altair XML¹, STEP AP214 und PLMXML – diese Formate werden zum Teil direkt aus PDM Paketen (z.B. Teamcenter) oder CAD Programmen (z.B. Catia) exportiert. Andere Formate können durch die Einbindung von Konvertierungsprogrammen unterstützt werden [EIC07].

Die Produktstruktur kann manuell ergänzt, reduziert und bearbeitet werden. Da nicht für alle Simulationstasks eine vollständige Abbildung der gesamten Struktur notwendig ist, kann man durch Konfigurationsdateien ein für das Projekt und für den jeweiligen Lastfall abgestimmtes Berechnungsmodell definieren.

Charakterisierung der Bauteileigenschaften

Im BOM File sind den einzelnen Bauteilen die Materialbezeichnungen aus dem CAD System zugewiesen. Basierend auf einer Material-Mappingtabelle werden den einzelnen Bauteilen FE-Materialien zugeordnet, diese können bei Bedarf auch noch korrigiert oder ergänzt werden. Die einzelnen Materialeigenschaften, welche in Form von Materialkarten in den Solverfiles inkludiert werden, sind zentral in einer Materialdatenbank gespeichert. Diese beinhaltet umfassende Materialcharakteristika für den jeweiligen Werkstoff, da für die unterschiedlichen Berechnungsdisziplinen auch unterschiedliche Materialdaten notwendig sind. So sind beispielsweise für Crashanalysen Informationen zum dehnratenabhängigen nichtlinearen Verhalten der Werkstoffe ebenso wie zum Versagen von Material und Bauteil notwendig. Für NVH Analysen sind wiederum die Dämpfungs- oder Dämmungswerte der Werkstoffe von Bedeutung.

Zusätzlich zu den Materialeigenschaften sind für die Blechstrukturen auch noch Angaben zur Materialstärke notwendig. Bei Solid-Bauteilen ist dies nicht erforderlich, diese müssen jedoch als solche gekennzeichnet sein.

Einbindung der Netze

Im nächsten Schritt müssen jedem Bauteil FE-Netze zugeordnet werden. Dabei können auch verschiedene Netzvarianten zu einem Bauteil verlinkt sein. Dies ist sehr häufig notwendig, um beispielsweise die unterschiedlichen Formen der Diskretisierung für die einzelnen Berechnungsdisziplinen berücksichtigen zu können.

¹ Die Extensible Markup Language (engl. für „erweiterbare Auszeichnungssprache“), abgekürzt XML, ist eine Auszeichnungssprache zur Darstellung hierarchisch strukturierter Daten in Form von Textdateien. XML wird u. a. für den Austausch von Daten zwischen Computersystemen eingesetzt. ADM unterstützt dabei unterschiedliche Standards (z.B. Altair XML, PLM XML) zum Datenaustausch und zur Beschreibung der Produktstruktur.

Basierend auf der Bauteil-ID wird im Modellverzeichnis nach passenden Netzen gesucht, ebenso werden automatisch neue Varianten der Netze in den ADM eingelinkt, um die Aktualität des numerischen Modells sicherzustellen. Sollten zu einzelnen Bauteilen oder ganzen Modulen keine Netze gefunden werden, so werden diese manuell gelinkt oder mithilfe eines parallelen Batchmeshing Prozesses erzeugt.

Batchmeshing

Die Datenaufbereitung und Vernetzung der einzelnen Bauteile auf Basis von Geometrieinformationen stellt einen erheblichen zeitlichen Aufwand im Verlauf des Simulationsprozesses dar. Neueste Techniken erlauben ein automatisches Vernetzen der Bauteile, was auch parallel auf Großrechnern durchgeführt werden kann. In den ADM können unterschiedliche Batchmeshing Abläufe implementiert werden, vorwiegend wird jedoch mit dem in die HyperWorks® Suite integrierten Batchmesher gearbeitet.

Basierend auf den Geometrieinformationen und einer Vielzahl von Parametern werden die Bauteile automatisch vernetzt, hinsichtlich definierter Kriterien kontrolliert und in das System eingespielt. Die dafür notwendigen Vernetzungsparameter sind abhängig vom Lastfall und von den projektspezifischen Anforderungen. Nach dem Vernetzungsprozess werden die Netze in den ADM gelinkt und somit den Bauteilen zugeordnet. Durch voneinander verschiedene Parametersätze können für die einzelnen Disziplinen unterschiedliche Netze erzeugt werden.

Zusatzmassen, Massenbilanz

Dadurch, dass nicht alle Details und Bauteile des Produkts im numerischen Modell abgebildet sind, kommt es zu mehr oder weniger ausgeprägten Unterschieden bei der Massenbilanz. Diese Unterschiede können jedoch je nach Lastfall erhebliche Auswirkungen auf die Resultate der Berechnung haben. Aus diesem Grund werden Massenbilanzen durchgeführt und Fehler korrigiert. Bei der Fahrzeug-Massenbilanz handelt es sich um die Berücksichtigung aller Bauteile und Komponenten, welche nicht als FE-Netz dargestellt werden, basierend auf ihrer Masse. Ziel dabei ist die Abbildung des Leergewichtes des Gesamtfahrzeuges. Zur Abbildung lokaler Einflüsse muss der Massentrimm möglichst an jener Position aufgebracht werden, an welcher die Differenz besteht.

Zum Einsatz kommen Manipulationstechniken, welche die Dichte einzelner Blechstrukturen verändern, um beispielsweise die Massen aufgeklebter Dämmmaterialien oder Teppichen zu berücksichtigen. Desweiteren werden Knotenmassen mithilfe von einfachen Verbindungstechniken an gezielte Strukturbereiche gehängt, diese Art der Manipulation wird etwa zur Berücksichtigung von Zusatzmassen oder nicht abgebildeten Strukturbauteilen durchgeführt.

Je nach Lastfall (z.B. Crash-Vorschrift) wird eine Mindestauflastung zum Leergewicht des Fahrzeuges vorgeschrieben. Die Einbringung dieser Zusatzlast erfolgt im Zusammenhang mit der Lastfalldefinition. Die Methodik zur Berücksichtigung der Massen ist aber dieselbe.

Verbindungstechniken

Einzelne Bauteile werden zumeist durch Schweiß-, Schraub- und Klebeverbindungen miteinander verbunden. Zunehmend kommen neue Verbindungstechniken wie Stanznieten oder Punktschweißkleben hinzu. Im numerischen Modell müssen all diese Verbindungen ebenfalls abgebildet werden – einerseits die geometrischen Abbildungen, um die Verbindungstechnik im numerischen Modell zu diskretisieren, andererseits die technologischen Informationen, um das Strukturverhalten und das Versagen der Verbindungstechnik in der Simulation zu berücksichtigen.

Die Definition der Verbindungstechnik erfolgt über Koordinatenlisten mit Angabe der entsprechenden Verbindungspartner. Diese Informationen werden vom Assembler importiert und zunächst im HyperMesh® als neutrale Konnektoren dargestellt. Beim Export bzw. beim Erzeugen des Solverfiles werden daraus speziell für den Solver adaptierte Verbindungen wie beispielsweise netzunabhängige Hexaeder-Schweißpunkte, netzunabhängige Spotweld-Beams oder auch spezielle Finite Elemente zur Beschreibung des strukturellen Verhaltens der Verbindungstechnik.

Im Fall von netzabhängigen Verbindungstechniken wie etwa Schweißnähten in der statischen und dynamischen Steifigkeitsberechnung oder in Betriebsfestigkeitsuntersuchungen muss das Bauteilnetz entsprechend der Modellierungsvorschrift für diese Verbindungstechnik modifiziert werden.

Assemblierung der Teilmodelle

Bei der automatischen Assemblierung des Modells werden die Funktionalitäten der HyperWorks® Suite verwendet. Im Batchmode werden die einzelnen Bauteile in HyperMesh® geladen, bei Bedarf mithilfe der Transformationsmatrix positioniert oder bei Mehrfachverwendung kopiert. Basierend auf den Informationen aus dem BOM File werden die Bauteil-IDs und Bauteilnamen zugewiesen. Des Weiteren werden die Daten zu den Verbindungstechniken importiert. Ein Check der Gültigkeit der Verbindung zeigt Fehler oder nicht realisierbare Verbindungen auf, welche auch protokolliert werden.

Modellcheck

Nach der Assemblierung der einzelnen Bauteile, Konnektoren und Zusatzmassen wird das Modell nochmals auf verschiedenste Kriterien hin überprüft. Durch eine standardisierte Arbeitsweise und eine durchgängige Qualitätskontrolle beim Modellaufbau sollen Fehler minimiert werden. Mithilfe von automatisierten Abläufen werden Bauteileigenschaften, Ersatzmassen oder die Vollständigkeit des numerischen Modells erneut überprüft, wodurch unnötige Berechnungen vermieden werden sollen. Außerdem können diese Checks als Dokumentation für den Modellaufbau herangezogen werden.

Durchdringungen

In HyperMesh® können physikalische Durchdringungen und auch Kontaktdurchdringungen automatisch gesucht werden. Berücksichtigt werden dabei auch die Blechstärken und die Kontaktdicken. Sollten bei einem Modell Durchdringungen auftreten, so werden diese

grafisch angezeigt, eine Beseitigung der Durchdringungen kann entweder mithilfe automatischer Algorithmen oder auch manuell erfolgen. Durchdringungen sind vor allem bei Crashlastfällen, nichtlinearen Strukturlastfällen oder nichtlinearen NVH-Themen von entscheidender Bedeutung.

Switch des Modells auf spezifische Solver

Nach den Modellchecks, welche noch im neutralen ADM bzw. im HyperMesh® Format durchgeführt werden, müssen aus den solverneutralen Bauteilinformationen und Modellen die entsprechenden Solverfiles, wozu insbesondere Materialkarten, Bauteilbeschreibungen, Zusatzmassen und Verbindungstechniken zählen.

Assemblierung des Gesamtmodells

Der bisher vorgestellte Ablauf der Modellerstellung beschreibt die Assemblierung eines Teilmodells (z.B. Klappe, Rohbau) aus einzelnen Bauteilen. Das Gesamtmodell kann auf Basis solcher Include-Files sehr einfach und vor allem sehr übersichtlich aufgebaut werden. Wie bereits beschrieben, wird das Gesamtmodell mit einem Master-File vollständig definiert. Darin werden die einzelnen Include-Files aufgerufen, ebenso werden Material- und Control-Files berücksichtigt, um so ein vollständiges numerisches Modell zu erhalten. Die Verbindungen zwischen den einzelnen Include-Files werden ähnlich wie bei der Erstellung der Assemblies realisiert, hier kommen jedoch schwerpunktmäßig andere Verbindungstechniken zum Einsatz. Beispielsweise müssen durch geeignete Diskretisierungen und Methoden die Eigenschaften und Strukturen von Schrauben, Türschlössern oder Scharnieren abgebildet werden.

5.2.3 Prozessablauf-Workflow

Die einzelnen in Abschnitt 5.2.2 dargestellten Methoden werden durch einen durchgängigen Prozess zu einem voll- oder teilautomatisierten Ablauf kombiniert, wie es in Abbildung 5.5 dargestellt ist. Die gesamte Systemlandschaft und vor allem die Schnittstellen sowie die Kommunikation zwischen den einzelnen Systemen müssen aufeinander abgestimmt sein. Dem Entwicklungsingenieur werden bei einzelnen Prozessschritten Möglichkeiten zum Zugriff, zur Kontrolle bzw. unterschiedliche Optionen zur Manipulation zur Verfügung gestellt, um manuell in den Ablauf einzugreifen. Dies ist insbesondere bei Problemen beziehungsweise bei komplexen oder von den Standards abweichenden Aufgabenstellungen unumgänglich.

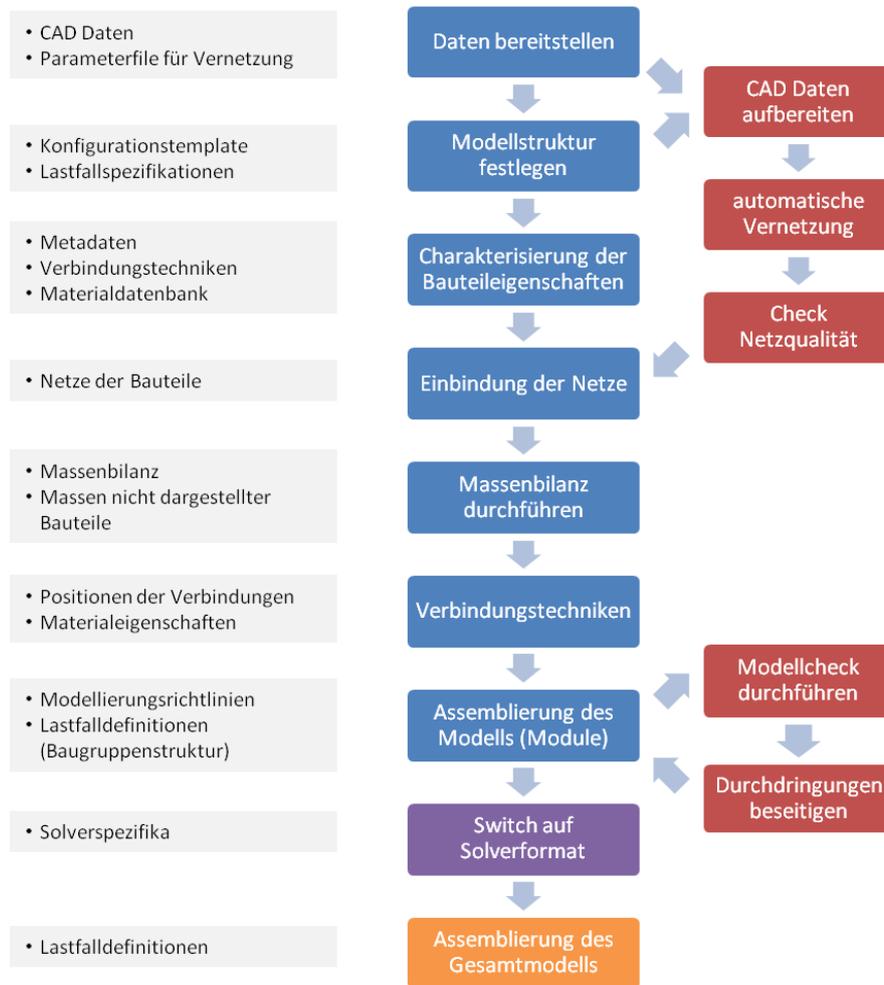


Abbildung 5.5: Prozess für die Assembly-Generierung

5.3 Lastfallspezifisches Pre-Processing

Basierend auf dem Fahrzeugmodell – beim Fußgängerschutz auch dem Modell der Fahrzeugfront zugrunde liegend – werden das Setup des Lastfalles sowie die dafür notwendigen Manipulationen und Ergänzungen durchgeführt. Als Resultat liegt das vollständige Solverdeck für den Lastfall vor.

Der Fußgängerschutz zeichnet sich durch eine Vielzahl von Auftreffpunkten je gesetzlicher Anforderung aus, dadurch wird die Anzahl der zu simulierenden Einzellastfälle enorm hoch. Durch ein systematisches und vor allem automatisiertes Pre-Processing können die Abläufe deutlich vereinfacht und beschleunigt werden. Das lastfallspezifische Pre-Processing für den Fußgängerschutz lässt sich in mehrere Phasen unterteilen:

- Festlegen des relevanten Auftreffbereichs
- Definition der Auftreffpunkte
- Berechnung der Impaktorposition für die Simulation

- Aufsetzen der einzelnen Sub-Lastfälle inklusive des notwendigen Datenmanagements

Die ersten drei Phasen müssen je Lastfall nur einmal durchgeführt werden. Eine erneute Durchführung ist nur bei geändertem Design der Fahrzeugfront notwendig, da sich dadurch die auch die gesetzlich definierten Auftreffbereiche ändern.

Pre-Processing Ablauf und Begriffserläuterungen

Ein vollständiger Lastfall im Fußgängerschutz entspricht einer technischen Anforderung, welche entweder auf gesetzlichen Vorschriften oder auch auf Konsumentenschutz-Zielwerten beruht. Dabei ist jeder einzelne Lastfall durch einen Impaktortyp mit entsprechenden Anprallkonstellationen und durch einen definierten Auftreffbereich gekennzeichnet. Demnach besteht dieser Lastfall aus einer Vielzahl von Auftreff- bzw. Anprallpositionen, welche auch als Sub-Loadcases bezeichnen werden. Eine Anprallposition entspricht somit einem durchzuführenden Simulationslauf bzw. in der Realität einem durchzuführenden Versuch.

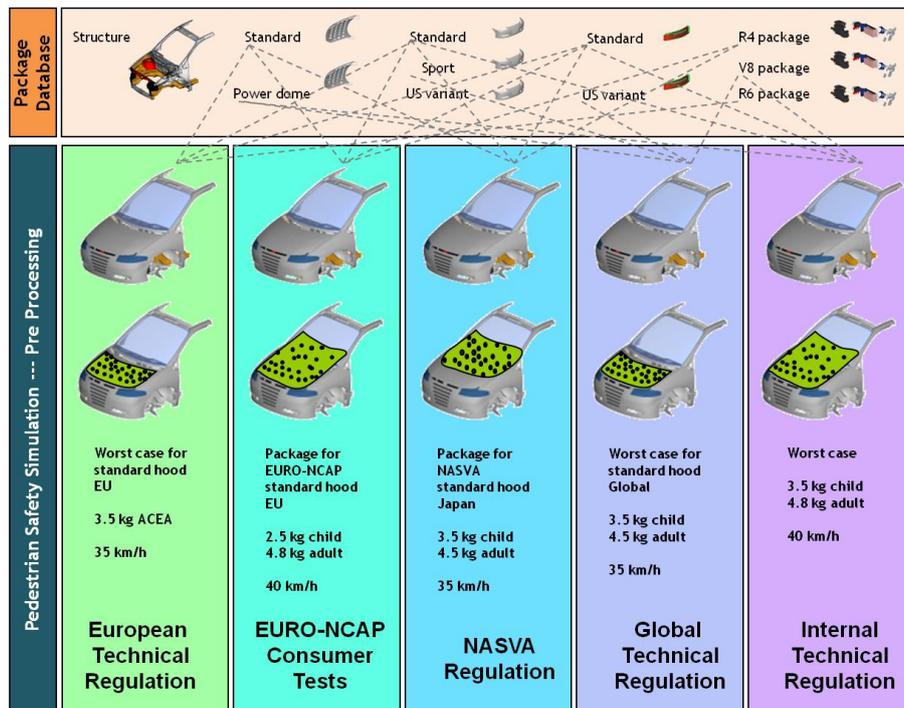


Abbildung 5.6: Pre-Processing des Lastfallmanagements für den Fußgängerschutz

Für jeden Lastfall muss eine genau spezifizierte Fahrzeugkonfiguration verwendet werden, entsprechend können sich die Motor- und Antriebstrangkomponenten, das gesamte Package, die Frontklappe, das Exterieur mit den Anbauteilen, einzelne Teile der Fahrzeugstruktur oder das Fahrwerk und damit verbunden die Fahrzeughöhen ändern. Beispielsweise wird bei den Untersuchungen nach der Konsumentenschutzvorschrift gemäß Euro-NCAP die am häufigsten verkaufte Motor- bzw. Fahrzeugvariante verwendet, bei den verschiedenen gesetzlich definierten Vorschriften nach [EUR03] müssen jedoch alle Motor- und Fahrzeugvarianten betrachtet werden. Hinzu kommt, dass bei den unterschiedlichen

Anforderungen geometrisch divergente Auftreffflächen sowie sich voneinander unterscheidende Impaktoren zur Anwendung kommen, wodurch sich beim Fußgängerschutz ein komplexes Lastfallmanagement ergibt, wie in Abbildung 5.6 schematisch dargestellt ist.

Erforderliche Daten und Informationen

Das lastfallspezifische Pre-Processing basiert auf dem vollständig aufgebauten Fahrzeugmodell, dieses kann entweder manuell aufgebaut worden sein oder automatisiert durch das Daten- und Prozessmanagementsystem entstanden sein. Für jeden Lastfall gibt es eine fixe Auftrefffläche des jeweiligen Impaktors, welche sich durch geometrisch exakt definierte Begrenzungen aufspannt, wie es in Abbildung 5.7 für den Kopfanprall nach Euro-NCAP dargestellt ist. Mithilfe eines Makros oder eines Workflows können diese Flächen im Konstruktionspaket sehr einfach und automatisiert erzeugt und anschließend als einfache Geometrie bzw. Fläche im PDM System abgelegt werden.

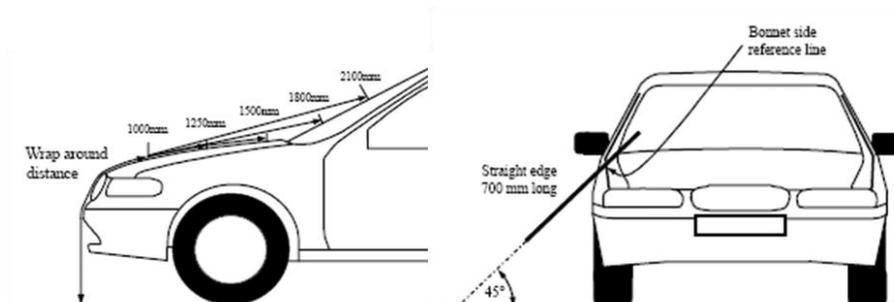


Abbildung 5.7: Definition der Auftrefffläche nach Euro-NCAP [EUR04]

In einzelnen Fällen kann eine zusätzliche Unterteilung der Fläche in definierte Teilflächen erforderlich sein, wie es in Abbildung 5.8 für Auftreffflächen nach Euro-NCAP dargestellt ist. Diese Teilflächen sind für festgelegte Bewertungsschemata und Rankings der Fußgängersicherheit notwendig.

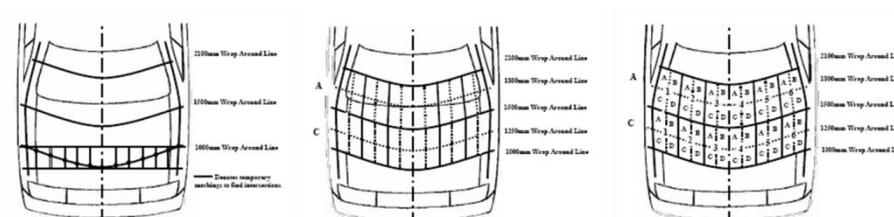


Abbildung 5.8: Unterteilung der Auftrefffläche für die Bewertung nach Euro-NCAP [EUR04]

Durch eine Verlinkung des PDM Systems mit dem Simulationsdatenmanagementsystem kann direkt auf die Geometrie der Auftrefffläche zugegriffen werden, alternativ kann die Fläche manuell exportiert bzw. in den Pre-Processor importiert werden. Für die weiteren Prozessschritte wird die Fläche mithilfe des Pre-Processors vernetzt und im Datenmanagementsystem abgelegt, wodurch die Informationen mit jedem üblichen Produkt für das Pre- und Post-Processing genutzt werden können.

Dieses Netz wird für alle notwendigen Datenmanipulationsschritte und auch Visualisierungen verwendet. Sollte für den jeweiligen Lastfall keine Geometrie für die Auftrefffläche vorhanden sein, so können die weiteren Prozessschritte auch mit einem Ersatznetz, welches sich aus bereits bestehenden Bauteilnetzen der Fahrzeugfront erstellen lässt, durchgeführt werden. Generell wird für die Auftrefffläche ein relativ feines Netz verwendet, dadurch können stabilere Datenmanipulationsschritte und qualitativ hochwertige grafische Darstellungen erzeugt werden.

Des Weiteren sind für das Aufsetzen der einzelnen Simulationen die numerischen Modelle der Impaktoren notwendig. Diese sind im Katalog des Simulationsdatenmanagementsystems gespeichert und werden dort zentral auf aktuellstem Stand gehalten. Für jede Simulationenaufgabe werden durch diese zentrale Datenhaltung die jeweils zuletzt gültigen numerischen Modelle verwendet.

Festlegen der Auftreffpunkte und Impaktorpositionierung

Für jeden Lastfall sind die Anprallpunkte des Impaktors festzulegen, wobei es gilt, unterschiedliche Aufgabenstellungen zu erfüllen. Einerseits kann der Status bezüglich des zu betrachtenden Lastfalles zu ermitteln sein, andererseits kann der Schwerpunkt speziell auf kritische Punkte oder auf einzelne Auftreffpunkte, von denen auch Versuchsdaten vorhanden sind, gelegt werden. Das Festlegen der einzelnen Anprallpunkte kann dabei auf unterschiedliche Weise erfolgen.

Wie in Abbildung 5.9 zu erkennen ist, kann der Prozess zur Impaktorpositionierung mittels zweier voneinander verschiedener Methoden durchgeführt werden, nämlich mithilfe der direkten oder der indirekten Koordinatenwahl. Bei der direkten Koordinatenwahl sind die exakten Impaktorpositionen bereits vorhanden, beispielsweise aus dem Versuch, aus der Konstruktionsabteilung oder auch hervorgehend aus anderen Simulationen. Bei der indirekten Koordinatenwahl müssen diese mithilfe mathematischer Algorithmen bestimmt werden, wofür zwei unterschiedliche Methoden zur Verfügung stehen, wie es auch in Abbildung 5.9 durch die parallel dargestellten Prozessabläufe ersichtlich ist.

Zusätzlich gibt es bei der indirekten Koordinatenwahl während des Positionierungsprozesses eine Gliederung in zwei Teilschritte. Der erste Schritt ist die Auswahl der einzelnen Auftreffpunkte, der zweite Schritt ist die Berechnung der Impaktorpositionen für die numerische Simulation. Als Ergebnis des ersten Schrittes liegen Datenreihen für einzelne Anprallpositionen vor, diese sind entweder direkt auf der Auftrefffläche positioniert oder alternativ auch in einer neutralen Ebene – beispielsweise durch ein strukturiertes Raster – definiert. Im zweiten Schritt wird die für den jeweiligen Auftreffpunkt notwendige Impaktorposition für die numerische Simulation berechnet. Für diesen Schritt stehen zwei unterschiedliche Algorithmen zur Verfügung, als Resultat dieser Datenmanipulation werden die Mittelpunkte des Impaktors in eine Datenreihe geschrieben.

Um den Status der Auftrefffläche zu erhalten, wird sehr häufig ein sehr enges Raster über die gesamte Fläche gespannt, weshalb eine sehr hohe Anzahl von einzelnen Simulationen notwendig ist, dadurch wird die Aussagequalität über die gesamte Fläche sehr hoch. Der Nachteil davon ist, dass durch eine rein automatische Generierung der Anprallkoordinaten

einzelne kritische Punkte oft nicht exakt erreicht werden, durch eine manuelle Auswahl von einzelnen Anprallpunkten können jedoch gezielt kritische Punkte angewählt werden. Mit letzterer Methode können exakt jene Anprallpositionen, wie sie beispielsweise bei Versuchen bestimmt wurden, ausgewählt werden.

In der Praxis wird eine Kombination der Auswahlverfahren angewandt, die erarbeiteten Methoden sind auch für diese Aufgabenstellung ausgelegt, wodurch ein sehr flexibler Einsatz im Entwicklungsablauf sichergestellt werden kann.

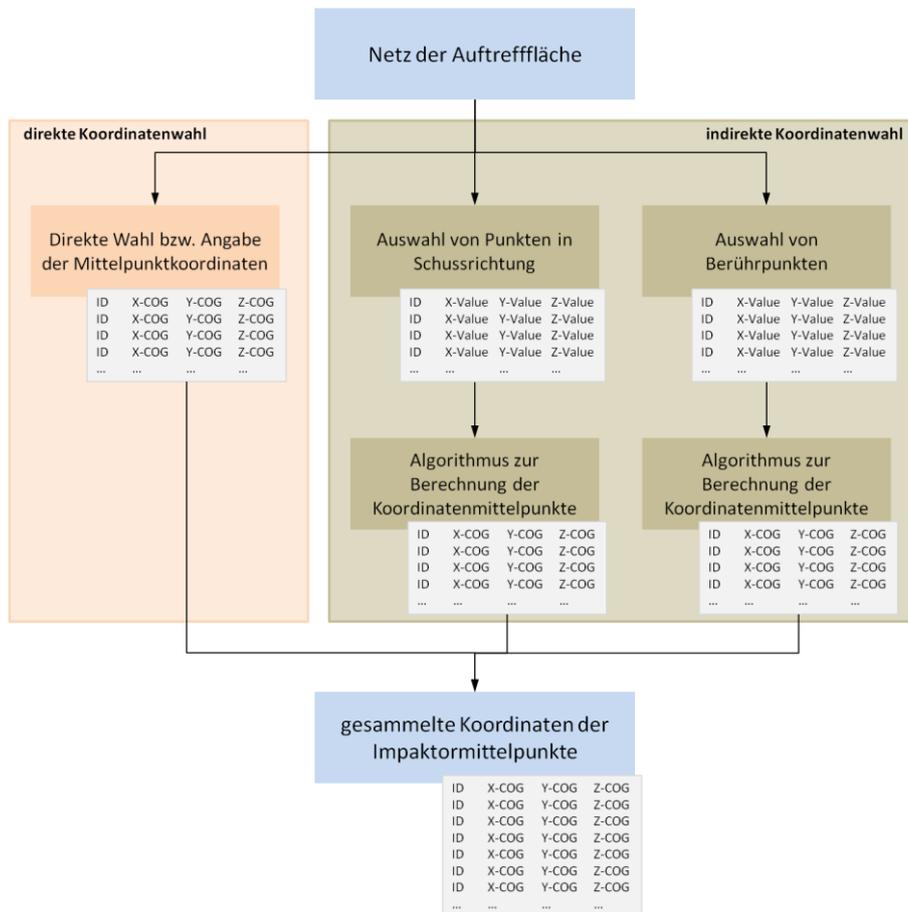
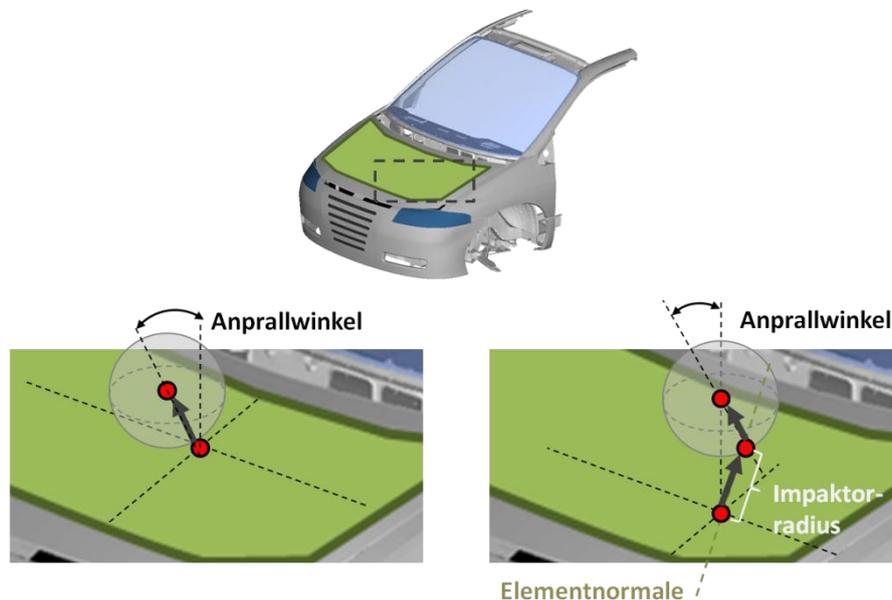


Abbildung 5.9: Prozess zur Generierung des Koordinatenfiles

Für die Berechnung der einzelnen Impaktorpositionen bei der indirekten Koordinatenwahl stehen zwei unterschiedliche Algorithmen zur Auswahl. Die Routinen werden mithilfe der HyperWorks® Suite und der programmierten Algorithmen inklusive eines GUI¹ zur Definition und Steuerung des Prozesses abgearbeitet. Als Input für die Datenmanipulationen werden die zuvor exportierten Auftreffpunkte und das im vorherigen Schritt erzeugte Netz der Auftrefffläche verwendet. Zusätzlich werden Informationen zur Geometrie des Impaktors und zum Lastfall benötigt. In Abbildung 5.10 sind die Abläufe dargestellt, auch die Unterschiede der beiden Routinen sind deutlich zu erkennen.

¹ GUI: Graphical User Interface

Beim ersten Algorithmus, hier als Algorithmus Schussrichtung bezeichnet, wird ausgehend vom gewählten Koordinatenpunkt eine geometrische Ersatzfläche – beim Kopffimpaktor ist dies eine Kugel – entgegen der Schussrichtung nach oben geschoben, bis sich keine Geometrieinformationen mehr innerhalb des Kugeldurchmessers befinden. Als Geometrieinformationen werden sowohl die Koordinaten der einzelnen Knoten, als auch die einzelnen Elemente des Netzes der Auftrefffläche verwendet. Somit wird durch diesen Positionierungsalgorithmus jener Mittelpunkt des Impaktors errechnet, bei dem die Schussrichtung exakt auf die zuvor angegebene Koordinate zielt und keine Durchdringungen zwischen Impaktor und Auftrefffläche vorhanden sind. Bei diesem Vorgehen und durch die oftmals komplexe geometrische Ausprägung der Motorhaube kann es in der Simulation zu Abweichungen zwischen der zuvor angegebenen Koordinate und dem tatsächlichen Erstkontaktpunkt kommen. Zum Einsatz kommt diese Methode vorwiegend, wenn ein gesamtes Raster inklusive Koordinatenpunkte gewählt wird.



Algorithmus Schussrichtung

Ausgehend von einem Punkt wird entgegen der Schussrichtung der COG des Impaktors berechnet. Dabei wird der Mittelpunkt des Impaktors so lange entlang der Schusslinie bewegt, bis es keine Durchdringungen zwischen der Auftrefffläche und den Impaktor mehr gibt.

Algorithmus Berührungspunkt

Ausgehend von einem Berührungspunkt auf der Auftrefffläche wird die durchschnittliche Elementnormale berechnet. Im Abstand von exakt dem halben Impaktordurchmesser entlang der Elementnormalen wird ein temporärer Punkt berechnet. Danach wird mit Hilfe des Algorithmus Schussrichtung der COG des Impaktors gesucht.

Abbildung 5.10: Algorithmen zur Berechnung des Impaktormittelpunktes

Häufig ist es jedoch wünschenswert, gezielt die Erstkontaktpunkte beim Impaktoranprall zu erreichen. Um dies sicherzustellen, kommt ein alternativer Algorithmus, hier als Algorithmus Berührungspunkt bezeichnet, zur Berechnung der Impaktorposition zum Einsatz. Dieser Algorithmus verwendet die Koordinaten des angegebenen Erstkontaktpunktes und Geometrieinformationen im Umfeld des Punktes. Auf Basis der ermittelten durchschnittlichen Elementnormalen des Umfeldes wird eine resultierende Normale für den jeweiligen

Transformation dienen ebenso dazu, die Geschwindigkeitsvektoren für den Impaktor zu berechnen und anschließend in die entsprechenden Solverfiles zu integrieren. Sämtliche Informationen für den Lastfall und die Anprallposition sowie die Transformation werden in ein File geschrieben, am Beispiel von LS-Dyna® in das File motion.key. Zusätzliche Informationen, dies sind der Aufruf des erzeugten Files im Startfile der Berechnung sowie die Kontakte zwischen dem Impaktor und dem Fahrzeugmodell, werden automatisch in das Startfile eingearbeitet. In Abbildung 5.11 ist der Ablauf zur Erzeugung der Files dokumentiert, dabei wird auf der linken Seite die Erzeugung der neuen Solverinformationen dargestellt, auf der rechten Seite die resultierende Solverfilestruktur des Lastfalls.

Die Positionierung sämtlicher Anprallpunkte und die Generierung des damit verbundenen vollständigen Solverdecks werden vollautomatisch durchgeführt. Im integrierten Prozess- und Datenmanagement erfolgt dies durch interne Routinen, beim stand-alone Prozess wird diese Datengenerierung mithilfe von TCL-Skripts durchgeführt. Zusätzlich ist bei der stand-alone Variante in diesem Schritt auch die Erzeugung von Batchdateien zum Start und zur Steuerung der einzelnen Simulationen enthalten. Dies kann separat für Windows-Rechner, für Linux-Workstations oder aber auch für den Clusterbetrieb mit oder ohne Lastverteilungssystem erzeugt werden.

Informationen für die Lastfallbewertung

Für die anschließenden Auswertungen sind die Angaben der gewünschten Daten erforderlich. Relevante Beschleunigungen - beispielsweise im Mittelpunkt des Impaktors - oder auch Kontaktkräfte, Deformationswege, Energien oder weitere für die späteren Betrachtungen interessante Informationen müssen entsprechend in den Inputfiles definiert werden. Dies erfolgt entweder in einem eigenen Include-File oder aber auch direkt bei den Modellen der dazugehörigen Komponenten oder Modulen.

Für den Kopfpunkt sind vor allem die Beschleunigungen des Impaktors relevant, da diese für die anschließenden Analysen verwendet werden. Diese werden zur Validierung, zum Vergleich von Varianten oder auch zur Gegenüberstellung mit gesetzlich definierten Kriterien und Grenzwerten eingesetzt.

GUI zur Steuerung des Prozesses

Um eine einfache Bedienung für den gesamten Prozess sicherzustellen, werden grafische Benutzeroberflächen eingesetzt. Dabei wird man mithilfe eines GUIs durch die einzelnen Prozessschritte geführt. In Abbildung 5.12 ist die Oberfläche für den stand-alone Prozess dargestellt. Beim internen Prozess sind die einzelnen Felder des hier dargestellten GUIs in entsprechende Pre-Processing Abläufe in die Entwicklungstools HyperMesh® und HyperView® integriert. In Feld 1 wird das Arbeitsverzeichnis festgelegt. In Feld 2 kann das Startverzeichnis mit den relevanten Files, dazu gehören das Fahrzeugmodell, das Impaktormodell oder und auch sonstigen relevanten Dateien, angegeben werden. Zusätzlich wird hier das Startfile für die Berechnung ausgewählt, welches für die Erzeugung der Skripte für den Batchmode und schließlich auch für den Start der Simulation notwendig ist. In den Feldern 3 und 4 werden die Solver und die eingesetzten Einheiten, welche auch für weitere Algorithmen benötigt werden, definiert.

Die Auswahl des eingesetzten Algorithmus erfolgt in Feld 5. Hier kann aus den beiden Algorithmen, die entweder einen Punkt in Schussrichtung oder alternativ einen Anprallpunkt auf der Auftrefffläche als Input verwenden, gewählt werden. Zusätzlich steht hier noch die Möglichkeit der direkten Wahl eines Datenfiles mit den Mittelpunktkoordinaten des Impaktors zur Verfügung, in diesem Fall wird das File ohne weitere Manipulationsschritte direkt weiterverwendet.

In Feld 6 wird einerseits das File mit den geometrischen Eigenschaften der Auftrefffläche, andererseits das Datenfile mit den Anprallpunkten ausgewählt. Die detaillierte Definition des Lastfalles wird ebenfalls in diesem Fenster durchgeführt. Durch den strukturierten Input der relevanten Lastfalldefinitionen kann eine sehr einfache Erzeugung der einzelnen Simulationstasks sichergestellt werden.

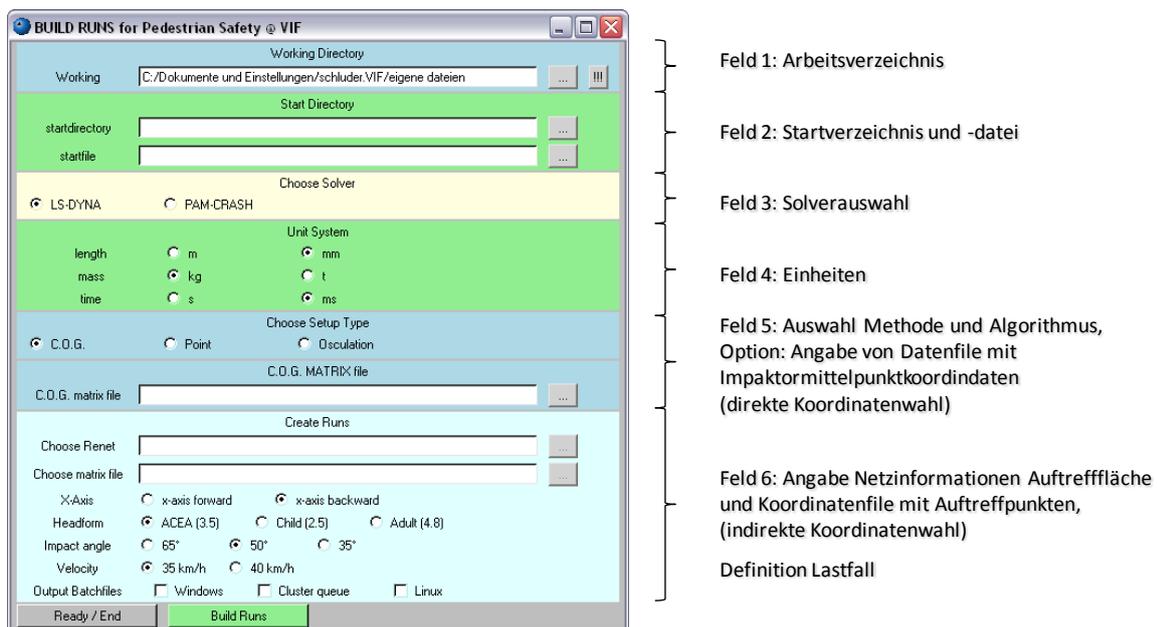


Abbildung 5.12: Grafische Benutzeroberfläche für die Lastfalldefinition am Beispiel des stand-alone Prozesses

Bei den systemintegrierten Prozessabfolgen werden die Angaben zu den allgemeinen Daten nicht in diesem Umfang benötigt, da diese bereits bei den allgemeinen Projekt- und Lastfalldefinitionen enthalten sind. Die Steuerung des Lastfalles erfolgt ebenfalls über grafische Benutzereingaben, welche direkt auf das Datenmanagementsystem zugreifen. Die Daten für den Lastfall, inkl. der Datenfiles mit den Anprallpunkten, werden ebenso im Datenmanagement gespeichert. Die einzelnen Simulationsdaten werden jedoch extern in einem definierten Ordern gespeichert. Dies ermöglicht einerseits die einfachere Verbindung mit einem Lastverteilungssystem, andererseits kann durch dieses Auslagern der Datenstand im System auf relativ niedrigem Niveau gehalten werden, lediglich relevante Informationen werden im Datenmanagementsystem gehalten.

5.4 Solving und Datenhandling

Die einzelnen Simulationstasks werden entweder lokal auf PCs oder Workstations, oder alternativ auf einem zentralen Rechencluster durchgeführt. Das Management bzw. die Verteilung der Jobs erfolgt manuell oder durch ein Lastverteilungssystem.

Nach der Rechnung werden die relevanten Daten, dies sind vor allem die Resultate zur grafischen Darstellung der Simulation, allgemeine Files und Ergebnisse zur Analyse der Simulation, aber auch sämtliche Resultate der im Inputfile definierten Sensoren, in die lokale Verzeichnisstruktur kopiert, wie sie in Abbildung 5.13 im Überblick dargestellt ist. Bei der Verwendung eines Datenmanagementsystems werden diese Daten in das System eingespielt und somit systematisch archiviert. Daten für die grafischen Darstellungen werden oftmals nur für die Erzeugung von Bildern verwendet und nicht dauerhaft gespeichert. Durch die modernen Rechencluster ist ein erneutes Durchführen der Simulation relativ einfach möglich, ein vollständiges Archivieren der Daten würde auch die vorhandenen Speicherressourcen zu sehr belasten. Alternativ können die in den nächsten Abschnitten dargestellten Auswerterroutinen auch direkt auf einem Rechencluster durchgeführt werden, dann werden nur noch die relevanten Resultate auf lokale Datenträger und in das Datenmanagementsystem gespeichert, die restlichen Daten können gelöscht werden.

5.5 Lastfallspezifische Auswertung

Durch automatisierte Auswertungen der Simulationen werden Zeit und Kosten gespart, außerdem kann die Qualität des Reports gesteigert werden. Zusätzlich wird die Vergleichbarkeit zwischen den unterschiedlichen Anprallpunkten - aber auch zu unterschiedlichen Entwicklungsständen - vereinfacht. Im Rahmen dieses Beispiels wird eine vollautomatische Auswertung der Simulationsresultate mit der HyperWorks® Suite dargestellt. Dabei werden sowohl die Auswertung mittels grafischen Visualisierungen, als auch die in Kurven bzw. Zahlenwerten darzustellenden Resultate betrachtet.

Als Steuerungsfile wird das Datenfile der Auftreffpunkte verwendet. Standardmäßig wird hier das Datenfile mit den Mittelpunktkoordinaten des Impaktors verwendet, alternativ kann jedoch auch das Datenfile mit den direkten Anprallpunkten angewandt werden.

Auswertung der Impaktorbelastung

Für die Auswertung beim Fußgängerschutz sind vor allem die Angaben zur Impaktorbelastung wie Beschleunigungen, HIC-Werte oder auch Eindringwege relevant. Diese müssen aus den Simulationsresultaten extrahiert werden, wozu in HyperWorks® beispielsweise die TEMPLEX-Funktionalität zur Verfügung gestellt wird. Dabei werden im Batchmodus basierend auf den vom Solver erzeugten Dateien mathematische Manipulationen durchgeführt, und die Resultate anschließend in separate Files geschrieben. Mithilfe des Auswertetools werden für jeden einzelnen Anprallpunkt Textfiles mit den berechneten Werten erzeugt.

Zusätzlich zu den Einzelresultaten werden im Arbeitsverzeichnis Dateien mit allen zu diesem Lastfall zugeordneten Resultaten gebildet. In diesen Dateien werden je Simulation des Lastfalls die Mittelpunktkoordinaten des Impaktors und der berechnete Wert dokumentiert, wodurch eine komprimierte Darstellung der Resultate des gesamten Lastfalls entsteht, wie es in Abbildung 5.13 gezeigt wird.

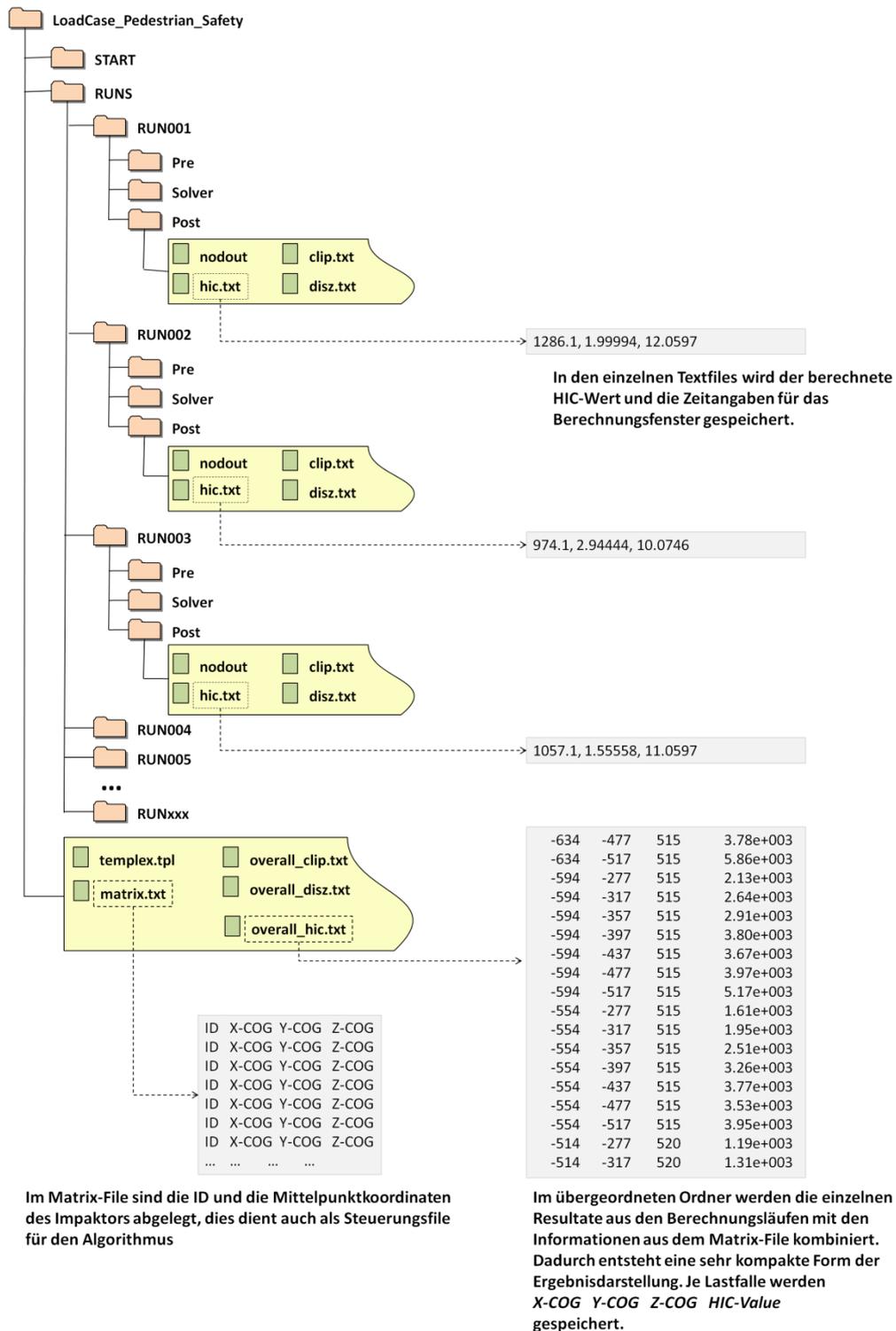


Abbildung 5.13: Ablauf zum Sammeln der einzelnen extrahierten Resultate

Erzeugen des Reports

Zu den einzelnen Simulationen werden Standardreports generiert, welche einerseits eine visuelle Auswertung der Simulation, andererseits eine grafische Darstellung der Resultate in Form von Diagrammen und Kurven beinhalten. Neben den Animationen sind vor allem Schnittbilder für aussagekräftige Darstellungen geeignet, durch diese kann man kritische Bereich deutlich besser identifizieren und Schlussfolgerungen für die Problemlösung leichter ableiten.

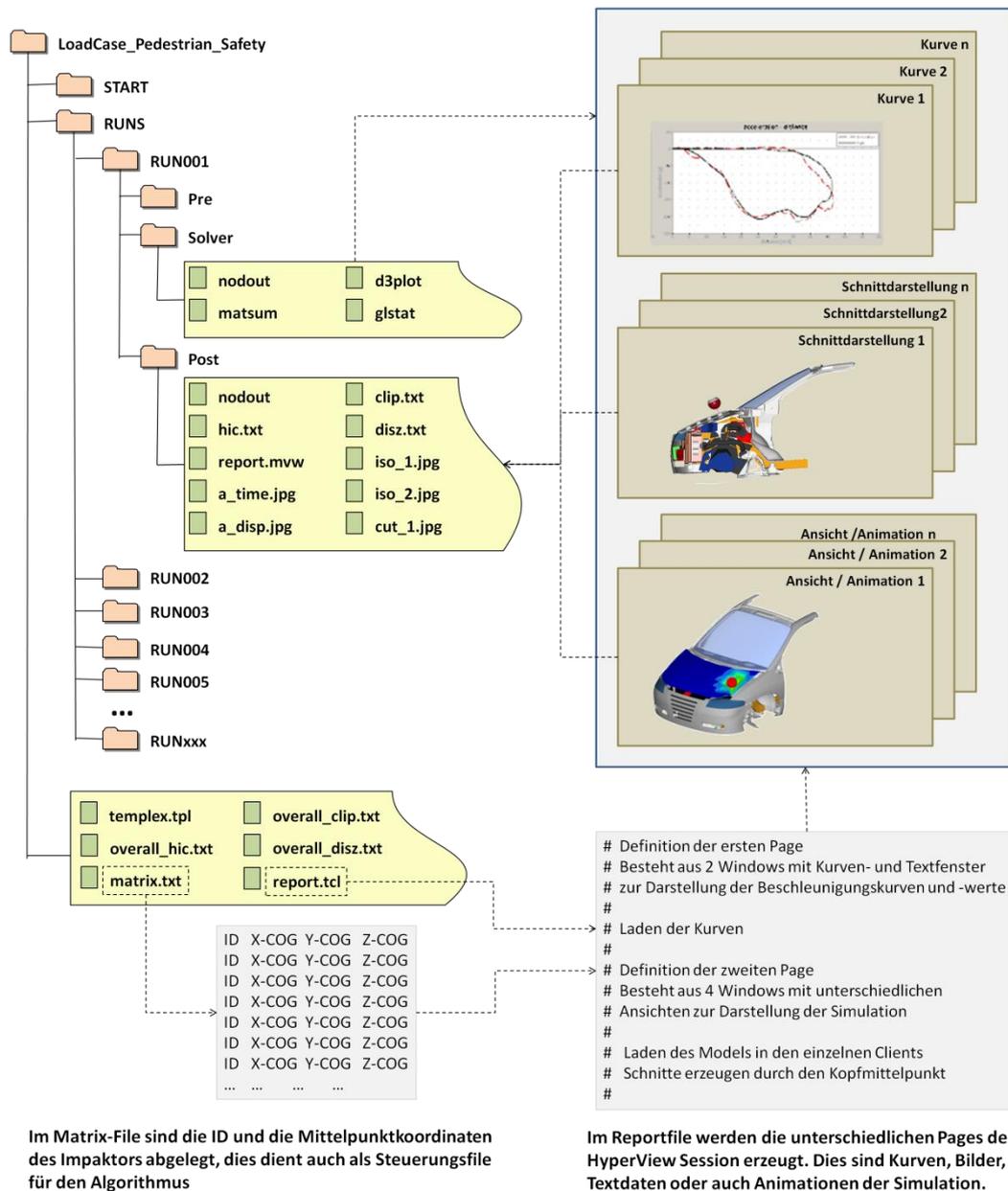


Abbildung 5.14: Ablauf bei der automatisierten Reportgenerierung

In diesem Anwendungsbeispiel wird die Reportgenerierung mithilfe von TCL-Skripten und der Funktionalität der HyperWorks® Suite dargestellt. Abbildung 5.14 zeigt einen Überblick über die Abläufe bei der automatisierten Reporterstellung. Als Basis für die automatische Reportgenerierung werden das Datenfile mit den Koordinaten der Impaktormittelpunkte und

ein vordefiniertes TCL-Skript, welches die Informationen für Aufbau des Reports enthält, verwendet. Auf Basis dieser Informationen werden im Batchmodus HyperView®-Reporte erzeugt und abgespeichert, sowie Daten in Powerpoint oder Bilddateien exportiert.

In den TCL-Skripten wird der gesamte Aufbau der HyperView®-Session - jede Page und jedes einzelne Fenster des Reports - definiert. Für die Visualisierungen werden zuvor festgelegte Ansichten verwendet, welche durch Vektorinformationen beschrieben werden. Zusätzlich können je Fenster systematisch einzelne Bauteile oder Baugruppen transparent oder unsichtbar dargestellt werden. Durch die Verknüpfungen mit den Koordinateninformationen zum jeweiligen simulierten Anprallpunkt können gezielt Schnitte durch das Gesamtmodell in der Nähe des Anprallpunktes initiiert werden, wodurch Analysen zu den Freiräumen, Kontaktbereichen oder auch gefährdeten Stellen deutlich einfacher und vor allem automatisiert visualisiert werden können. Die Darstellung der relevanten Kurvenverläufe schließt die Analyse der Simulationsaufgaben ab. Anschließend werden die Resultate in Form von Bildern exportiert, einmal als File in den Post-Processing-Ordner abgespeichert, einmal als Grafik in eine Powerpoint-Datei integriert. Die Powerpoint-Datei wird nach der Analyse automatisch im Post-Processing-Ordner gespeichert, wodurch ein vollständiger Report je Simulationslauf entsteht.

GUI zur Steuerung der Auswertung der Simulationen

Zur Auswertung der einzelnen Simulationen wird eine grafische Benutzeroberfläche eingesetzt. Wie in Abbildung 5.15 dargestellt sind hier einerseits allgemeine Informationen zum Arbeitsverzeichnis, zu den relevanten Angaben wie Einheiten oder Filestrukturen, sowie die notwendigen Informationen für die Analyse der Resultate definiert. Die einzelnen Prozessdefinitionen und auch –abläufe sind wiederum für die beiden Softwarecodes Ls-Dyna® und PAM-CRASH® umgesetzt.

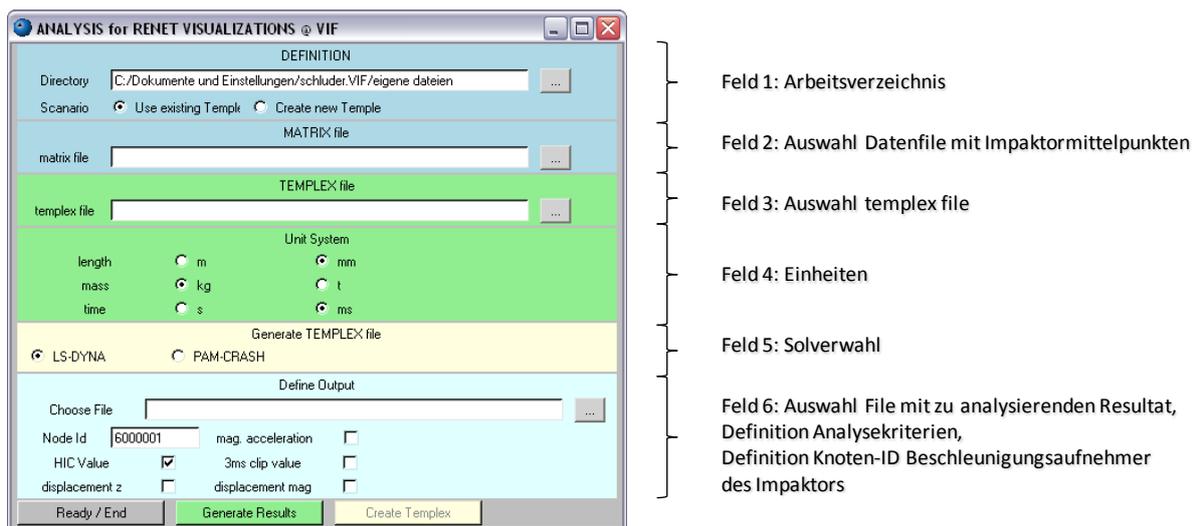


Abbildung 5.15: Grafische Benutzeroberfläche zur Auswertung der Simulationsresultate, dargestellt am Beispiel des stand-alone Prozesses

5.6 Bewertungs- und Visualisierungsmethodik für den Fußgängerschutz

Für eine gesamthafte Bewertung des Lastfalls müssen die Ergebnisse sämtlicher Einzelsimulationen berücksichtigt werden. Basis für die Visualisierung sind die gesammelten Resultate in Form einer Textdatei, das Netz der Auftrefffläche sowie Angaben zum Lastfall, wie es auch in Abbildung 5.16 dargestellt ist. Für die Visualisierung wird mithilfe unterschiedlicher Algorithmen ein eigenes Resultfile erzeugt, dies wird im Format des HyperWorks® Ergebnisformats gespeichert und kann somit in der HyperWorks® Suite problemlos eingelesen und weiterverarbeitet werden.

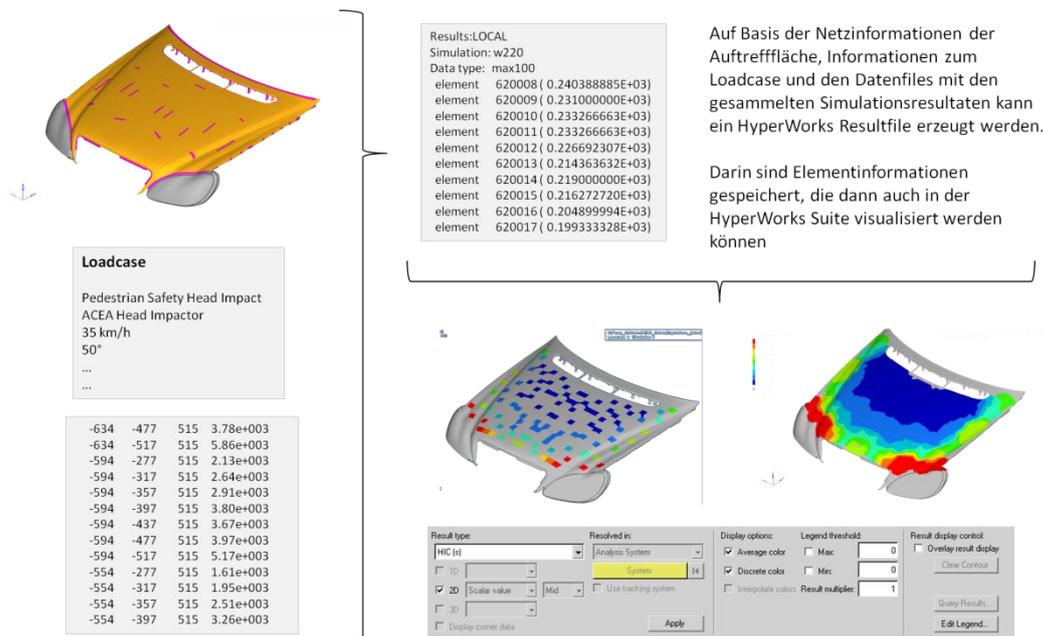


Abbildung 5.16: Prinzipdarstellung für den Prozess zur Visualisierung der globalen Resultate

Zuordnung und Exportieren der Resultate

Im ersten Schritt werden die Resultate aus den einzelnen Simulationen mit den Netzinformationen verknüpft, dazu werden unterschiedliche mathematische Algorithmen verwendet. Die Basis bildet das File mit dem Netz der Auftrefffläche, darin sind sämtliche Informationen zu den Knoten und Elementen des Netzes enthalten. Mithilfe der Algorithmen werden ausgehend von den einzelnen Koordinaten, welche in den Textdateien enthalten sind, jene Netzgeometrien detektiert, welche innerhalb eines bestimmten Suchkriteriums liegen. Die Koordinateninformationen beschreiben dabei jeweils den Mittelpunkt des Impaktors. Das angewandte Suchkriterium kann je nach Suchalgorithmus ein Kugelradius oder ein im Raum ausgedehnter Zylinder mit definiertem Radius sein – siehe Abbildung 5.17 und Abbildung 5.18. Der Vorteil der Suchfunktion auf Basis eines Zylinders ist, dass gezielt eine Richtung für den Suchalgorithmus definiert werden kann. Dadurch kann das Resultat auch einem relativ kleinen Elementbereich zugewiesen werden. Durch die Verwendung des Algorithmus mit der Kugelsuchfunktionalität kann eine solche systematische Zuordnung zu

einer ausgeprägten Richtung nicht erfolgen. In Abbildung 5.17 ist schematisch die Zuordnung der Elemente zu den Resultaten der Koordinatenpunkte dargestellt. In Teilabbildung a) ist die Ausdehnung eines Suchzylinders zu erkennen, dabei ist die Achse des Zylinders die Schussrichtung des Impaktors für diesen Lastfall. In den Teilabbildungen b) bis d) sind die Zylinder auf Basis von drei Koordinatenpunkten dargestellt, dabei ist in Teilabbildung d) der sich überlappende Bereich der Zylinder zu erkennen. Mithilfe des Algorithmus werden in diesen Schnittflächen die Mittelwerte aller durch den Suchalgorithmus gewonnenen Resultate berechnet und anschließend den Elementen zugewiesen.

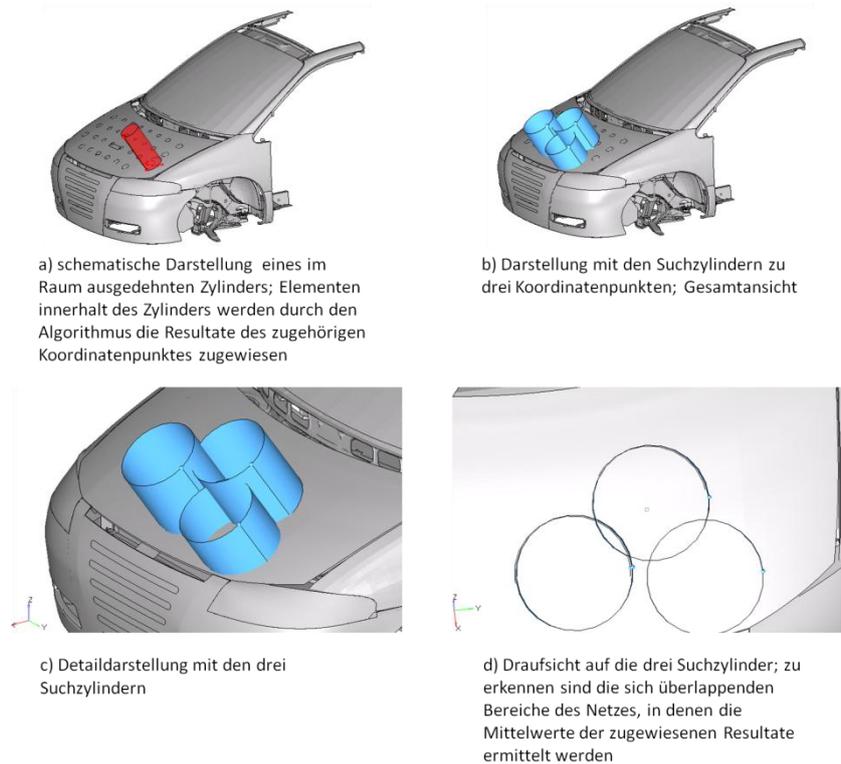


Abbildung 5.17: Funktionalität des Suchalgorithmus

Bei den Algorithmen können unterschiedliche Suchradien gewählt werden, durch eine Variation dieser kann der dadurch angewählte Elementbereich mit den zugewiesenen Resultaten gesteuert werden. Dies hat mehrere Vorteile, beispielsweise können die Resultate gezielt auf einen kleinen Bereich projiziert werden, was auch der Realität entspricht und hier als Engineering Picture bezeichnet wird. Durch die Wahl eines entsprechend großen Suchradius kann der Elementbereich deutlich vergrößert werden. Dadurch kann schließlich jedem Element der Anprallfläche ein Resultat zugewiesen werden, durch die sich überschneidenden Bereiche und dadurch gemittelten Werte leidet jedoch die Ergebnisqualität insofern, dass die einzelnen Werte verschmiert werden. Darstellungen mit solchen durchgängigen Resultaten können als Overview Picture bezeichnet werden, wie es auch in Abbildung 5.20 dargestellt ist.

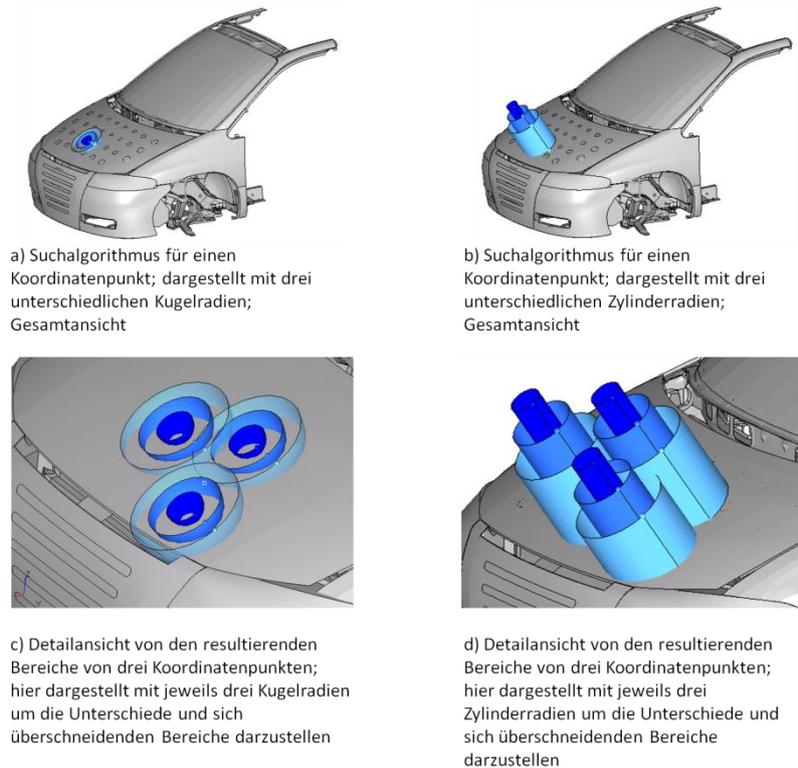


Abbildung 5.18: Unterschiede zwischen den Algorithmen, Kugel vs. Zylinder

In den einzelnen Textdateien, welche die Resultate des Lastfalles zusammenfassen, sind neben den Koordinaten die Resultate der jeweiligen Auftreffpunkte enthalten. Im nächsten Schritt werden diese mit den durch den Algorithmus ausgewählten Netzinformationen in Verbindung gebracht. Dazu werden den ausgewählten Elementen die jeweiligen Resultate zugewiesen und die Element-ID sowie das Resultat in ein Datenfile geschrieben, wie es als Beispiel in Abbildung 5.19 zu sehen ist. Zusätzlich wird eine Kurzbeschreibung des Ergebnisses an die exportierten Daten, welche später zur Visualisierung und Dokumentation dienen, angefügt.

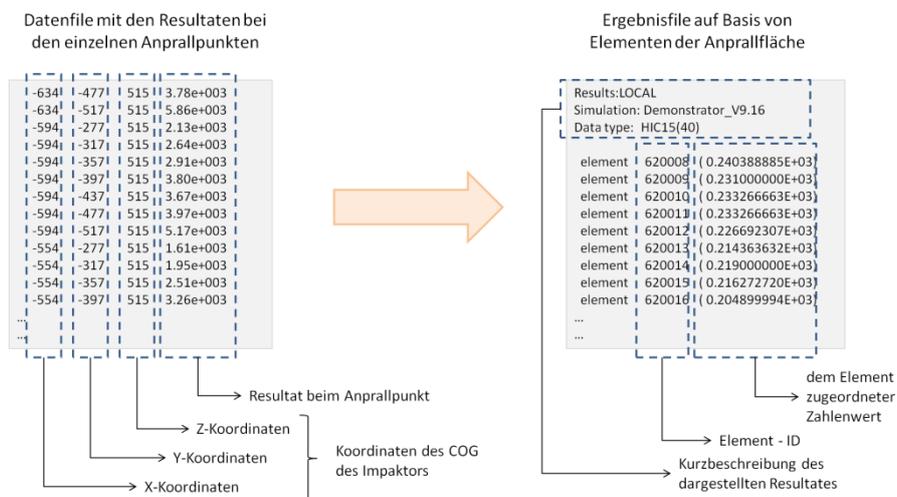


Abbildung 5.19: Umrechnung der Resultate von Anprallpunkt auf Elementbasis

Dieser Teilprozess wird für jedes Resultat wiederholt, weitere relevante Resultate werden an das bereits existierende File angehängt, wodurch nur eine Datei mit sämtlichen Element- und Ergebnisinformationen inklusive einer Kurzbeschreibung je Resultat entsteht.

Visualisierung der Ergebnisse

Das HyperWorks® Resultfile besitzt ein binäres Datenformat, die exportierten Ergebnisse liegen jedoch im ASCII Dateiformat vor. Zur Transformation stellt die HyperWorks® Suite einen Translator zur Verfügung, welcher die Konvertierung von ASCII ins binäre Dateiformat ermöglicht.

Nachdem die Daten als HyperWorks® Resultfile vorliegen, können sie sehr einfach in HyperView® dargestellt werden. Dazu werden das Netz der Anprallfläche sowie das Ergebnisfile geladen. Anschließend kann zur Visualisierung das jeweilige Resultat des Lastfalles ausgewählt werden. Eine prinzipielle Darstellung der Resultate ist in Abbildung 5.20 ersichtlich, hier ist auch der Unterschied zwischen dem Engineering Picture, welches die Ergebnisse je Anprallpunkt darstellt, und dem Overview Picture mit gemittelten Resultaten zu erkennen.

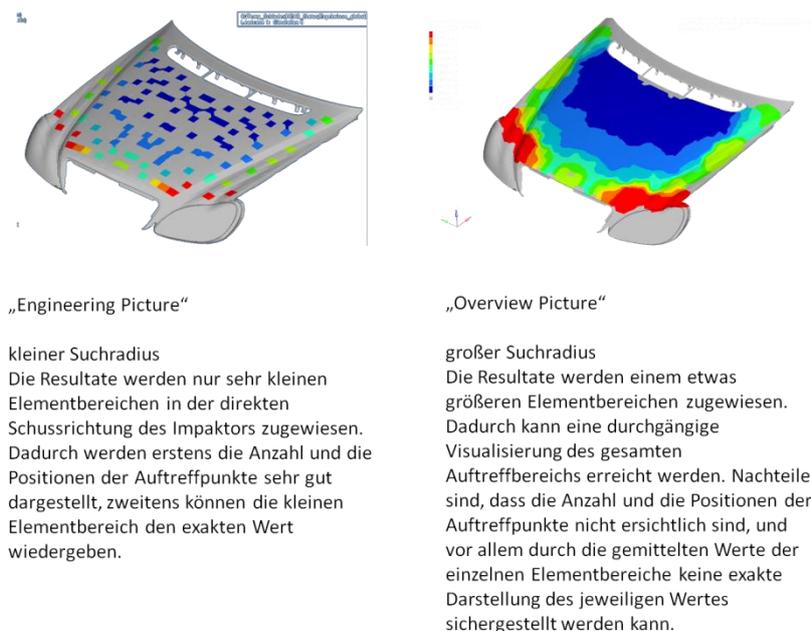


Abbildung 5.20: Unterschiede bei der Visualisierung durch verschiedene Suchradien

Varianten der Ergebnisdateien

Zusätzlich zu dem hier gezeigten Vorgehen, bei welchem sämtliche Resultate für einen Lastfall in ein Ergebnisfile geschrieben werden, können auch andere Varianten der Datenauswertung und Visualisierung durchgeführt werden. Beispielsweise kann durch diese Methode sehr einfach der Projektfortschritt dokumentiert werden. Dazu kann zum jeweiligen Datum der aktuelle Entwicklungsstand mit den Ergebnissen wie beispielsweise den HIC-Werten in das File exportiert werden. Dem Entwicklungsteam und auch dem Management steht somit ein einziges File mit den gesammelten Resultaten zur Verfügung, der

Entwicklungsstand kann somit sehr einfach überprüft und vor allem sehr anschaulich dargestellt werden.

Dieselbe Methode kann auch zur Visualisierung der Anforderungen des jeweiligen Lastfalls, der Testmatrix und der Versuchsergebnisse verwendet werden, dazu müssen die Informationen lediglich in dasselbe Format umgewandelt werden wie die gesammelten Resultate der Simulation. Dadurch kann ein sehr guter visueller Vergleich zwischen Anforderungen, Versuch und Simulation erreicht werden, wie es auch in Abbildung 5.21 dargestellt ist.

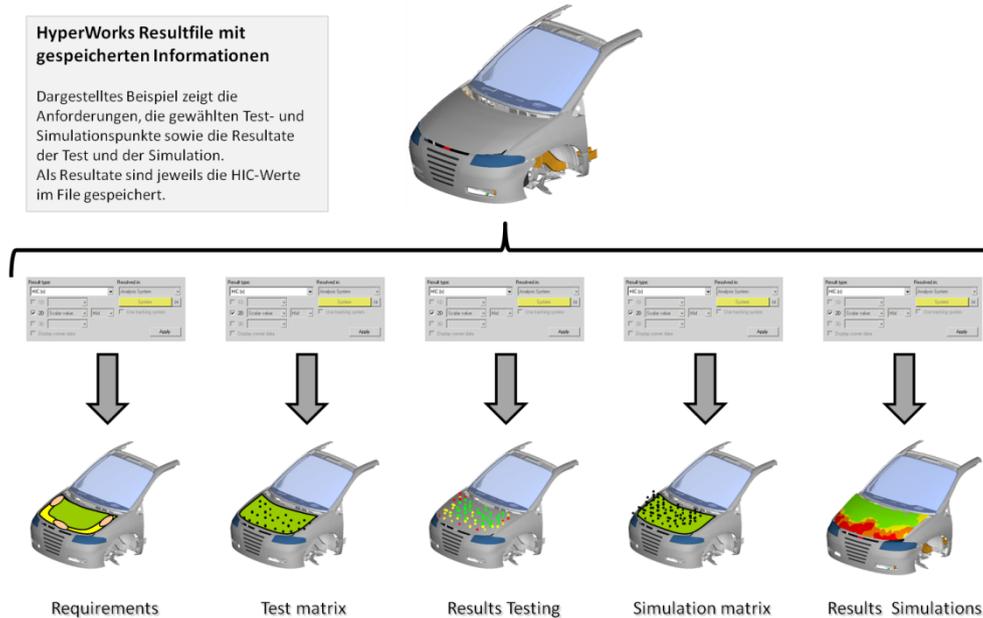


Abbildung 5.21: Visualisierung der Resultate mit HyperWorks®

GUI zur Generierung der Ergebnisfiles

In Abbildung 5.22 ist die grafische Benutzeroberfläche zum Extrahieren und Visualisieren der Ergebnisse dargestellt. In Feld 1 werden das Arbeitsverzeichnis festgelegt und der aktuelle Arbeitsschritt via Radiobutton ausgewählt. Das File der Anprallfläche zur Visualisierung wird in Feld 2 gewählt, das dazugehörige Ergebnisfile wird in Feld 3 definiert. Feld 4 enthält lediglich Informationen zu den Zwischenergebnissen, welche in Form der gesammelten ASCII-Dateien sowie als konvertierte Einzelresultate vorliegen.

In Feld 5 sind sämtliche Informationen zur Steuerung der Algorithmen enthalten. Diese umfassen einerseits die Basisinformationen in Form von Textdateien mit den gesammelten Ergebnissen aus den vorangegangenen Prozessschritten, andererseits Angaben zu den Suchalgorithmen und zur Dokumentation des Lastfalls.

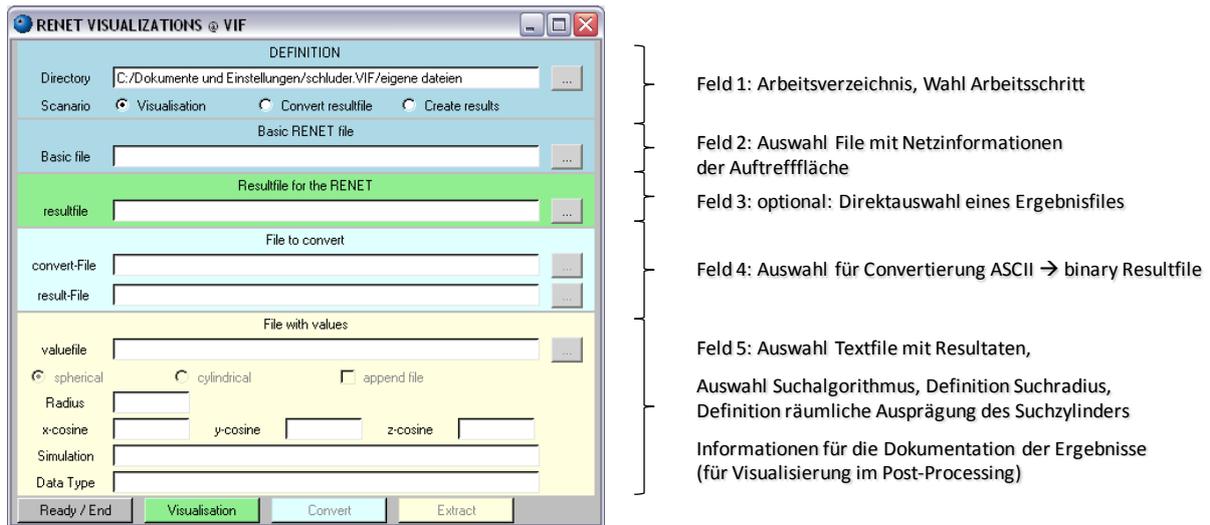


Abbildung 5.22: GUI zur Generierung der Ergebnisfiles, Beispiel für den stand-alone Prozess

5.7 Datenorganisation

Bei der Datenorganisation ist zwischen dem integrierten und dem stand-alone Prozess zu unterscheiden. Beim stand-alone Prozess wird eine rein ordnerbasierende Datenstruktur verwendet, hingegen muss beim integrierten Prozess mit dem Datenmanagement eine Kombination zwischen ordnerbasierender Struktur und einer Datenverwaltung mit Datenbanken eingesetzt werden. Die Kombination ist notwendig, da einige Datenmanipulations-schritte nur außerhalb des Systems durchgeführt werden können.

Datenorganisation beim externen Prozess

In Abbildung 5.23 ist die Datenstruktur für die Fußgängerschutzsimulation bei externer Prozessdurchführung zu erkennen. Direkt unter dem Ordner *Loadcase* werden im Ordner *start* die vom Datenmanagementsystem exportierten Fahrzeugmodelle sowie das numerische Modell des Impaktors kopiert, zusätzliche Informationen, wie beispielsweise die Netze der Anprallflächen oder das Datenfile mit den Anprallpunkten befindet sich im Ordner *Loadcase*. Zwischenresultate, die man für die Algorithmen zur Berechnung der Koordinaten der Impaktormittelpunkte benötigt, werden im Unterordner *Search* gespeichert. Die einzelnen Simulationsläufe werden im Ordner *runs* mit den dazugehörigen Unterordnern angelegt, wobei sich jeder Unterordner in *Pre*, *Solver* und *Post* gliedert. Dort werden die entsprechenden Files angelegt, die Simulationen durchgeführt und schließlich auch ausgewertet. Der Ordner *Solver* wird nicht auf Dauer gespeichert – alle notwendigen Informationen zur erneuten Simulation befinden sich im Ordner *Pre*. Die globalen Auswertungen werden wieder im übergeordneten Ordern *Loadcase* durchgeführt und auch gespeichert.

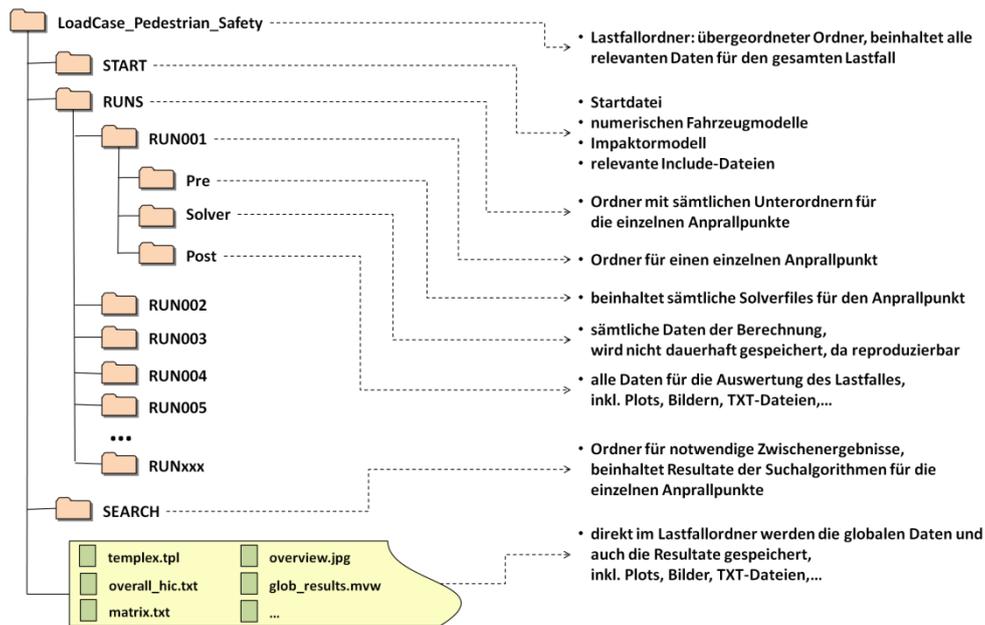


Abbildung 5.23: Datenorganisation für den externen Prozess

Datenorganisation beim integrierten Prozess

Die Daten- und Prozessorganisation für den Lastfall Fußgängerschutz ist als Fortführung des in Abschnitt 5.2.2 dargestellten integrierten Prozesses, wie er auch in Abbildung 5.4 abgebildet ist, zu sehen. Die Kommunikation der einzelnen Methoden und Prozessschritte mit dem übergeordneten Engineering Data Management sind von entscheidender Bedeutung, dies ist auch in Abbildung 5.24 anhand der weiteren Prozessschritte und auch Datenflüsse zu erkennen. Vor allem beim lastfallspezifischen Pre-Processing ist es notwendig, über den Engineering Data Backbone auf die notwendigen Daten zuzugreifen. Die Datenmanipulationen werden lokal durchgeführt, neu erzeugte Daten, wie beispielsweise generierte Datenfiles mit den Anprallpunkten, werden wiederum in das Managementsystem importiert und somit für Folgeaktivitäten und dem ganzen Entwicklungsteam zur Verfügung gestellt.

Das Solving findet außerhalb des Datenmanagementsystems statt, hier können in das Engineering System integrierte Methoden angewandt werden, jedoch sind diese Teilschritte auch manuell durchführbar. Für den Fußgängerschutz werden lediglich einige der Resultate in das Datenmanagementsystem importiert, für den Großteil der Daten werden extern Analysen durchgeführt und anschließend nur noch die Reporte ins System integriert.

Die Analysen werden mit definierten TCL-Skripts oder Templates durchgeführt, die Resultate der einzelnen Simulationen sowie die durch die Algorithmen erzeugten globalen Lastfallresultate werden ins System eingespielt. Das Post-Processing kann nun rechnerunabhängig in HyperView[®] durchgeführt werden, alternativ kann auch der HyperView-Player[®] oder eine vereinfachte Datensichtung mit einem Web-Client erfolgen.

Die Datenorganisation im Altair Data Manager[®] ist systematisch aufgebaut, ein Überblick ist in Abbildung 5.25 zu erkennen, hier wird deutlich, dass eine stark hierarchisch orientierte Verwaltung der Daten zum Einsatz kommt. Auf der Lastfallebene ist auch der

Fußgängerschutz angesiedelt, hier muss jedoch auch noch eine Unterscheidung der unterschiedlichen gesetzlichen Randbedingungen berücksichtigt werden, wodurch es zu einer Vielzahl an einzelnen Fußgängerschutz-Loadcases kommt. Ein einzelner dieser Loadcase wird im ADM als *Project* bezeichnet.

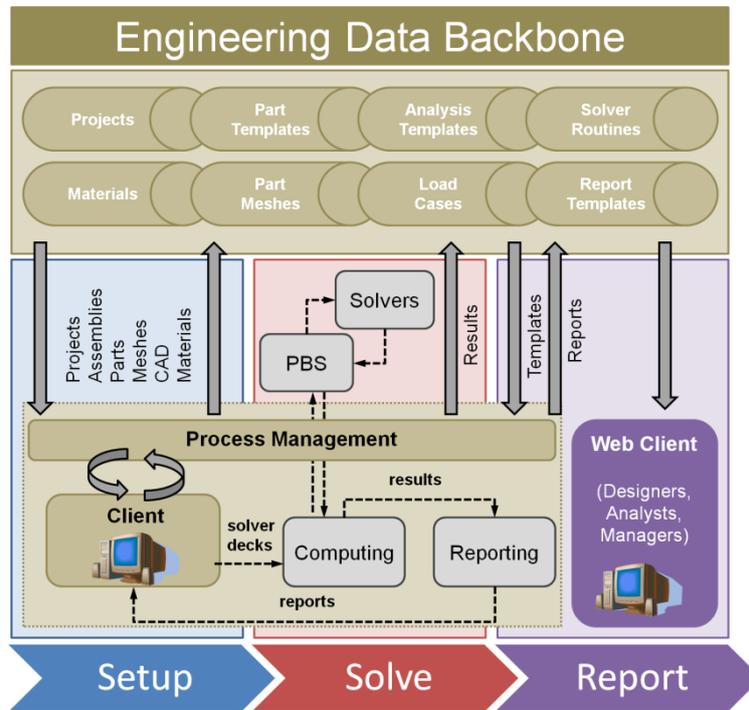


Abbildung 5.24: Darstellung des lastfallspezifischen Prozessablaufs

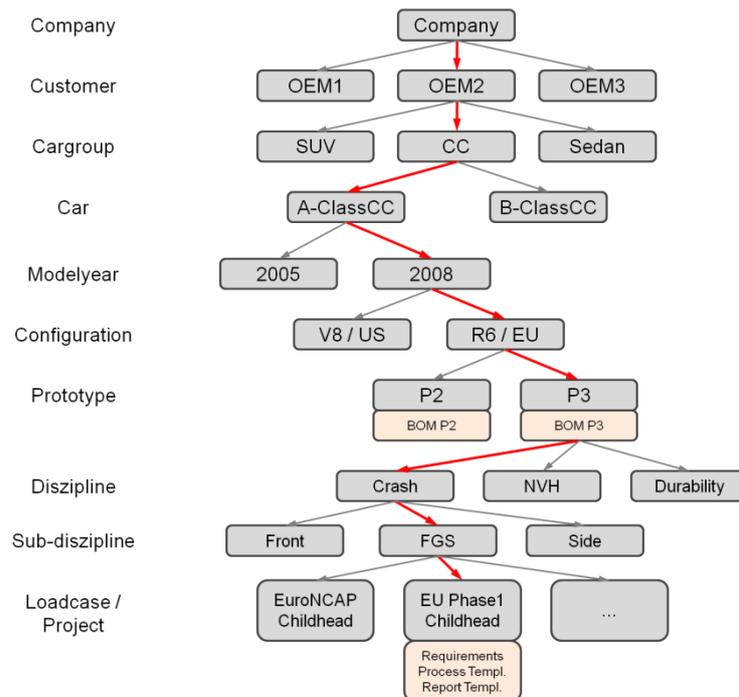


Abbildung 5.25: Darstellung der hierarchischen Struktur im ADM

Jeder Loadcase unterteilt sich in fix definierte Ordner. Speziell durch die hohe Anzahl an einzelnen Anprallpunkten beim Fußgängerschutz kommt eine zusätzliche hierarchische Ordnerschicht zum Einsatz, dies ist bei den anderen Lastfällen nicht notwendig. Der Aufbau der gesamten Ordnerstruktur für einen Fußgängerschutzlastfall ist in Abbildung 5.26 dargestellt.

Um eine einfache Methode zum Austausch der Daten zwischen dem internen und dem externen Prozessablauf zu ermöglichen, sind Verknüpfungen bzw. Mapping-Routinen definiert. Dadurch kann zu jedem Zeitpunkt im Entwicklungsprozess ein Datentransfer zwischen den internen Systemen und klar definierten Datenstruktur externer Entwicklungspartner durchgeführt werden,

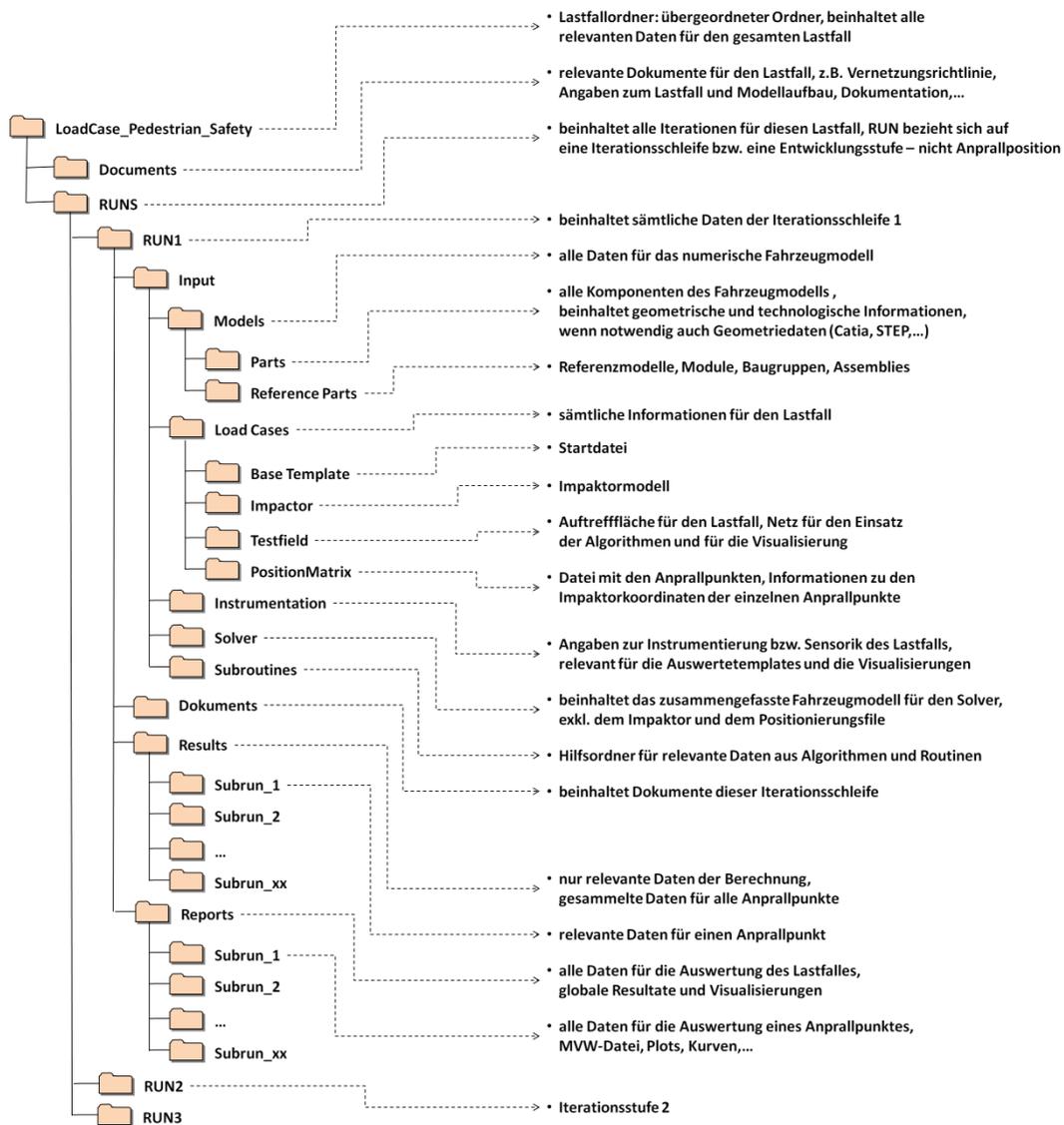


Abbildung 5.26: Datenstruktur für den Fußgängerschutz-Lastfall im ADM

5.8 Mögliche Erweiterungen des Prozesses

Die dargestellte Methode wird im Entwicklungsprozess zur Steuerung der Simulations- und Entwicklungstätigkeiten des Lastfalles Fußgängerschutz verwendet. Durch die Flexibilität der einzelnen Methoden können sehr einfach die jeweiligen Bedürfnisse im laufenden Projekt angepasst oder auch neue Anforderungen und gesetzliche Randbedingungen in die Abläufe integriert werden.

Hier ist der Kopfanprall als Use-Case dargestellt, eine Anpassung der Algorithmen auf die anderen Impaktoren ist in den jeweiligen Codes bereits berücksichtigt, lediglich Input- und Output-Parameter und interne Routinen müssen angepasst werden. Bei den Bein- und Hüftimpaktoren sind deutlich abgeänderte Prozessabläufe zu berücksichtigen, dies gilt auch für die grafischen Benutzeroberflächen.

Durch die einfache Steuerung des gesamten Ablaufes mit Hilfe des Datenfiles der Mittelpunktkoordinaten kann diese Methode sehr flexibel eingesetzt werden. Durch einfaches Ändern dieser Koordinaten können unterschiedliche Zielrichtungen der Simulationen verfolgt werden. Die Visualisierungsmethoden kann auch für die Darstellung von Versuchsergebnisse angewandt werden, dadurch kann ein direkter Vergleich zwischen Simulation und Versuch erreicht werden. Dazu müssen lediglich die für die Versuche verwendeten Anprallpunkte im Datenfile sowie die Resultate im Ergebnisfile eingesetzt werden.

Durch Verknüpfung der Methode mit einem übergeordneten Optimierungspaket, beispielsweise LS-Opt[®] oder HyperStudy[®], kann auch eine Variation der Anprallpositionen oder der Randbedingungen wie etwa Anprallwinkel oder -geschwindigkeit erzielt werden, wodurch sehr einfach Aussagen hinsichtlich der Robustheit der technischen Lösungen getroffen werden können. Außerdem wird durch diese Methode eine gezielte Optimierung der Fahrzeugfront ermöglicht.

6 Fazit und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Durch Maßnahmen am Fahrzeug und an der Infrastruktur, aber vor allem durch Änderungen in der Gesetzgebung, konnte die Sicherheit der einzelnen Verkehrsteilnehmer deutlich erhöht werden. Nichtsdestotrotz hat sich die Europäische Union im Jahr 2001 das Ziel gesetzt, die Anzahl der Verkehrstoten bis 2010 zu halbieren [COM01].

Seit Beginn der 80er Jahre beschäftigen sich unterschiedliche Arbeitsgruppen der Europäischen Union mit dem Thema Fußgängerschutz. Am 14. Jänner 2009 wird die Verordnung Nr. 78/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates veröffentlicht [EUR09], welche die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen im Hinblick auf den Schutz von Fußgängern und anderen ungeschützten Verkehrsteilnehmern regelt.

Die Vermeidung von Unfällen sowie die Reduktion der Unfallschwere muss das Ziel aller Aktivitäten zur Verbesserung des Fußgängerschutzes sein, indem man sowohl aktive als auch passive Sicherheitsmaßnahmen im Fahrzeug umgesetzt. Dabei kann jedoch die Fahrzeugsicherheit nicht mehr als singuläre Disziplin betrachtet werden, vielmehr ist sie ein integrierter Bestandteil im komplexen Produkt Fahrzeug einerseits, beziehungsweise eine technische Disziplin in einem übergreifenden Produktentwicklungsprozess andererseits.

Trotz zunehmender Produktkomplexität müssen Entwicklungszeit und -kosten reduziert werden, hier sind innovative Ansätze und Methoden erforderlich, um den Anforderungen gerecht zu werden. Ein wesentlicher Baustein ist dabei die vollständige Integration der virtuellen Methoden in einen durchgängigen Entwicklungsprozess. Durch die Kombination von numerischen mit physikalischen Methoden wird dabei das Beste aus zwei Welten für die Absicherung der Funktionen eingesetzt.

Speziell bei der virtuellen Entwicklung fallen Unmengen an Daten für die unterschiedlichen digitalen Prototypen und die hohe Anzahl an Lastfällen an. Um den Anforderungen hinsichtlich Qualität und Quantität der Daten sowie Informationen gerecht zu werden, sind hier disziplinübergreifende und integrative Entwicklungswerkzeuge und –abläufe erforderlich.

Die wichtigsten Elemente einer übergreifenden Entwicklungsumgebung sind die Schnittstellen zu Produktdaten der Konstruktion, die automatische Diskretisierung der einzelnen Bauteile sowie die Assemblierung dieser zu Modulen und Komponenten auf Basis von Stücklisteninformationen. Desweiteren ist die durchgängige Unterstützung des Ingenieurs im Rahmen der Entwicklungstätigkeiten, von der Lastfalldefinition, über die Simulation, bis hin zur Auswertung und dem Reporting, ein wesentliches Element um das Prozess- und Simulationsdatenmanagement systematisch einzubinden, und dem gesamten Entwicklungsteam jederzeit die richtigen Informationen und Daten in der geforderten Qualität und Quantität zur Verfügung zu stellen. In einem zentralen Datenmanagement als Engineering Data Backbone werden sämtliche Informationen für das Projekt verwaltet, dies bildet auch die Basis für alle Prozessabläufe im Rahmen der Entwicklung.

Gesteuert werden die einzelnen Entwicklungsabläufe mithilfe eines CAE Cockpits, welches als User Interface dient. Hier gilt es, den Entwicklungsingenieur mithilfe geeigneter Usability durch das Projekt zu führen, ihn durch wissensbasierte Systeme auch bei der Entscheidungsfindung zu unterstützen. Basierend auf der integrativen Entwicklungsplattform müssen Methoden, wie die multidisziplinäre Optimierung oder die gekoppelte Simulation speziell für mechatronische Aufgabenstellungen, ermöglicht werden, um zukünftig Produkte stärker interdisziplinär zu entwickeln und zu optimieren.

In der hier dargestellten Arbeit werden neue Werkzeuge, wie das Simulationsdatenmanagement oder die Prozessautomatisierung, auf Teile des Fahrzeugentwicklungsprozesses, speziell dem Kopfanprall im Rahmen der Fußgängerschutzentwicklung, angewandt, die eingesetzten Systeme und Prozesse sind in Abbildung 6.1 dargestellt. Durch den Einsatz dieser Tools lässt sich der Entwicklungszeitraum reduzieren, parallel dazu kann die Qualität der Berechnungsergebnisse gesteigert werden, da durch einen systematisierten und automatisierten Ablauf die Anzahl der Fehler minimiert werden.

Dieses Vorgehen kann auf weitere Themenbereiche der Fahrzeugsicherheit, aber auch anderen technische Disziplinen ausgedehnt werden, und somit die automatisierten Entwicklungsabläufe vorangetrieben werden.

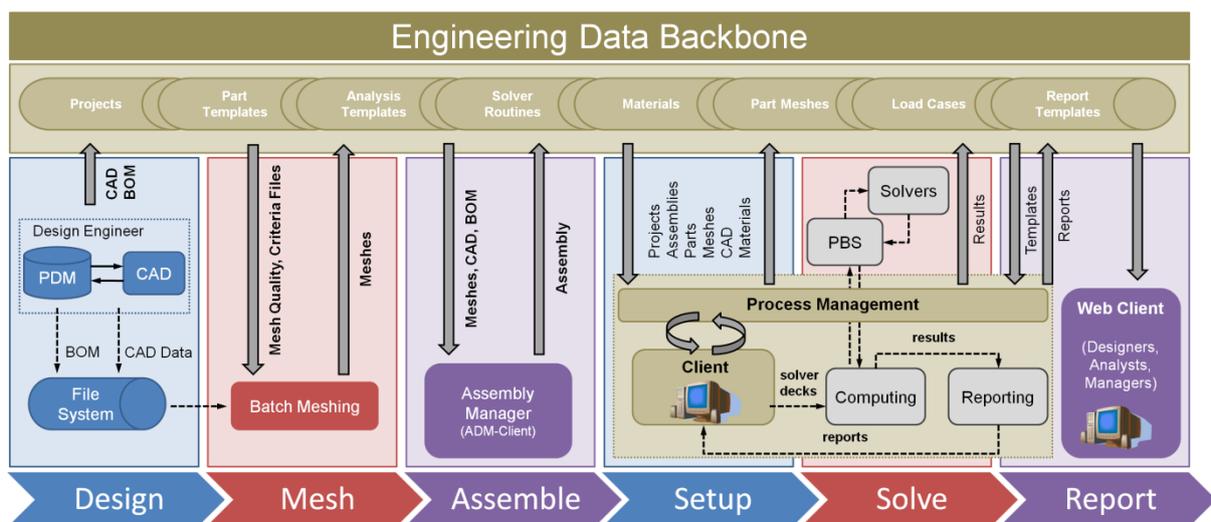


Abbildung 6.1: Entwicklungsablauf in der integrativen Entwicklungsumgebung

Vergleichbare Ansätze und Strategien am Beispiel der Automobilindustrie werden auch in [MLE08] dargestellt. Bei Audi wird dies in Form des sogenannten Loadcase-Composers sukzessive umgesetzt und in den Entwicklungsprozess integriert. Die wesentlichen Aspekte des Prozess- und Simulationsdatenmanagements sind das Verwalten der einzelnen Files, ein flexibler und automatisierter Aufbau von Lastfällen, die Unterstützung des kollaborativen Arbeitens, die Parametrisierung der einzelnen Files sowie die Verfolgung und der Vergleich von Varianten. Durch die systematische Strukturierung der Simulationsabläufe sowie die durchgängige Systemunterstützung wird die Qualität der numerischen Entwicklung gesteigert und vor allem die Entwicklungszeit reduziert [MLE10].

6.2 Beantwortung der Forschungsfragen

Welche Rolle spielt der Fußgängerschutz in der Fahrzeugentwicklung? Welchen Einfluss hat der Fußgängerschutz auf die einzelnen Bereiche des Fahrzeuges, und welche Disziplinen sind dabei betroffen?

Der Fußgängerschutz ist eine relativ neue technische Disziplin, und wird aufgrund gesetzlicher Forderungen bei der Fahrzeugentwicklung berücksichtigt. Dabei muss das Umsetzungskonzept hinsichtlich des Fußgängerschutzes vor allem in der Fahrzeugfront, jedoch auch zunehmend im Bereich der Sicherheits- und Assistenzsysteme integriert werden, wobei es zu einer Vielzahl an technischen Konflikten mit anderen Disziplinen kommen kann. Lösungsansätze und auch technische Zielkonflikte sind in Abschnitt 2.3 dargestellt, methodische Ansätze zur disziplinübergreifenden Entwicklung und Optimierung sind in den Abschnitten 4.4 und 4.4 erläutert.

Welche Methoden müssen in den unterschiedlichen Entwicklungsphasen eingesetzt werden? Mit welchen Schwierigkeiten und Problem ist bei der FGS Entwicklung zu rechnen? Durch welche Maßnahmen und Werkzeuge kann man die Prognosefähigkeit der Simulationen im Bereich des Fußgängerschutzes erhöhen?

Im Rahmen der virtuellen Entwicklung wird eine Vielzahl an unterschiedlichen digitalen Prototypen eingesetzt, zumeist ist das numerische Modell für den Fußgängerschutz eines davon. Dieses Modell zeichnet sich dadurch aus, dass lediglich die Fahrzeugfront bis zum Windschutzscheibenrahmen dargestellt ist, diese Bereiche jedoch mit einem höheren Detaillierungsgrad als bei anderen numerischen Crashmodellen. Wesentliche Faktoren für diese aufwändige Modellierung sind eine hohe Prognosefähigkeit, die auch bei geringen Energieeinträgen, wie sie durch den Impaktor beim Fußgängerschutz erfolgen, notwendig ist, sowie die geforderte Qualität an die Resultate, um zuverlässig belastbare Ergebnisse für die Entwicklung und Absicherung zu erhalten. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, müssen einerseits detaillierte geometrische Abbildungen der Fahrzeugfront in Form von FEM-Netzen aufgebaut werden, andererseits gilt es die kontinuumsmechanischen Eigenschaften der unterschiedlichen Materialien, hier vor allem moderne Kunststoffe oder energieabsorbierende Schäume, in den Modellen zu berücksichtigen, sowie qualitativ hochwertige Modelle der numerischen Impaktormodelle einzusetzen. Mithilfe dieser prognosesicheren Methoden können Entwicklungen vor allem in der Phase der Serienentwicklung mithilfe der numerischen Simulation durchgeführt werden. In der Konzeptphase stehen oftmals keine oder nur unzureichende Informationen für eine detaillierte Simulation zur Verfügung, hier werden zusätzlich zur FEM-Simulation geometrie-basierende Methoden, analytische Modelle oder auch wissensbasierte Ansätze angewandt.

Wie kann die Integration des Fußgängerschutzes in einen übergeordneten disziplin-übergreifenden Entwicklungsprozess dargestellt und umgesetzt werden? Welche innovativen Ansätze und Lösungen kann man beim Prozess- und Simulationsdatenmanagement verfolgen?

Getrieben durch die zunehmende Komplexität moderner Fahrzeuge, und vor allem durch die Forderung zur Einsparung von Kosten und Zeit im Rahmen der Entwicklung, sind neue Ansätze bei der Entwicklung notwendig. Ein Ansatz hierfür ist eine integrative Entwicklungsumgebung, wie sie hier im Rahmen der Arbeit in Abschnitt 4.1.2 dargestellt wird. Mithilfe einer übergreifenden Entwicklungsumgebung können Lösungen für ein gesamtheitliches Datenmanagement, die Prozessunterstützung und –automatisierung, oder auch intelligente und wissensbasierte Supportsysteme zur Verfügung gestellt werden. Speziell beim Fußgängerschutz sind aufgrund der Vielzahl an unterschiedlichen Lastfällen und gesetzlichen Randbedingungen teil- oder vollautomatisierte Entwicklungsabläufe eine wesentliche Unterstützung für das Entwicklungsteam. Bei aktiven und crashaktiven Sicherheitssystemen im Bereich des Fußgängerschutzes sind Lösungen zur Integration der Elektrik und Elektronik, sowie die Gesamtbetrachtung von Fahrzeug, Fahrer und Umwelt gefragt. In diesem Fachgebiet müssen Methoden zur Co-Simulation von mechatronischen Systemen für eine gesamtheitliche Betrachtung und Optimierung der Fahrzeugsicherheit zur Verfügung gestellt werden.

6.3 Ausblick

Zunehmend nehmen Fahrerassistenz- und Sicherheitssysteme Einzug in moderne Fahrzeuge, speziell zum Schutz von Fußgängern werden Systeme mit unterschiedlicher Umfeldsensorik entwickelt oder befinden sich bereits bei Fahrzeugen der Oberklasse im Serieneinsatz. Diese Systeme warnen den Fahrer vor Fußgängern im Sichtbereich bzw. im Gefahrenbereich, unterstützen den Fahrer beim Bremsen, oder werden kombiniert mit zusätzlichen berührungsempfindlichen Sensorsystemen auch für aktive Motorhauben eingesetzt. Derzeit befinden sich bereits Systeme zur Vermeidung von Unfällen durch automatisches Ausweichen in der Entwicklung, wie Mercedes am Beispiel des Ausweichassistenten demonstriert [WUE09]. Die Aktive und Passive Sicherheit werden zunehmend in der Integrierten Sicherheit kombiniert, somit kann ein optimaler Schutz von Insassen oder Passanten sichergestellt werden, oder der Unfall gänzlich vermieden werden. Für die Entwicklung bedeutet dies jedoch, dass das Fahrzeug und die sicherheitsrelevanten Funktionen inklusive den Interaktionen mit dem Fahrer, der Infrastruktur sowie den anderen Verkehrsteilnehmern entwickelt werden muss. Hierzu müssen neue Methoden im Bereich der Verkehrssimulation, der Gesamtfahrzeugsimulation oder auch der disziplin-übergreifenden Co-Simulation erarbeitet werden. Ansätze hierfür sind in dieser Arbeit dargestellt, für eine umfassende Entwicklungsplattform für die Integrierte Sicherheit sind jedoch weitere Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten notwendig. Schwierigkeiten treten vor allem dadurch auf, dass die Sicherheit und Robustheit eines sicherheitsrelevanten Systems von entscheidender Bedeutung sind, durch die Interaktionen mit der Infrastruktur

und den anderen Verkehrsteilnehmern gilt es jedoch eine unendlich hohe Anzahl an Lastfallkonstellationen zu berücksichtigen.

Um die Entwicklungstätigkeiten und die damit verbundenen Abläufe zu optimieren, ist die Weiterentwicklung der integrativen Entwicklungsumgebung notwendig. Hier gilt es vor allem wissensbasierte Systeme, virtuelles Anforderungs- und Änderungsmanagement, oder auch projektmanagementrelevante Informationen in das System zu integrieren. Eine durchgängige Bereitstellung von Daten und Informationen, sowie die Visualisierung der Resultate und des Produkt- oder Bauteilreifegrades zählen zu den Herausforderungen im Bereich des übergreifenden und vernetzenden Engineerings.

Durch die Kombination von prognosefähigen numerischen Entwicklungsmethoden mit experimentellen Methoden kann ein entscheidender Beitrag zur Entwicklung des Gesamtfahrzeuges geleistet werden. Die Rolle der numerischen Methoden nimmt dabei einen zunehmend höheren Stellenwert ein, dennoch müssen die Methoden in einigen technischen Disziplinen verbessert, oder, wenn noch nicht vorhanden, neu entwickelt werden.

Mithilfe von systematischen Optimierungsmethoden, die auch Themen wie Komplexitätsmanagement und -reduktion oder auch die Metamodellierung beinhalten, muss die ganzheitliche Fahrzeugauslegung und –optimierung vorangetrieben werden. Speziell für die frühen Entwicklungsphasen müssen hier neue Ansätze erarbeitet werden, die ein weitgehend konfliktfreies Design bereits in der Konzeptentwicklung ermöglichen. Dadurch können Fehler im Bereich der Serienentwicklung minimiert, und vor allem die Entwicklungszeiten sowie die Entwicklungskosten deutlich reduziert werden.

Literaturverzeichnis

- [AKI01] Akiyama A., Okamoto M., Rangarajan N.: Development and application of the new pedestrian dummy. Proceedings of the 17th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV). Amsterdam 2001.
- [ART00] Artis M., McDonald J., White R., Huang T. J., Shams T., Rangarajan N., Akiyama A., Okamoto M., Yoshizawa R., Ishikawa H.: Development of a new biofidelic leg for use with a pedestrian dummy. Proceedings of the 2000 International IRCOBI Conference on the Biomechanics of Impacts. Montpellier 2000.
- [ASS01] Association des Constructeurs Europeens d'Automobiles (ACEA): Communication from the Commission to the Council and the European Parliament - Pedestrian protection commitment by the European automobile industry, COM/2001/0389 final. Brüssel 2001.
- [BAC05] Bachem H. K.: Schutzpotential von realisierbaren Lösungen zum fahrzeugseitigen Fußgängerschutz. Dissertation RWTH Aachen. Aachen 2005.
- [BER03] Berg A., Egelhaaf M., Ebner H.: Estimation of benefits resulting from impactor-testing for pedestrian protection. Proceedings of the 18th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV). Nagoya 2003.
- [BRA05] Braess H.-H., Seiffert U.: Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. 4. Auflage, Vieweg & Sohn Verlag. Wiesbaden 2005.
- [COM01] Commission of the European Communities: White Paper. European transport policy for 2010: time to decide. Brüssel 2001.
- [COM06] Commission of the European Communities: Commission staff working document. European road safety action programme – mid-term review. Brüssel 2006.
- [COM07] Commission of the European Communities: Commission staff working document. Road safety: protection of pedestrians and other vulnerable road users, COD/2007/0201. Brüssel 2007.
- [CRA05] Crandall J., Wiley K., Longhitano D., Akiyama A.: Development of performance specifications for a pedestrian research dummy. Proceedings of the 19th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV). Washington D.C. 2005.
- [DAP07] D'Aprile F., Mingrino F., Re Fiorentin S.: Bravo: Made in FIAT with extensive and rigorous application of Virtual Simulation. Proceedings of the ATZ Conference Virtual Vehicle Creation. Stuttgart 2007.

- [DIC07] Dick M.: Development of virtual techniques in Audi product development. Proceedings of the ATZ Conference Virtual Vehicle Creation. Stuttgart 2007.
- [DUD05] Duddeck F.: Multidisziplinäre Optimierung im Produktentwicklungsprozess der Automobilindustrie. Weimarer Optimierungs- und Stochastiktag 2.0, Tagungsunterlagen. Weimar 2005.
- [DUD08] Duddeck F.: Multidisciplinary optimization of car bodies. In: Structural and Multidisciplinary Optimization. Volume 35, Number 4/2008. S. 375-389.
- [ECE06] Economic Commission for Europe: Proposal for a global technical regulation on uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to their construction in order to improve the protection and mitigate the severity of injuries to pedestrians and other vulnerable road users in the event of a collision, ECE/TRANS/WP.29/GRSP/2006/2. Genf 2006.
- [ECE09] Economic Commission for Europe: Draft regulation on pedestrian safety, ECE/TRANS/WP.29/GRSP/2009/10. Genf 2009
- [EIC09] Eichberger A., Wallner D., Hirschberg W., Cresnik R.: A situation based method to adapt the vehicle restraint system in frontal crashes to the accident scenario. Proceedings of the 21st International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV). Stuttgart 2009.
- [EIG09] Eigner M., Stelzer R.: Product Lifecycle Management. Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management. 2. Auflage, Springer-Verlag. Berlin Heidelberg 2009.
- [EIK07] Eick M., Alscher C.: Automated assembly of LS-Dyna[®] models. Proceedings of the 6th German LS-DYNA Forum. Frankenthal 2007.
- [EUR03] European Parliament and the Council of the European Union: Directive 2003/102/EC of the European Parliament and of the Council of 17 November 2003 relating to the protection of pedestrians and other vulnerable road users before and in the event of a collision with a motor vehicle and amending Council Directive 70/156/EEC. Brüssel 2003.
- [EUR04] European New Car Assessment Programme (EuroNCAP): Pedestrian Testing Protocol, Version 4.1. 2004.
- [EUR05] European Parliament and the Council of the European Union: Directive 2005/66/EC of the European Parliament and of the Council of 26 October 2005 relating to the use of frontal protection systems on motor vehicles and amending Council Directive 70/156/EEC. Brüssel 2005.

- [EUR07] European Road Safety Observatory. Traffic safety basic facts 2006. Pedestrians. 2007.
In.
http://ec.europa.eu/transport/roadsafety_library/care/doc/safetynet/2006/bfs2006_sn-kfv-1-3-pedestrians.pdf
[Stand: 01.03.2010]
- [EUR09] European Parliament and the Council of the European Union: Regulation (EC) No 78/2009 of the European Parliament and of the Council of 14 January 2009 on the type-approval of motor vehicles with regard to the protection of pedestrians and other vulnerable road users, amending Directive 2007/46/EC and repealing Directives 2003/102/EC and 2005/66/EC. Brüssel 2009.
- [EUR96] European Experimental Vehicles Committee Working Group 10 Report: EEVC test methods to evaluate pedestrian protection afforded by passenger cars. Proceedings of the 15th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV). Melbourne 1996.
- [EUR98] European Experimental Vehicles Committee Working Group 17 Report: Improved test methods to evaluate pedestrian protection afforded by passenger cars. final report. 1998.
- [FAC07] Fachbach B., Wifling M.: CAE-Entwicklung und Absicherung. 6. LS-DYNA Anwenderforum, Tagungsunterlagen. Frankenthal 2007.
- [FAC08a] Fachbach B.: Multidisziplinärer Demonstrator Virtuelles Fahrzeug. 1. Grazer Symposium Virtuelles Fahrzeug, Tagungsunterlagen. Graz 2008.
- [FAC08b] Fachbach B.: Concept for holistic vehicle design and optimisation for NVH requirements. Proceedings of the 5th International Styrian Noise, Vibration & Harshness Congress. Graz 2008.
- [FRE01] Fredriksson R., Håland Y., Yang J.: Evaluation of a new pedestrian head injury protection system with a sensor in the bumper and lifting of the bonnet's rear part. Proceedings of the 17th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV). Amsterdam 2001.
- [FRI03] Friesen F. A.: Motorhaubenaufstellung für den Fußgängerschutz. Dissertation RWTH Aachen. Aachen 2003.
- [FRI07] Frik S.: Virtual methods in vehicle safety. Past – Present – Future. Proceedings of the ATZ Conference Virtual Vehicle Creation. Stuttgart 2007.

- [GEH07] Gehring D.-U.: Die Prüfpraxis. Aktuelle Entwicklungen und Sonderfälle. Praxiskonferenz Fußgängerschutz, Tagungsunterlagen. Bergisch Gladbach, 2007.
- [GRE98] Green J.: A technical Evaluation of the EEVC proposal on pedestrian protection test methodology. Proceedings of the 16th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV). Windsor 1998.
- [HAE00] Hägele J., Hänle U., Kropp A., Streit M., Kerner C., Schlenkrich M.: The CAE-bench project. A web-based system for data. Documentation and information to improve simulation processes. Proceedings of the 2nd MSC Worldwide Automotive Conference. Dearborn 2000.
- [HAH06] Hahn W.: Fußgängerschutz. SafetyUpdate, Tagungsunterlagen. Aschaffenburg 2006.
- [HAH07] Hahn W.: Fußgängerschutz Entwicklungswerkzeuge. „Full Body“ oder „Body Part Impactor“. Praxiskonferenz Fußgängerschutz, Tagungsunterlagen. Bergisch Gladbach 2007.
- [HAN04] Hannawald L., Kauer F.: Equal effectiveness study on pedestrian protection,. Technische Universität Dresden. Dresden 2004.
In: <http://www.vufo.de/index.php?plugin=dokumente&action=details&id=26>
[Stand: 01.03.2010]
- [HOF06] Hoffmann M.: Integration of simulation into the development process. Requirements and realization scenarios. Proceedings of the Autosim 2nd Technology Workshop. München 2006.
- [HOL08] Holzner M.: Herausforderungen im Entwicklungsprozess der Automobilindustrie. 1. Grazer Symposium Virtuelles Fahrzeug, Tagungsunterlagen. Graz 2008.
- [HOL98] Holzner M., Gholami T., Mader H. U.: Virtuelles Crashlabor: Zielsetzung, Anforderungen und Entwicklungsstand. In: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau. VDI Berichte Nr. 1411. Düsseldorf 1998.
- [HOP06] Hoppe A.: Numerische Optimierung in der Funktionsauslegung Aufbau. 1. Konferenz für Angewandte Optimierung in der virtuellen Produktentwicklung, Tagungsunterlagen. Karlsruhe 2006.
- [IHR01] IHRA - International Harmonized Research Activities: Pedestrian safety working group 2001 Report, IHRA/PA/200. 2001.

- [KER05] Kerrigan J.R., Murphy D. B., Drinkwater D.C., Kam C.Y., Bose D., Crandall J. R.: Kinematic corridors for PMHS tested in full-scale pedestrian impact tests. Proceedings of the 19th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV). Washington D.C. 2005.
- [KOE08] Kögl M., Klimetzek F. R., Pletschen B., Möller J., Fülbiel K., Pfeiffer M.: Multidisziplinäre Optimierung des Karosserierohbaus. In: SIMVEC Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau 2008 14. Internationaler Kongress und Fachausstellung. VDI Berichte Nr. 2031. Düsseldorf 2008.
- [KOH06] Kohler J., Frank T., Feucht M. Kolling S.: Methodenentwicklung in der Crashsimulation zur Absicherung des Fahrzeugentwicklungsprozesses. 5. LS-DYNA Anwenderforum, Tagungsunterlagen. Ulm 2006.
- [KRA01] Krastel M.: STEP basiertes Simulationsdatenmanagement. Abschlussbericht zur Machbarkeitsstudie. Technische Universität Darmstadt 2001.
- [KRA08] Krastel M.: SimPDM – Integration of simulation and computation in a PDM environment. ProSTEP iViP Symposium 2008, Tagungsunterlagen. Berlin 2008.
- [KRA99] Kramer F.: Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen. Grundlagen – Komponenten – Systeme. Vieweg Verlagsgesellschaft. Braunschweig/Wiesbaden 1999.
- [KUE04] Kühn M.: Weiterentwicklung von Fußgänger-Komponententests. Fortschritt-Bericht VDI, Reihe 12, Nr. 573. Düsseldorf 2004.
- [KUE07] Kühn M., Fröming R., Schindler V.: Fußgängerschutz – Unfallgeschehen, Fahrzeuggestaltung, Testverfahren. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg 2007.
- [LAN08] Lang G., Schluder H., Puntigam W., Eichberger A.: Kopplung von CAE-Disziplinen und Tools über eine unabhängige Co-Simulationsumgebung. 1. Grazer Symposium Virtuelles Fahrzeug, Tagungsunterlagen. Graz 2008.
- [LAW05] Lawrence G. J. L.: The next steps for pedestrian protection test methods. Proceedings of the 19th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV). Washington D.C. 2005.
- [LES07] Leßmann P.: Bewertung der Prüfkörperergebnisse. Praxiskonferenz Fußgängerschutz, Tagungsunterlagen. Bergisch Gladbach 2007.
- [LIN06] Lind C., Schluder H., Kolleck R.: Forming to crash – how to take fabrication effects into account in crash simulations. In: Steel Grips - Journal of Steel and Related Materials, No. 1/2006.

- [LOR07] Lorenz B.: Grundlagen und aktueller Stand der internationalen Vorschriften. Praxiskonferenz Fußgängerschutz, Tagungsunterlagen. Bergisch Gladbach 2007.
- [MAE01] Maeno T., Hasegawa J.: Development of a finite element model of the Total Human Model for Safety (THUMS) and application to car-pedestrian impacts. Proceedings of the 17th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV). Amsterdam 2001.
- [MAT04] Matsui Y., Takabayashia M.: Factor causing scatter in dynamic certification test results for compliance with EEVC WG17 legform impactor standard. In: International Journal of Crashworthiness, Vol. 9 No. 1/2004.
- [MDV08] MDVFS – Arbeitskreis Messdatenverarbeitung Fahrzeugsicherheit, Arbeitsgruppe Algorithmen: Crash-Analyse. Beschreibung der Kriterien. Version 2.1.1. Bergisch-Gladbach 2008.
- [MEI09] Meissner H., Thiele M.: Integration of morphing and optimization with the CAx-load case composer at AUDI. Proceedings of the 7th European LS-DYNA Conference. Salzburg 2009.
- [MER04] Mercer: Mercer study on "automotive safety technology": vehicle safety is a growth market. München 2004.
- [MEY07] Meywerk M.: CAE-Methoden in der Fahrzeugtechnik. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg 2007.
- [MIZ03] Mizuno Y.: Summary of IHRA pedestrian safety WG activities (2003) – proposed test methods to evaluate pedestrian protection afforded by passenger cars. Proceedings of the 18th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV). Nagoya 2003.
- [MIZ05] Mizuno Y.: Summary of IHRA pedestrian safety WG activities (2005) – proposed test methods to evaluate pedestrian protection afforded by passenger cars. Proceedings of the 19th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV). Washington D.C 2005.
- [MLE08a] Mlekusch B.: Entwicklungsprozesse bei Audi. 4a Technologietag, Tagungsunterlagen. Traboch 2008.
- [MLE08b] Mlekusch B., Dornberg C., Streicher F.: CAE-Prozessintegration und Optimierung. 7. LS-DYNA Anwenderforum, Tagungsunterlagen. Bamberg 2008.
- [MLE10] Mlekusch B.: persönliches Gespräch am 25. Februar 2010

- [MOS00] Moser A., Hoschopf H., Steffan H., Kasanicky G.: Validation of the PC-Crash pedestrian model. Proceedings of the SAE 2000 World Congress. Detroit 2000.
- [OLI03] Oliver Wyman: Die neue Arbeitsteilung in der Automobilindustrie. München 2003.
In:
http://www.oliverwyman.com/de/pdf-files/PM_FAST_2015_digital.pdf
[Stand: 22.03.2010]
- [PUN07] Puntigam W.: Gekoppelte Simulation: Schlüssel für ein erfolgreiches Energiemanagement. ATZ Conference Virtual Vehicle Creation, Tagungsunterlagen. Stuttgart 2007.
- [REI07] Reicheneder J.: Simulationsdatenmanagement bei AUDI. 4. Informations- & Technologietag der CAEvolution GmbH mit Partnern, Tagungsunterlagen. Garching 2007.
- [ROE01] Röth T.: Konstruktive und versuchstechnische Entwicklungswerkzeuge zur Gestaltung „fußgängerfreundlicher“ Pkw-Vorderwagen. Dissertation Universität Essen. Essen 2001.
- [SCH03] Schweiger R.: CAD-integrated numerical simulation in the early design stage: benefits, requirements, examples. Proceedings of the NAFEMS Seminar “Integration of Numerical Simulation into the Development Process”. Wiesbaden 2003.
- [SCH04] Schmitt K.-U., Niederer P. E., Walz F.: Trauma biomechanics. Introduction to accidental injury. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg New York 2004.
- [SCH05] Schumacher A.: Optimierung mechanischer Strukturen. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg New York 2005.
- [SCH06a] Schelkle E.: Up-front CAE-Simulationen: Nur ein Schlagwort oder bereits Realität in der modernen Fahrzeugentwicklung?. 1. Informations- & Technologietag von Engineous und CAEvolution, Tagungsunterlagen. Garching 2006.
- [SCH06b] Schelkle E.: Computerunterstützte Simulationsmethoden (MCAE) im modernen Entwicklungsprozess. Vorlesungsunterlagen Universität Stuttgart. Stuttgart 2006.
- [SCH06c] Schneider D.: Management von Simulationsdaten und -prozessen: Motivation, Konzepte und aktuelle Projekte. 1. Informations- & Technologietag von Engineous und CAEvolution, Tagungsunterlagen. Garching 2006.
- [SCH06d] Schluder H.: Prozess- und Simulationsdatenmanagement am Beispiel des Fußgängerschutzes. 1. HyperWorks User Meeting für Hochschulen, Tagungsunterlagen. Böblingen 2006.

- [SCH06e] Schelkle E.: CAE Simulation – What are the challenges in the future?. Proceedings of the Autosim 1st Technology Workshop. Barcelona. 2006.
- [SCH07a] Schmitt K.-U.: Biomechanik und Computersimulation von Fußgängerkollisionen. Praxiskonferenz Fußgängerschutz, Tagungsunterlagen. Bergisch Gladbach 2007.
- [SCH07b] Schluder H., Seybold J.: Engineering Automation – process and simulation data management for pedestrian protection simulation. ATZ Conference Virtual Vehicle Creation, Tagungsunterlagen. Stuttgart 2007.
- [SCH07c] Schulte-Frankenfeld N., Brass M., Pieck A.: Methoden und Prozesse zur Kostensenkung – Ein Status der Wandlungen im Fahrzeugentwicklungsprozess durch CAE-Methoden. 6. LS-DYNA Anwenderforum, Tagungsunterlagen. Frankenthal 2007.
- [SCH07d] Schelkle E.: CAE Simulation. Grazer SafetyUpDate 2007, Tagungsunterlagen. Graz 2007.
- [SCH07e] Schelkle E.: Digitale Prototypen – Strategische Aspekte und Einsatz in den frühen Entwicklungsphasen. 4. Informations- & Technologietag von Engineous und CAEvolution, Tagungsunterlagen. Garching 2007.
- [SCH08] Schluder H., Cresnik R., Wallner D., Eichberger A.: Kopplung von aktiven und passiven Sicherheitssystemen über eine unabhängige Co-Simulationsumgebung. Integrated Safety 2008, Tagungsunterlagen. Hanau 2008.
- [SEI08] Seiffert U., Rainer G.: Virtuelle Produktentstehung für Fahrzeug und Antrieb im Kfz. Prozesse, Komponenten, Beispiele aus der Praxis. Vieweg+Teubner Verlag. Wiesbaden 2008.
- [STA07] Statistik Austria : Unfälle mit Personenschäden. Wien 2007.
In:
http://www.statistik.at/web_de/statistiken/verkehr/strasse/unfaelle_mit_personenschaden/index.html
[Stand: 02.07.2007]
- [STE01] Steffan H.: Unfallmechanik. Vorlesungsskript TU Graz. Graz 2001.
- [TAK05] Takahashi Y., Kikuchi Y., Okamoto M., Akiyama A., Ivarsson J., Bose D., Subit D. Shin J., Crandall J.: Biofidelity evaluation for the knee and leg of the POLAR pedestrian dummy. Proceedings of the 19th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV). Washington D.C. 2005.

- [TRL06] Hardy B. J., Lawrence G. J. L., Knight I. M., Carroll J. A.: A study on the feasibility of measures relating to the protection of pedestrians and other vulnerable road users. Wokingham 2006.
In:
http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/automotive/files/projects/report_pedestrian_trl_2006_en.pdf
[Stand: 03.03.2010]
- [WEI07] Weiss C.: Virtual Test Drive - Computer simulations for the development and evaluation of active safety systems. 6. CTI Forum Fußgängerschutz, Tagungsunterlagen Stuttgart 2007.
- [WUE09] Wüst C.: Segensreicher Schlenker. Hamburg 2009.
In:
<http://www.spiegel.de/spiegel/0,1518,639803,00.html>
[Stand: 22.03.2010]
- [ZAN07] Zander O.: Bewertung des Schutzpotentials moderner Fahrzeugfronten mit dem flexiblen Beinprüfkörper. Praxiskonferenz Fußgängerschutz, Tagungsunterlagen. Bergisch Gladbach 2007.

Veröffentlichungen

Im Verlauf dieser Dissertation entstanden folgende Veröffentlichungen:

Cresnik R., Rieser A., Schluder H.: Dynamic simulation of mechatronic systems. Proceedings of the 7th European LS-DYNA Conference. Salzburg 2009.

Winklhofer J., Trattnig G., Schluder H., Fellner B.: Effiziente Materialdatenermittlung für die Fahrzeug-Crashsimulation. In: SIMVEC Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau 2008 14. Internationaler Kongress und Fachausstellung. VDI Berichte Nr. 2031. Düsseldorf 2008.

Winklhofer J., Trattnig G., Schluder H., Fellner B.: Efficient determination of strain rate and fracture parameters for automotive crash simulation with LS-DYNA. Proceedings of the 7th. German LS-DYNA Forum. Bamberg 2008.

Schluder H., Cresnik R., Wallner D., Eichberger A.: Kopplung von aktiven und passiven Sicherheitssystemen über eine unabhängige Co-Simulationsumgebung. Integrated Safety 2008, Tagungsunterlagen. Hanau 2008.

Lang G., Schluder H., Eichberger A.: Kopplung von CAE-Disziplinen und Tools über eine unabhängige Co-Simulationsumgebung. 1. Grazer Symposium Virtuelles Fahrzeug, Tagungsunterlagen. Graz 2008.

Schluder H., Eichberger A.: Innovative simulation environment for multidisciplinary pedestrian protection and front end development. 6. CTI Forum Fußgängerschutz, Tagungsunterlagen Stuttgart 2007.

Schluder H.: Engineering automation - numerical methods for pedestrian protection simulation. 1. European HyperWorks Technology Conference, Tagungsunterlagen. Berlin 2007.

Schluder H.: PDM Systeme - neue Anforderungen aus der Sicht E/E und Mechanik. 4. Informations- & Technologietag von Engineous und CAEvolution, Tagungsunterlagen. Garching 2007

Schluder H., Seybold J.: Engineering automation – Prozess- und Simulationsdatenmanagement am Beispiel des Fußgängerschutzes. Proceedings of the ATZ Conference Virtual Vehicle Creation. Stuttgart 2007.

Schluder H.: Numerisch Methoden in der Fußgängerschutzentwicklung. Praxiskonferenz Fußgängerschutz, Tagungsunterlagen. Bergisch-Gladbach 2007.

Bernasch J., Schluder H., Schönberger G.: Durchgängige virtuelle Entwicklungsmethoden am Beispiel der Fahrzeug B-Säule. ASMET - The Austrian Society for Metallurgy and Materials of Steel and related Materials, Forum für Metallurgie und Werkstofftechnik 2007, Tagungsunterlagen. Leoben 2007.

Schluder H.: Prozess- und Simulationsdatenmanagement am Beispiel des Fußgängerschutzes. HyperWorks Users Meeting für Hochschulen. Böblingen 2006.

Lind C., Schluder H., Kolleck R. Forming to crash – how to take fabrication effects into account in crash simulations. In: Steel Grips - Journal of Steel and related Materials, No. 1/2006.

Schluder H.: Modellierungstechniken in der Crashsimulation. Grazer SafetyUpDate 2006, Tagungsunterlagen. Graz 2006.

Winklhofer J., Lind C., Schluder H.: Optimization methodology in structural mechanics - comparison of LS-OPT and Hyperstudy. 4. LS-Dyna User's Meeting, Tagungsunterlagen. Bamberg 2005.