

# **Simulationsintegration in allen Phasen des Produkt- entwicklungsprozesses bei dynamisch / hybriden Problemstellungen**

Vom Fachbereich Maschinenwesen der  
Universität Essen  
zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktor-Ingenieurs  
genehmigte Dissertation

Vorgelegt von  
Dipl.-Ing. Thorsten Schlacht,  
geboren am 30. August 1968 in Gelsenkirchen,  
jetzt wohnhaft in Bottrop

Referent: Univ.-Prof. Dr. Ing. H. J. Stracke  
Korreferent: Univ.-Prof. Dr. Ing. E. von Lavante

Tag der mündlichen Prüfung: 16. August 2001



## Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während einer Forschungsarbeit, die sich interdisziplinär mit der innovativen Entwicklung von Kinderrückhaltesystemen in Personenkraftwagen befasste. Herrn Dipl.-Ing. André Lippeck, Angestellter der DaimlerChrysler AG, danke ich für die ergiebige fachliche Zusammenarbeit und zahlreiche Anregungen und Diskussionen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. H. J. Stracke, Lehrstuhl für Ingenieurinformatik an der Universität Essen, danke ich für das meiner Arbeit entgegengebrachte Interesse und die Übernahme des Hauptreferates. Prof. Dr.-Ing. E. von Lavante, Lehrstuhl für Strömungsmaschinen an der Universität Essen, gilt mein Dank für die Übernahme des Korreferates.

Ferner sei an dieser Stelle Herrn Dr.-Ing. H.-P. Prüfer, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Maschinenbauinformatik an der Ruhr-Universität-Bochum, für die Unterstützung dieser Arbeit und ständige Diskussionsbereitschaft gedankt.

Thorsten Schlacht

Essen, im Mai 2001



# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Technik und der Forschung für den Bereich der Produktentwicklung</b> .....	<b>5</b>
	2.1 Stand der Forschungsaktivitäten .....	6
	2.2 Produktentwicklungsprozeß heute.....	7
	2.3 Produktentwicklungsprozeß gemäß VDI-Richtlinie 2221 .....	11
<b>3</b>	<b>Definitionen der Simulation und anderer Begriffe</b> .....	<b>17</b>
	3.1 Finite Element Methode (FEM).....	17
	3.2 Mehrkörpersysteme (MKS).....	18
	3.3 Biomechanisches System (BMS) .....	18
	3.4 Hybrides biomechanisches / mechanisches System (HBS) .....	19
	3.5 Zusammenfassung .....	19
<b>4</b>	<b>Forderungen an den Produktentwicklungsprozeß</b> .....	<b>23</b>
	4.1 Allgemeine Forderungen .....	23
	4.2 Berücksichtigung der Simulation .....	23
	4.3 Berücksichtigung der Biomechanik.....	25
	4.4 Fazit .....	26
<b>5</b>	<b>Konzeptvorschläge für eine optimierte Bearbeitung aller Phasen innerhalb des Konstruktionsprozesses</b> .....	<b>29</b>
	5.1 Problemstellungsphase .....	29
	5.2 Konzeptphase.....	31
	5.3 Entwurfsphase.....	33

---

5.4	Bearbeitungsphase.....	36
5.5	Wahl der geeigneten Simulationssoftware.....	37
5.5.1	Auswahl des MKS-Systems.....	40
5.5.2	Vorgehensweise bei der Modellierung von Mehrkörpersystemen.....	40
<b>6</b>	<b>Anwendung des Konzeptes an Beispielen aus der Sicherheitstechnik.....</b>	<b>45</b>
6.1	Erläuterung zur Auswahl der Beispiele.....	45
6.2	Konstruktion und Simulation des Gurtstraffsystem.....	47
6.2.1	Versuchsaufbau der Gurtratsche.....	47
6.2.2	Analyse des Konzeptes Gurtstraffer als Abstrahierung für die Simulation.....	49
6.2.3	2D-Simulation für den Gurtstraffer.....	52
6.2.4	Simulation eines Crashes ohne zusätzliche Gurtstraffung.....	55
6.2.5	Simulation mit gestrafftem PKW-Hauptgurt.....	58
6.2.6	Auswertung mittels Spurbilder.....	62
6.3	Konstruktion und Simulation des Pendelrückhaltesystem.....	63
6.3.1	Koordinatentransformation als notwendiges Hilfsmittel zur Datenauswertung ...	63
6.3.2	Untersuchungen der Haltegurkräfte des KRS.....	66
6.4	Herstellung von Prototypen.....	68
6.4.1	Fertigung des Pendelrückhaltesystem.....	68
6.4.2	Fertigung des Gurtstraffer.....	72
6.5	Durchführung eines Realversuchs.....	73
6.5.1	Allgemeines.....	73
6.5.2	Schlittenaufbau.....	73
6.5.3	Dummy und Rechnersystem.....	76
6.5.4	Versuchsdurchführung.....	77
6.5.5	Auswertung der Verifizierungsversuche.....	78
6.5.6	Videosequenz.....	79
6.6	Fazit.....	81
<b>7</b>	<b>Qualitäts- / Anwendungsanalyse bezüglich Simulation und Realversuch..</b>	<b>89</b>
<b>8</b>	<b>Schlusswort.....</b>	<b>93</b>

---

<b>9</b>	<b>Literaturliste .....</b>	<b>95</b>
----------	-----------------------------	-----------





# 1 Einleitung

In den letzten Jahren hat bei allen Konsumenten der Wunsch nach ständig verbesserter Produktqualität in erheblichem Maße zugenommen. Dieser Wunsch ist auch für die Produzenten nicht ohne Folgen geblieben. Um wettbewerbsfähig zu bleiben, sind die Unternehmen gezwungen die hohen Ansprüche der Konsumenten an die Produktqualität mit immer größerer Produktionsgeschwindigkeit bei gleichzeitiger Kostenreduzierung zu befriedigen [Har95+96]. Zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit hat in der Vergangenheit der Einsatz des Computers in allen Bereichen der Produktion wesentlich beigetragen [BaK95], [Kat95].

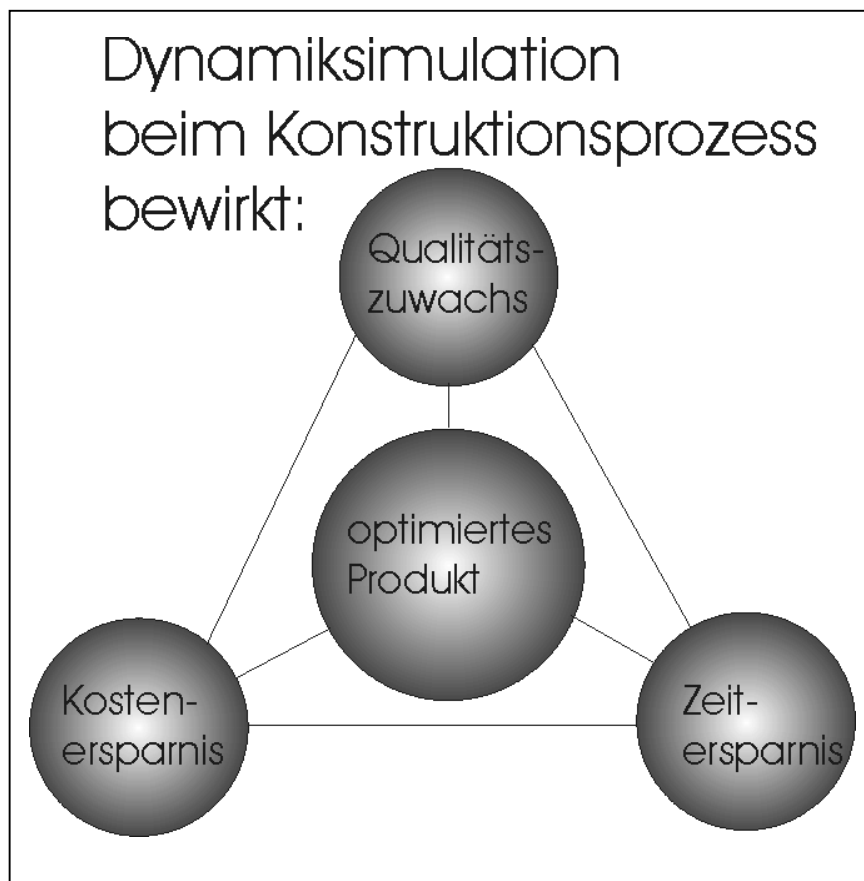
Beispielhaft sei hier der Bereich der Konstruktion genannt, wo 2D-CAD-Systeme die Zeichenbretter abgelöst und die Erstellung der Fertigungsunterlagen wesentlich verbessert und beschleunigt haben. Dies trifft insbesondere auf die Änderungsmöglichkeiten und die Durchführung von Variantenkonstruktionen zu. Des Weiteren werden 3D-CAD-Systeme als Volumenmodellierer zur Erzeugung von geometrischen Modellen genutzt, mit deren Hilfe unter anderem Einbausituationen überprüft werden können. Zur Unterstützung der Festigkeitsberechnungen finden z. B. Finite-Elemente Systeme ebenfalls schon häufig ihren Einsatz. Diese Systeme werden überwiegend eingesetzt um insbesondere die Haltbarkeit von Produkten zu überprüfen, verlieren aber an Bedeutung bezüglich der Verwendbarkeit, sobald nichtlineare dynamische Prozesse eine Rolle spielen. [MeD95], [MüS89]

Grundsätzlich bleibt festzuhalten, daß die Grundlage jeglicher konstruktiver Tätigkeit immer die an das Endprodukt gestellten Anforderungen der Konsumenten sind. Diese werden in verschiedener Form und mit unterschiedlichen Konkretisierungsgrad zunächst von einem Auftraggeber vorgegeben, die schon zu Beginn einer Konstruktion immer mit einzubeziehen sind. Allein diese Tatsache läßt die Rechnerunterstützung zur Forderung werden. [Kik95] Allerdings muß hier festgestellt werden, dass insbesondere innerhalb des methodisch geführten Konstruktionsprozesses, dessen grundsätzlicher Ablauf in den letzten Jahren durch die Vereinbarung verschiedener Normen und Richtlinien manifestiert wurde, der Einsatz der EDV noch eine zu kleine Rolle spielt, obwohl gerade in jüngerer Zeit in stark zunehmenden Maße, wissensbasierte Systeme Zugang in die Konstruktionsmethodik finden.

Seit einigen Jahren nimmt in der Kraftfahrzeugtechnik die Bedeutung der Sicherheitsmaßnahmen sowohl für die Fahrzeuginsassen als auch für die Menschen außerhalb der Fahrzeuge, den Fußgängern, immer mehr zu. Bedingt durch die Ergebnisse aus der Unfallforschung werden im Hinblick auf ausreichende Vorsichtsmaßnahmen die Forderungen an die Fahrzeuge immer konkreter. Bei der konstruktiven Lösung dieser Forderungen sind nicht nur die rein mechanischen Bauteile wie Karosserie, Fahrgestell, Stoßfänger oder Sicherheitsgurte der Fahrzeuge zu berücksichtigen, sondern im besonderen Maße auch biomechanische Problemstellungen wie z.B. die Belastbarkeit von Knochen und Gelenke der beteiligten Menschen.

Für die Lösung dieser biomechanischen und hybriden Problemstellungen können CAD- und FEM-Systeme sicherlich nur Hilfsmittel sein. Vielmehr eignet sich zur Lösung hier insbesondere die Anwendung von sogenannten Mehrkörpersystemen aus der Simulationstechnik, da diese auch die Bearbeitung dynamischer Prozesse berücksichtigen können. Leider finden diese Mehrkörpersysteme in der Konstruktionsmethodik noch nicht die ihnen gebührende Anerkennung und Anwendung [Schm95].

Im Folgenden soll hier der Versuch unternommen werden, die Möglichkeiten der Integration von Simulationen in den Produktentwicklungsprozeß zu untersuchen und insbesondere die Integration von Mehrkörpersystemen in den rechnergestützten Konstruktionsprozess von biomechanischen Problemstellungen zu überprüfen und darüber hinaus die für eine Integration der Simulation notwendigen Schnittstellen zu erarbeiten.



**Abb. 1.1** : Optimierung des Produktentwicklungsprozeß

Ziel soll es sein, den Konstrukteur effektiv und kostensparend bei der Durchführung seiner Tätigkeit durch begleitende Berechnungen zu unterstützen und somit die Forderungen an ein Produkt schon im Frühstadium einer Konstruktion zu überprüfen und des weiteren soll durch

die visuelle Darstellbarkeit mit Hilfe von Simulationen die optimale Lösung leichter gefunden werden. Durch die Integration der Dynamiksimulation insbesondere in den Konstruktionsprozeß wird ein Zuwachs an Qualität bei gleichzeitiger Ersparnis von Kosten und Zeit erreicht, was letztlich ein optimiertes Produkt als Ergebnis liefert (Abb. 1.1).

Durch diese Forderungen ergeben sich für die Arbeit automatisch zwei Schwerpunkte:

- Die Einbindung der Simulation in den Konstruktionsprozess durch Anpassung von Schnittstellen an die vorhandene Richtlinie der Konstruktionssystematik
- Die Adaption in Form einer Modellbildung an die vorhandene Software in Abhängigkeit von der Chronologie einzelner Konstruktionsphasen.

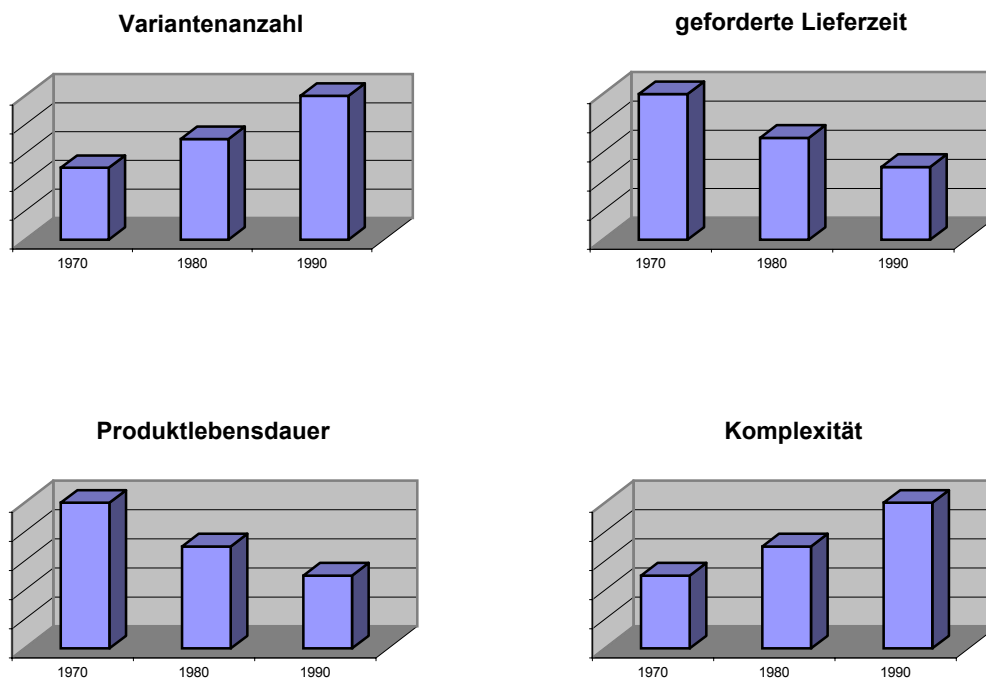
Ganz eindeutig sind die beiden hier genannten Schwerpunkte nicht zu trennen. Die Eingangsdaten vieler Berechnungen, welche für den Fortschritt einer Produktentwicklung notwendig sind, basieren in Abhängigkeit der Konstruktionsphase mehr oder minder auf Information einer Anforderungsliste. Im Sinne einer Integration ist es demnach erforderlich, auf Daten zurückzugreifen, welche nur durch Restriktionsbildung können. Die Integration einer Simulation ist nur dann sinnvoll, wenn nur die wichtigsten Informationen zur Erstellung eines Produktmodells eingegeben werden müssen. Diese können durch einen Analyseprozess zur Gewinnung von Eingangsinformationen extrahiert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit soll zunächst der Stand der Technik und der Forschungsaktivitäten für den Bereich der Produktentwicklung analysiert werden. Aus den Defiziten lassen sich die Forderungen an eine optimierte Produktentwicklung formulieren. Diese Forderungen bilden die Grundlage für ein zu entwickelndes Konzept welches die Vorgehensweise bezüglich der Integration der Simulation in den Entwicklungsprozeß definiert. Mit Hilfe von praxisorientierten Beispielen aus der passiven Verkehrssicherheit soll die Durchführbarkeit anschließend eindeutig diskutiert werden.



## 2 Stand der Technik und der Forschung für den Bereich der Produktentwicklung

Um ein Produkt zu entwickeln bzw. zu überprüfen wird gemäß VDI im Rahmen der Aufgabenklärung eine klare und vollständige Aufgabenstellung erarbeitet. Diese Vorgehensweise wird häufig als Produktentwicklungsmethodik beschrieben. Darunter versteht man die umfassende und zielgerichtete Vorgehensweise eines Konstrukteurs über alle Aktivitäten des Produktentwicklungsprozesses hinweg. Wie eingangs erwähnt, werden die Unternehmen zur Sicherung ihrer Wettbewerbsfähigkeit durch die sich ständig ändernden Kundenbedürfnisse zu immer schnellerem und flexibleren Handeln in Bezug auf ihre Produktentwicklung gezwungen.



**Abb. 2.1** : Veränderung der Produktentwicklung der letzten Jahre [VDI 98]

Die Abbildung 2.1 zeigt besonders deutlich den Wandel in der Produktentwicklung der letzten Jahre. So nahm bedingt durch Kundenwünsche die Variation und die Komplexität der Produkte in gleichem Maße zu, wie die Lebensdauer der Produkte und deren geforderte Lieferzeit abnahm. Diese Tatsache verdeutlicht die Forderung nach verstärkter Forschungsaktivität für den Bereich der Produktentwicklung. Deshalb sollen zunächst die aktuellen Forschungsaktivitäten analysiert werden, bevor auf den Ablauf der heute praktizierten Produktentwicklung und den daraus resultierenden Folgen näher eingegangen wird.

## 2.1 Stand der Forschungsaktivitäten

Nach KRAUSE muss der Produktenstehungsprozess im Mittelpunkt des unternehmerischen Interesses stehen. Nur in dieser Position ist der Prozeß restrukturierbar und nur so lassen sich die Entscheidungsprozesse effizienter und flexibler gestalten und auch zeitlich verkürzen. Um einen noch weiter reichenden Erfolg zur schnelleren Markteinführung zu erzielen, müssen zukünftig wesentliche Impulse vom Konstruktionsprozess ausgehen. Aus diesem Grunde wurden in den letzten Jahren Konzepte und Programme entwickelt, mit dem Ziel die Simulation effektiver zu gestalten. Zu einem langfristigen Erfolg führen diese Bemühungen jedoch kaum, da eine frühzeitige Unterstützung der Konstruktion durch diese Systeme nur durch Umstrukturierung oder Adaptierung bestehender Organisationsformen in den Unternehmen mit Hilfe adäquater Hilfsmittel erreicht werden kann. [VDI98] Ebenso wie zu der konservativen Produktentwicklung kann auch zur Vorgehensweise bei der virtuellen Produktentwicklung gesagt werden, dass das Fehlen einer entsprechenden Richtlinie bezüglich der Anwendung und Arbeitsweisen ein erhebliches Hindernis darstellt. Dies gilt wiederum insbesondere für die Bearbeitung von dynamisch / biomechanischen Problemen.

Nach LASCHET kommen erhöhte Anforderungen an alle Produkte aus dem Maschinen- und Fahrzeugbau. Damit wird in der Zukunft die rechnerische Unterstützung im Entwicklungsstadium eine große Bedeutung erfahren. Der Einsatz von Simulationsmethoden muss zwingend an Gewicht zunehmen. Demnach sollen Computersimulationen parallel zur Messung und Prüfstandsuntersuchungen angewendet werden, um weitere Optimierungen oder nachträgliche Verbesserungen vorzunehmen. Dies wird nach Meinung von LASCHET nur auf Akzeptanz stoßen, wenn die Lösungen grundlegender dynamischer Aufgabenstellungen parallel zum konservativem Weg unterstützend sind. [VDI98]

FELDHUSEN ist der Meinung, dass moderne Hilfsmittel und Werkzeuge für den Konstruktionsprozess heutzutage unabdingbare Voraussetzungen zum Bestehen im internationalen Wettbewerb sind. Einerseits soll dabei die Durchlaufzeit in der Konstruktion im Sinne von „time-to-market“ reduziert werden, andererseits wird eine deutliche Erhöhung der Entwicklungs- und Konstruktionsqualität angestrebt. Fehlleistungen haben zur Zeit den entsprechenden Änderungsaufwand in der Konstruktionsabteilung und die damit verbundenen Kosten als Konsequenz. Um diesen nicht gewünschten Aufwand zu minimieren, ist die Implementierung von leistungsfähigen Tools, wie z. B. 3D-CAD/CAM, unabdingbar. [VDI98]

LINNER und WUNSCH (München) stellen fest, den heutigen Produktansprüchen kann nur durch das Vorhandensein von abgesicherten Produktkonzepten in frühen Konzeptionsphasen begegnet werden. Nur so lassen sich Kosten- und zeittreibende Fehleinschätzungen früh entdecken. Die Simulationstechnik wird zwar bereits für sehr unterschiedliche Aufgaben eingesetzt, aber in der Produktentwicklung bzw. -planung sind diese noch sehr wenig verbreitet, was zum Teil mit der aufwendigen Erstellung von Simulationsmodellen begründet wird.

Um das gesamte Potential der Simulationstechnik nutzbar zu machen, wäre es sinnvoll, für alle Phasen der Entwicklung Schnittstellen und Konzepte zu generieren.

EVERSHEIM behauptet, dass viele Merkmale eines Produktes anhand eines virtuellen Produktmodells sich nicht beurteilen lassen. Zwar können mit Rechnerunterstützung auch komplexe Systeme berechnet oder simuliert werden, doch ist dabei zu berücksichtigen, dass die Virtualisierung meist viel zu hohen Aufwand und Rechnerleistung fordert. [VDI98]

Nach Meinung von SCHMIDT, Passau, ist die Simulationstechnik die Schlüsseltechnologie für den Produktentwicklungsprozess in den nächsten zehn Jahren. Für Deutschland und Europa besteht diesbezüglich noch ein großer Nachholbedarf. Es liegen in dieser Technologie Möglichkeiten, die zur Zeit noch nicht ausreichend gesehen werden. [Schm95]

WALZER stellt fest, dass mit Hilfe der Simulation sehr gut das Verformungsverhalten von Fahrzeugen bei Unfallsituationen unter der Voraussetzung großer Rechnerkapazität beurteilt werden kann. Sobald jedoch dynamische Probleme hinzukommen müssen zu viele Annahmen getroffen werden, um überhaupt und dann zweifelhafte Ergebnisse zu erzielen.

Zusammenfassend kann nach Meinung dieser und anderer Experten festgestellt werden, dass der konservative Produktentwicklungsprozess zwar nach wie vor funktioniert und sich auch bewährt hat, jedoch für die heutigen Produktansprüche in bezug auf Qualität, Kosten und Zeit (time-to-market) nicht genügend technologisiert ist. In bezug auf biomechanisch/dynamischer Problemfälle kann man sogar feststellen, dass die Entwicklung sogar ungenügend technologisiert ist.

Aus diesem europäischen Gesamtbild leitet der „Berliner Kreis“(1997) die Forderung ab, zukünftig die Produktentwicklung innovativer Produkte durch kooperative Prozesse zu unterstützen. Auf diesem Gebiet wird von dessen Mitgliedern intensiv geforscht um den europäischen Markt konkurrenzfähig zu halten. Bei diesen Forschungsaufgaben werden eine Vielzahl spezifischer Berechnungs-, Simulations-, und Optimierungsprogramme eingesetzt. Hierbei wird festgestellt, dass mit Zunahme der Programmkomplexität der Grad der organisatorischen Selbstständigkeit der einzelnen Entwicklungsbereiche steigt. Das liegt daran, dass einerseits zur Realisierung der Eigenschaftsfrüherkennung ein Arbeiten mit Programmsystemen gefordert wird, welche sich nicht nur auf die Produktgeometrie beziehen und andererseits setzen die derzeitig eingesetzten Systeme ein hohes Maß an fachspezifischem und methodischem Wissen voraus.

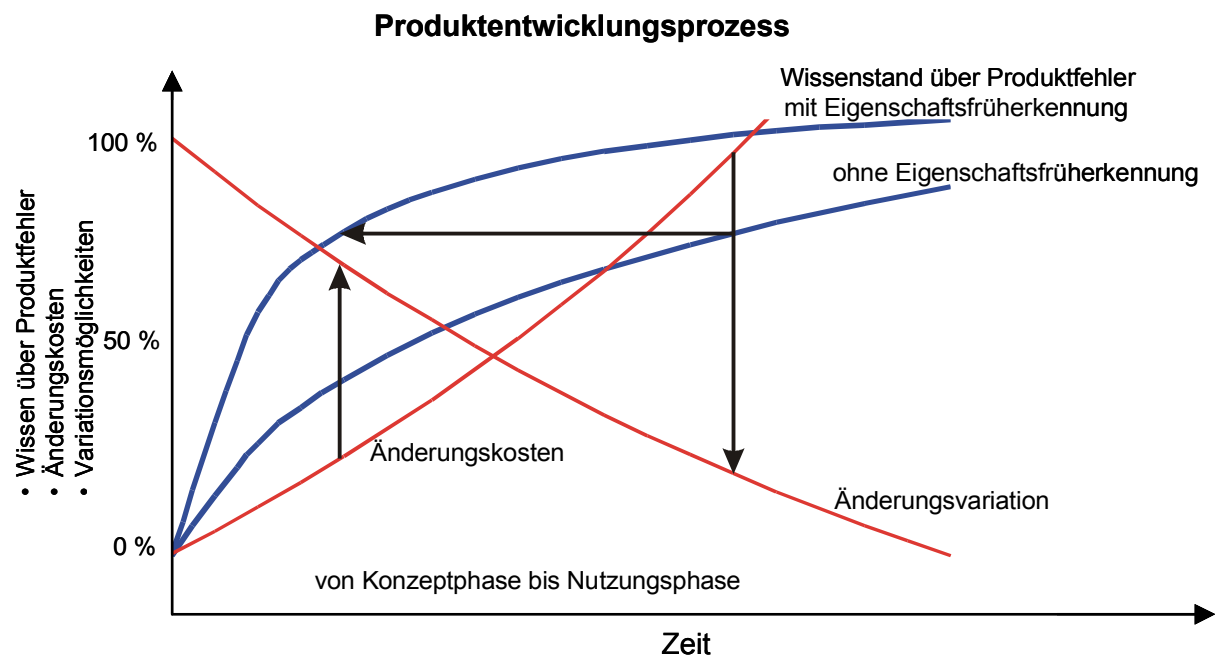
## 2.2 Produktentwicklungsprozess heute

Bei der Analyse des Entwicklungsprozesses komplexer, neuer Anlagen wird deutlich, daß insbesondere die Abstimmung und Integration der einzelnen Produkte der Anlagen zu einem Ganzen einen besonders hohen Aufwand darstellt. In der Regel geschieht dies zur Zeit anhand von Modellen, Attrappen, Umrissformen oder sogar Prototypen. Die daraus resultierenden

notwendigen Veränderungen müssen auf Grund der gewonnenen Erkenntnisse neu konstruiert und gegebenenfalls erneut in Form von Modellen dargestellt werden. Dass diese Vorgehensweise äußerst kostenintensiv ist, bedarf keiner besonderen Erläuterung.

In der Flugzeug- und Automobilindustrie werden seit geraumer Zeit alle Anstrengungen unternommen, diesen Integrationsprozess innerhalb der Produktentwicklung mit Hilfe von digitalen Modellen (z. B. Digital Mock-up) durchzuführen. Diese Arbeitsweise verlangt allerdings eine erhebliche Investition. Insbesondere bei mittelständischen Unternehmen sind diese hohen Investitionsentscheidungen im Produktentwicklungsbereich bislang kaum oder nur sehr zögerlich getroffen worden. Dies mag auch damit begründet werden, dass keine geeigneten Methoden zur Analyse und Bewertung dieser neuen informationstechnischen Konzepte für den Bereich des Produktentwicklungsprozesses zur Verfügung stehen.

Im Folgenden soll mit Hilfe des Diagramms gemäß Abb. 2.2 auf die Probleme die während des gesamten Prozesses der Produktentwicklung entstehen können, näher eingegangen.



**Abb. 2.2** : Einflußfaktoren auf den Produktentwicklungsprozeß

Die Abbildung stellt als Zusammenfassung drei überlagerte einzelne Diagramme dar. Die horizontale Achse beschreibt für alle Einzeldiagramme jeweils die chronologische Abfolge des Entwicklungsprozesses von der Konzeptphase bis zur Nutzungsphase. Die horizontale Achse definiert für die einzelnen Diagramme:

- das Wissen über die Produktfehler mit und ohne Eigenschaftsfrüherkennung,
- die Kosten bezüglich der Änderungen eines Produktes und



- den Schwierigkeitsgrad einer Produktvariation.

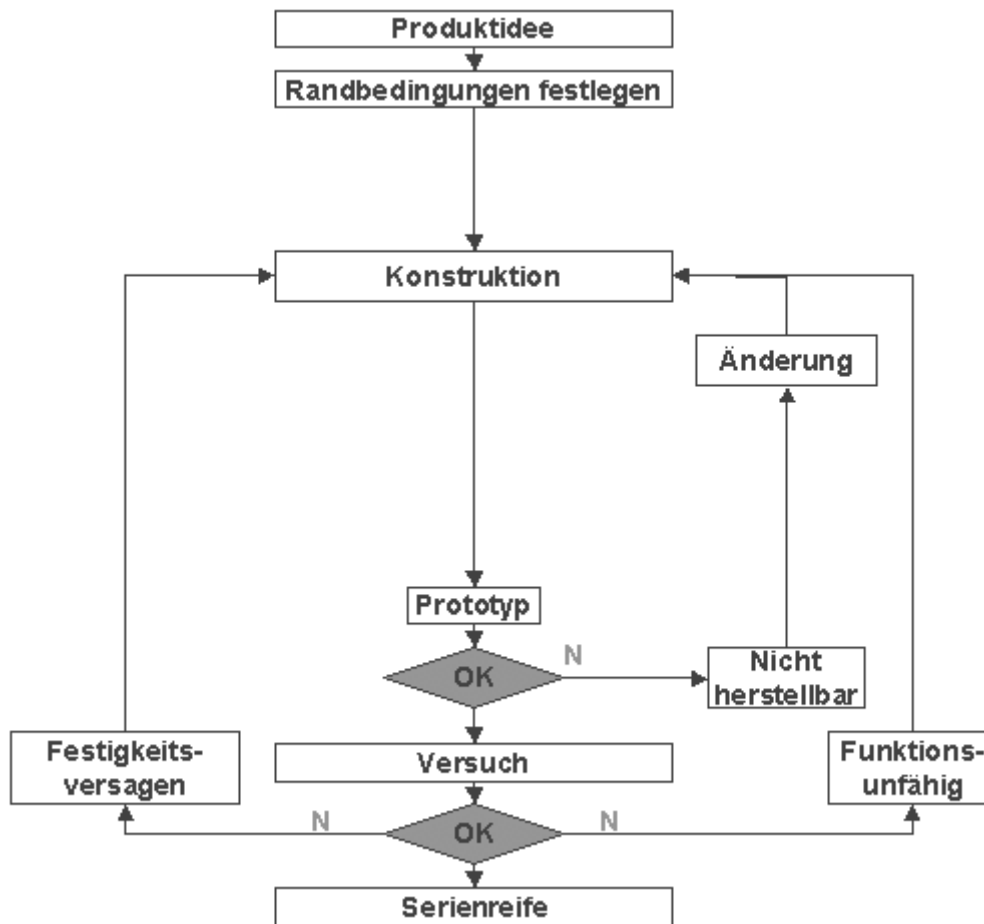
Das Diagramm zeigt recht deutlich, daß die stark steigende Kurve der Änderungskosten reziprok zu der stark fallenden Kurve der Variationsmöglichkeiten steht. Das heißt, mit zunehmender Entwicklungszeit (fortschreitendem Prozeß) nimmt zwar der Schwierigkeitsgrad der Variationsmöglichkeit stetig ab, aber die damit verbundenen Änderungskosten steigen drastisch an. Die beiden senkrechte Pfeile zeigen diesen Tatbestand eindrucksvoll. So sind bei einer hohen Produktvariationsmöglichkeit die Änderungskosten noch relativ niedrig, hingegen steigen diese explosionsartig bei niedriger Variationsmöglichkeit.

Die beiden Kurven über den Wissensstand mit und ohne Früherkennung der Produktfehler zeigen mit Hilfe des waagerechten Pfeils eindeutig die Kostenminimierung bei gleichzeitig ausreichender Produktvariation. Das heißt, dass insbesondere die frühe Aufdeckung von Fehlern im Produktentwicklungsprozeß für die gesamte Produktion von hoher Bedeutung ist.

Die höchsten Kosten innerhalb des Produktentwicklungsprozeß entstehen zwar nicht in der Konstruktion, aber sie werden dort verursacht. So können nicht zu fertigende Teile auf Grund falscher konstruktiver Gegebenheiten zu erheblichen Folgekosten führen.

Daher ist es stets lohnenswert bereits in den frühen Konstruktionsphasen, beginnend mit der Aufgabenformulierung den richtigen Weg einzuschlagen und die Konzeptgedanken rechtzeitig zu überprüfen. Verbesserungen von Konstruktionen in späteren Konstruktionsphasen und auch deren Überprüfung sind sehr kostspielig, da sämtliche vorlaufenden Phasen fast wertlos sind und damit ein Großteil der Investition nutzlos wäre. Die Abb. 2.3 zeigt die bisher übliche Vorgehensweise im konservativen Konstruktionsprozeß [BrF93].

Zunächst wird die grundsätzliche Idee eines Produktes geklärt. Unter dem Begriff Festlegen der Randbedingungen wird hier unter anderem verstanden, was muß das Produkt leisten, welche Festigkeitsbedingungen müssen garantiert werden und welche Fertigungsverfahren rechtfertigen den zu erzielenden Preis, etc.. Im Anschluß daran entwickelt der Konstrukteur unter Beachtung von Erfahrungswerten die erforderliche Konstruktion. Die Konstruktionsunterlagen bilden die Grundlage für die Entwicklung eines Prototypen. Sollte der Prototyp mit den hier vorliegenden Unterlagen technisch nicht herstellbar sein, ist eine erneute Iteration notwendig und der Konstrukteur muß gegebenenfalls die Konstruktion ändern, bzw. im extremen Fall, ein neues Grundkonzept erarbeiten. Ist die Herstellung eines Prototypen ordnungsgemäß abgeschlossen, folgt der reale Versuch auf einem dafür geeigneten Prüfstand. Die gemessenen Ergebnissen werden zeigen, ob das Produkt in Bezug auf Festigkeit und / oder Funktionserfüllung den Ausgangsforderungen entspricht. Wenn ja, ist die Serienreife gegeben, wenn nicht, ist auch hier eine erneute Iteration erforderlich. Gerade diese Iteration bedeutet für den gesamten Produktentwicklungsprozeß einen enormen Aufwand, da der Fehler erst zum Schluß des Prozesses bemerkt worden ist und somit der gesamte Prozeß einer Korrektur bedarf.



**Abb 2.3:** Konservativer Produktentwicklungsprozeß

Obwohl auch heute schon die Rechnerunterstützung (CAD, FEM) eingesetzt wird, ist wie die [Abb. 2.3](#) zeigt, eine Rückkopplung auf Grund von gefundenen Festigkeitsuntersuchungen erst zu einem sehr späten Zeitpunkt gegeben und deshalb nicht effektiv genug. Auf verschiedenen Abstraktionsniveaus müssen partiell Situationsanalysen und Handlungsanweisungen für bestimmte Konstruktionsprobleme durchgeführt werden. Heutzutage ist dies ohne eine Methodik, welche ein zielgerichtetes, planmäßiges Vorgehen zulässt, nahezu unmöglich. Diese Methodik stellt die Basis für die Entwicklung von Konzepten, also gedanklichen Lösungen dar. Nach Auswahl der besten Lösung wird im Rahmen von Entwurf und Ausarbeitung eines Konzepts die Vorgehensweise schrittweise genauer beschrieben.

Diverse Untersuchungen haben gezeigt, dass etwa 70% aller für den Hersteller und Kunden relevanten Produkteigenschaften in der Phase der Produktentwicklung festgesetzt werden. In den späteren Phasen werden die restlichen 30% der Produkteigenschaften ergänzt. Diese Phasen beinhalten unter anderem die Planung der Beschaffung, der Funktionalität, der Fertigung oder der Montage. Produkteigenschaften können je nach Wunsch die Form, die Funktion, die Zuverlässigkeit, Umweltverträglichkeit oder die Kosten sein. Neben der Kostenverantwortung für die entstehenden Produkte gewinnt die Minimierung an Entwicklungszeiten und die der Kosten zur Behebung von Fehlern im Verlauf der Produktentwicklung immer mehr an Bedeutung. Gleichzeitig ist der Wunsch nach Funktionsanspruch und hoher

Qualität der Produkte deutlich gestiegen, wodurch der Konstruktions- und Planungsprozess natürlich komplexer wird.

Wird dieser Schwierigkeitsgrad nicht beherrscht, entstehen schon in den Anfangsphasen der Konstruktion Mängel, die eventuell erst bei der Herstellung eines Prototyps erkannt werden. Sehr teure Zeit- und mechanische Iterationsschleifen (zum Beispiel erneuter Bau eines Prototypen) zur Behebung der Mängel sind zwangsläufig die Folge. Zu einem ähnlichen Schluß kommt auch der „Berliner Kreis“. So wird beispielsweise das funktionale Verhalten und dynamische Zusammenwirken einzelner Bauteile bei Konstruktionen zur Realisierung von Diagnoseaufgaben erst in den späten Produktentstehungsphasen durchgeführt und dann meistens nur durch einen Realversuch. Dadurch entstehen häufig zu lange Iterationszyklen.

Mit dem hier dargestellten Hintergrund wird die Dringlichkeit geeigneter Verfahren zur Früherkennung von Produktfehlern besonders deutlich. Das heißt die Einbeziehung von Simulationsverfahren ist unabwendbar. Stellt sich hier nur die Frage, was kann simuliert werden? Grundsätzlich ist im Rahmen des gesamten Prozesses eine Simulation in Bezug auf

- die Herstellbarkeit (Fertigungsverfahren),
- die Festigkeitsbedingungen und
- die Funktionsfähigkeit

möglich. Bevor nun auf die Möglichkeiten der Simulation näher eingegangen wird, ist zunächst zu prüfen wie der sogenannte konservative Produktentwicklungsprozeß gemäß VDI-Richtlinie 2221 inhaltlich abläuft und inwieweit diese Inhalte auch auf die Bearbeitung von biomechanischen Problemen übertragbar sind.

### **2.3 Produktentwicklungsprozeß gemäß VDI-Richtlinie 2221 [VDI98]**

In der modernen Konstruktionslehre hat sich die methodische Vorgehensweise als zweckmäßig erwiesen und durchgesetzt. In der VDI-Richtlinie 2221 wird diese Methodik als Ablaufplan genauestens beschrieben. Die Konstruktion selbst beginnt mit der Aufgabenformulierung und wird mit der Bereitstellung der Fertigungsunterlagen beendet. Diese Unterlagen bestehen aus: Konstruktionsunterlagen, Montageplänen und Betriebsanleitungen. [Kol85]

Die VDI-Richtlinie unterteilt ihren Ablaufplan gemäß Abb. 2.4 in sieben Arbeitsschritte. Jeder dieser sieben Abschnitte führt zu einem Arbeitsziel, welches der endgültigen Realisierung des Produktes näher kommt und sich durch Berücksichtigung neuer Eigenschaften vom Vorherigen in der Wertigkeit unterscheidet.

Diese Untergliederung hat den Vorteil, dass sich innerhalb jedes Arbeitsabschnittes verschiedene Varianten bilden können, welche einzeln in ihrer Effizienz überprüft werden können. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass durch die Phasentrennung verschiedene Autoren und Konstrukteure Schnittstellen zur späteren Realisierung zur Verfügung haben.

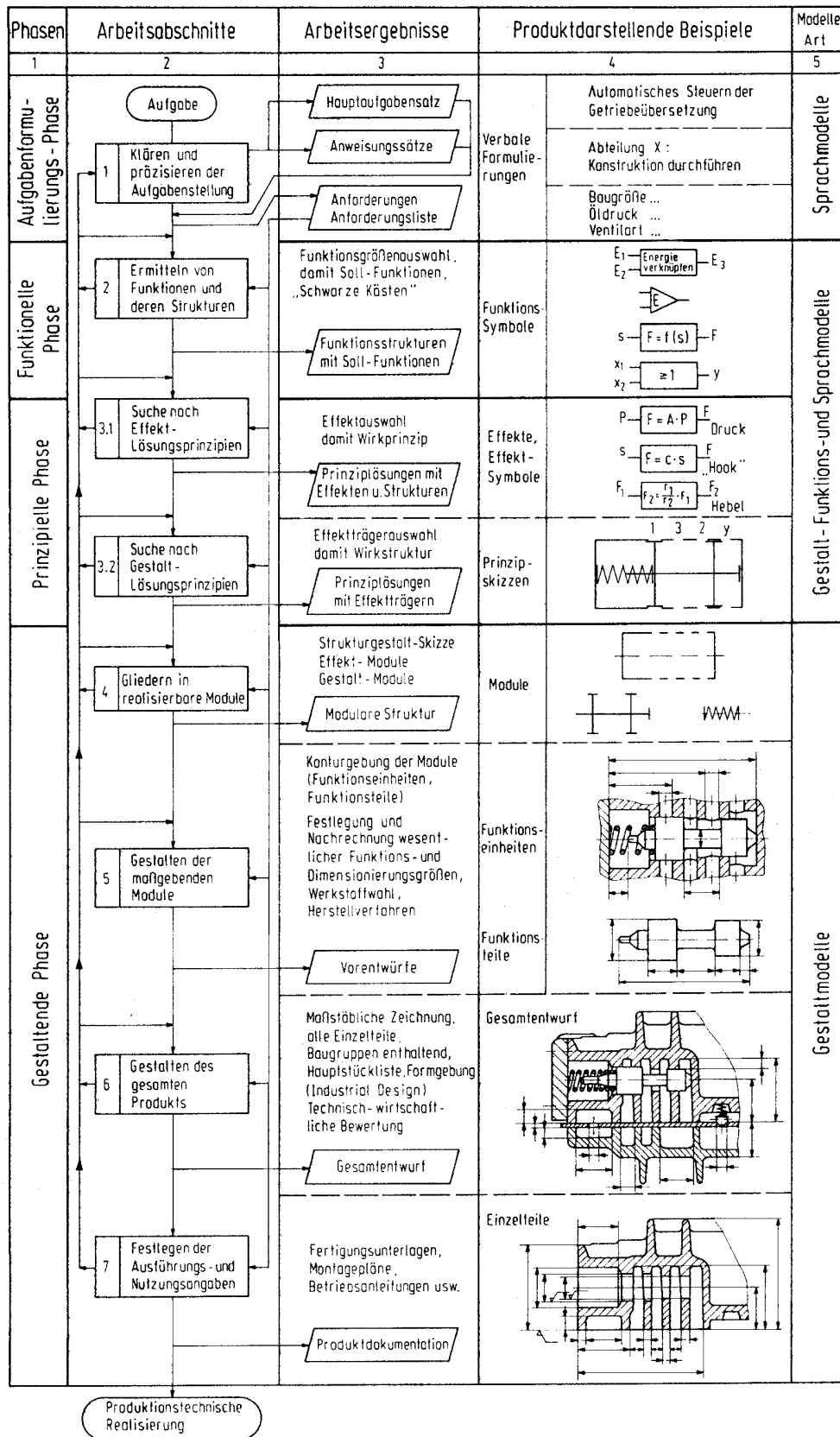
Der Konstruktionsprozeß gemäß Abb. 2.4 ist wie folgt unterteilt:

#### *Konstruktionsabschnitt „Aufgabenstellung“*

Der Schritt besteht im wesentlichen aus der Aufgabenformulierung und ist das Ergebnis einer genauen Abklärung und Präzisierung der Aufgabenstellung. Er enthält die Hauptaufgabe und die Anforderungsliste zur späteren Funktion. Die Hauptaufgabe beschreibt den Hauptzweck, das heißt beispielsweise bei einem Motorrad „Stoff transportieren“.

#### *Konstruktionsabschnitt „Funktion und Strukturen“*

Typisch für diesen Abschnitt ist die Verwendung von Funktionssymbolen, Funktionssätzen, Gleichungen und Schaltplänen für die produktdarstellenden Modelle. Die Hauptfunktion ist wichtigster Bestandteil und der Ausgang dieses Abschnittes. Diese lässt sich jedoch meistens nur mit Nebenfunktionen realisieren. Jede Art der Funktion kann zur leichteren Problemfindung in weitere Unterfunktionen aufgeteilt werden. Beim Motorrad wäre also über den Stofftransport hinaus das Thema Dämpfung, Sicherheit, Beleuchtung eine Nebenfunktion. In dieser Phase wird also noch von keinem physikalischen oder chemischen Vorgang gesprochen, sondern die reine Soll-Funktion beschrieben.



**Abb. 2.4:** Generelle Arbeitsschritte und Arbeitsergebnisse des Konstruktionsprozesses nach VDI-Richtlinie 2221 an einem Beispiel [VDI98]

### *Konstruktionsabschnitt „Prinziplösung“*

In diesem Baustein überprüft der Konstrukteur zunächst, ob die gewünschte Funktion physikalisch, chemisch, etc. zu realisieren ist. Es wird also die Fragestellung aufgeworfen: „Existiert ein Effekt oder eine Effektkette, die die Natur zur Verfügung stellt hat, um die vorhandene Eingangsgröße in die gewünschte Ausgangsgröße zu überführen?“ So kann beispielsweise eine Kraftänderung durch eine Verschiebung (Hooke) umgesetzt werden, welche dann zu einem Impuls wird.

Ein weitere Aufgabe dieses Abschnittes ist die Festlegung der geometrischen Wirkstruktur, das heißt, dass durch Zeichnungen und schematische Darstellungen Teile und Gelenke genauer dargestellt sind. Das genaue Festlegen von quantitativen Maßangaben erfolgt erst in späteren Abschnitten.

### *Konstruktionsabschnitt „Gestalt-Module“*

Dieser Abschnitt dient bei komplizierten, umfangreichen Konstruktionen der Vereinfachung durch die Unterteilung in einzelne Konstruktionsmodule sogenannte „Gestalt-Module“.

### *Konstruktionsabschnitt „Maßgabe“*

Die maßgebenden Bereiche der Wirkstruktur werden als erstes gestaltet, d. h. die zunächst als Striche dargestellten Wirkräume erhalten Querschnitte und Begrenzungsflächen. Diese gestaltdarstellenden Modelle sind Vorentwürfe und enthalten schon Körperkonturen. Sie bestehen aus Spurlinien der Begrenzungsflächen mit Schnittebenen. Für die Funktionserfüllung werden damit die Funktionsteile, Werkstoffe, Trennfugen, Montierbarkeit und Maße für die Funktion festgelegt.

Auch die Berechnung für die notwendige Dimensionierung muss an dieser Stelle durchgeführt und überprüft werden.

### *Konstruktionsabschnitt „Gesamtentwurf“*

Nachdem im vorhergehenden Abschnitt Größe und Form der wichtigen Funktionseinheiten festgelegt wurde, kann der maßstäbliche Gesamtentwurf durch Gestaltung der restlichen Bereiche, ergänzt durch die noch fehlenden Maße, ausgeführt werden.

Auch die Optimierung durch möglichst günstige Anordnung gehört in diesen Abschnitt.

Der Gesamtentwurf muss soweit fortgeschritten sein, dass eine technisch wirtschaftliche Begutachtung mit Berücksichtigung der Anforderungen durchgeführt werden kann.

### *Konstruktionsabschnitt „Detaillierung und Dokumentation“*

Einzelne Bauteile werden detailliert dargestellt und die Konstruktion auf Herstell- bzw. Fertigungsverfahren abgestimmt und die dafür notwendige Toleranz festgelegt. Typische Arbeitsmittel dieses Teils sind technische Zeichnungen, Stücklisten, Vorschriften, etc.

Aus diesen sieben Arbeitsschritten läßt sich ableiten, dass eine Verbesserung einer Konstruktion nahezu nur in den später liegenden Phasen sichtbar wird. Dieses ist jedoch wenig wirkungsvoll, da Verbesserungen in den späteren Phasen nahezu eine komplette Überarbeitung bereits vorher geleisteter Arbeit bedeuten. Bezüglich der klassischen Gliederung der Konstruktionslehre lassen sich die Inhalte der sieben Arbeitsschritte in die folgenden vier Punkten einordnen:

- **Problemstellungsphase:** Konstruktionsabschnitt „Aufgabenstellung“
- **Konzeptphase:** Konstruktionsabschnitt „Funktion“
- **Entwurfsphase:** Konstruktionsabschnitt „Prinziplösung“
- **Bearbeitungsphase:** Konstruktionsabschnitte „Gestaltmodule, Maßgabe, Gesamtentwurf, Detaillierung /Dokumentation“.

Die hier getroffene Ordnung der Konstruktionsinhalte lassen sich besser für das noch zu formulierende Konzept zur Bearbeitung der biomechanischen / hybriden Problemstellungen nutzen. Grundsätzlich bleibt aber festzuhalten, dass nur durch den Einsatz der Simulationstechnik die gesamte Vorgehensweise in der Konstruktion erheblich zu verbessern ist, da sich sogenannte „Sackgassen“ frühzeitig erkennen lassen und somit die Effizienz erheblich gesteigert werden kann. Simulation ist die Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind. (VDI 1993) Welche Formen der Simulation heute möglich sind, soll nachfolgend beschrieben werden.





## 3 Definitionen der Simulation und anderer Begriffe

Simulation ist als Methode meist relativ aufwendig, wenn sie mit z.B. mit Tabellenkalkulation oder Datenbankabfragen verglichen wird. Auch analytische Methoden, die nicht jedes einzelne Ergebnis betrachten müssen, kommen schneller zu einem Ergebnis. Jedoch gibt es einige Probleme, wo diese Methoden nicht zur Lösung führen werden, zum Beispiel, wenn die Grenzen der Analyse erreicht sind und nur ein „Durchspielen“ der Systematik weitere Aussagen liefern kann. Die Notwendigkeit ist gegeben, wenn bei der Lösung eines konstruktiven Problems die Zeitkomponente (Dynamik) oder die Kosten berücksichtigt werden müssen. Gesteigert werden die Forderungen, wenn darüber hinaus ein biomechanisches Problem gelöst werden soll, dann wird als Alternative zur konservativen Produktentwicklung und –prüfung der Einsatz der Simulation unumgänglich.

Zum besseren Verständnis sollen die in dieser Arbeit verwendeten Begriffe definiert und teilweise gegeneinander abgegrenzt werden. Einige Definitionen stammen aus der Fachliteratur andere sind Definitionen des Forscherteams LIPPECK [Lip01] und SCHLACHT.

### 3.1 Finite Element Methode (FEM)

Viele Bewegungsgleichungen in der Physik sind Differenzialgleichungen, die sich zum Beispiel aus der Welt der Kontinuumsmechanik herleiten lassen. Die daraus resultierenden Lösungen sind kaum mehr analytisch lösbar. Hier setzt die Idee der FEM-Rechnung an. Diese bietet dem Ingenieur Approximationen grundsätzlicher Kontinua mit verschiedenen Werkstoffgesetzen, aus denen ein komplexes Modell bauplanmäßig aufgebaut werden kann.

Alle Größen, d. h. Spannungen, Dehnungen, Dichten und Verschiebungen sind Funktionen der sechs unabhängigen Ortsvariablen. Die Finite Element Methode wird hauptsächlich zur Lösung von statischen Problemstellungen oder dynamischen Problemstellungen ohne Zeitabhängigkeit eingesetzt. Dies bedeutet für die Anwendung, daß alle Zeitableitungen in den Bewegungsgleichungen, das sind beispielsweise alle Trägheitsterme, auf Null gesetzt werden müssen.

**Finite Elemente** und deren Anwendungsprogramme dienen zur Berechnung von Spannungen, Biegungen und Torsionen von Bauteilen und den daraus resultierenden Verformungen und Schwingungen. Sie sind die Methode der endlich großen Elemente und stellen somit ein leistungsfähiges Verfahren zur numerischen Lösung von statischen Festigkeitsproblemen aller Art dar, allerdings mit erheblichen Einschränkungen bei zeitlichen bzw. dynamischen Problemstellungen mit großen nichtlinearen Bewegungen.

## 3.2 Mehrkörpersysteme (MKS)

MKS-Programme gehören zu der Gruppe der Simulationsprogramme und lassen sich vereinfacht als Sammlung von Unterprogrammen auffassen, die sehr unterschiedliche mathematische Funktionen lösen können. Entsprechend den Anweisungen des Benutzers werden die zur Lösung der speziellen Aufgabe benötigten Routinen zur Verfügung gestellt. Für die Befehle des Benutzers ist eine Sprach- und / oder grafische Oberfläche vorhanden, die mit dem physikalisch / mechanischen Sprach- und Symbolgebrauch korrespondiert. [KMP89], [BiS86], [BrP92]

Durch die Anwendung der MKS-Systeme entfällt die früher notwendige Anwendungsprogrammierung solcher Problemfälle, beispielsweise in FORTRAN völlig. Diese Programme ermitteln die Ergebnisse auf der Basis der typischen Bewegungsgleichungen, wie z. B. d'Alambert'sches Prinzip, Gauß'sches Prinzip oder Hamilton'sches Prinzip und geben diese in grafischer Form aus. Als Nachteil ist die Tatsache anzusehen, daß der Benutzer keinen Einfluß auf die jeweils zur Anwendung kommenden Funktionen hat, da die Programme meist geschlossen sind und dem Anwender keinen Einblick in die Gleichungen gestatten.

**MKS-Programme** sind ingenieurmäßig beschriebene mechanische Modelle, die in Bewegungsgleichungen umgesetzt werden. Dazu stellt das Programm eine Sammlung grundsätzlicher Bauteile (Massen, Gelenke, etc.), Kraftgesetze (Federn, Dämpfern, etc.) und Bewegungsvorgaben bereit.

## 3.3 Biomechanisches System (BMS)

Unter Biomechanik wird die Untersuchung der Bewegungen des Menschen und die mechanischen Bedingungen dieser Bewegungen verstanden. Eigenschaften der Bewegung und des sich bewegenden Körpers werden gemessen, quantitativ beschrieben, verglichen, mögliche Unterschiede und Zusammenhänge ermittelt und unter Anwendung mechanischer Gesetze modelliert mit dem Ziel, die wesentlichen Komponenten in ein mechanisches Ersatzmodell zu implementieren. Die wissenschaftlichen Grundlagen der Biomechanik sind die Mechanik sowie die biologischen Bedingungen und Gesetzmäßigkeiten der Bewegungssteuerung. Die Biomechanik befasst sich mit genau jenen Größen, die für die Umgebung des Menschen eine Rolle spielen. Diese sind Bewegungskräfte in Verbindung mit Körperhaltungen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen, kurz: mit der Wirkung von Kräften auf den Körper und dessen Reaktionen. [Bau89]

BALLREICH bezeichnet die Biomechanik als Analyse der Bewegung von Mensch und Tier mit Berücksichtigung der Gesetze der Mechanik. Gegenstand biomechanischer Untersuchungen

sind folglich die mechanische Bewegung, also die Ortveränderung von Masseteilchen, von Mensch und Tier unter der Berücksichtigung der mechanischen Eigenschaften und Voraussetzung der Bewegungsapparate, die ihrerseits von den biologischen Bedingungen der Organismen funktionell abhängig sind. [BaB89]

Nach HATZE ist Biomechanik jene Wissenschaft, welche die Struktur und Funktion biologischer Systeme unter Verwendung der Erkenntnis und Methoden der Mechanik erforscht. [Sch00]

**Biomechanik** ist die „Festigkeitslehre“ der „Bauteile“ (im wesentlichen Knochen, sowie die Organe und das Gewebe) des lebenden menschlichen Körpers. Insbesondere Grenzwerte der Belastbarkeit und Reaktionskräfte auf äußere Einwirkungen sind für den Ingenieur in bezug auf diese Lehre von größter Bedeutung.

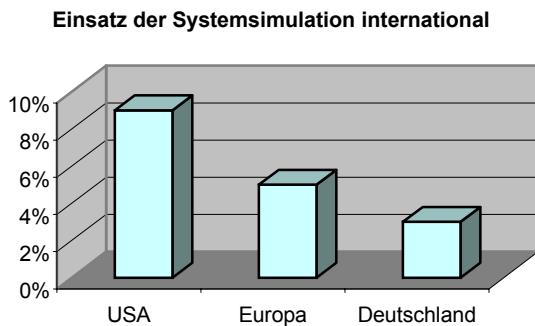
### 3.4 Hybrides biomechanisches / mechanisches System (HBS)

Ein solches System kombiniert die Lehre der klassischen Mechanik, also die Statik, Kinematik, Dynamik und Festigkeitslehre mit der Lehre der Biomechanik. Ein hybrides biomechanisches / mechanisches Modell beinhaltet eine Schnittstelle beider Lehren. Das heißt: Äußere Einflusskräfte werden auf ein durch die Biomechanik geschaffenes mechanisches Ersatzmodell aufgebracht und deren Reaktionskräfte berechnet oder gemessen. Durch die Erkenntnisse der Biomechanik und das Wissen technisch mechanischer Reaktionen, sogenannte technisch-physikalische Effekte (TpE), kann ein solches Ersatzmodell gebildet werden. Dieses Modell reagiert, obwohl es rein mechanisch konzipiert ist, wie ein biologischer Körper.

Ein **hybrid biomechanisches / mechanisches System** ist ein Modell, welches auf mechanische äußere Einflüsse die selben Kräfteaktionen zeigt wie ein biologischer Körper. Es besteht sowohl aus einem oder mehreren klassisch mechanischen als auch aus einem oder mehreren biomechanischen Systemen. Die Schnittstellen werden durch mechanische Ersatzmodelle gebildet.

### 3.5 Zusammenfassung

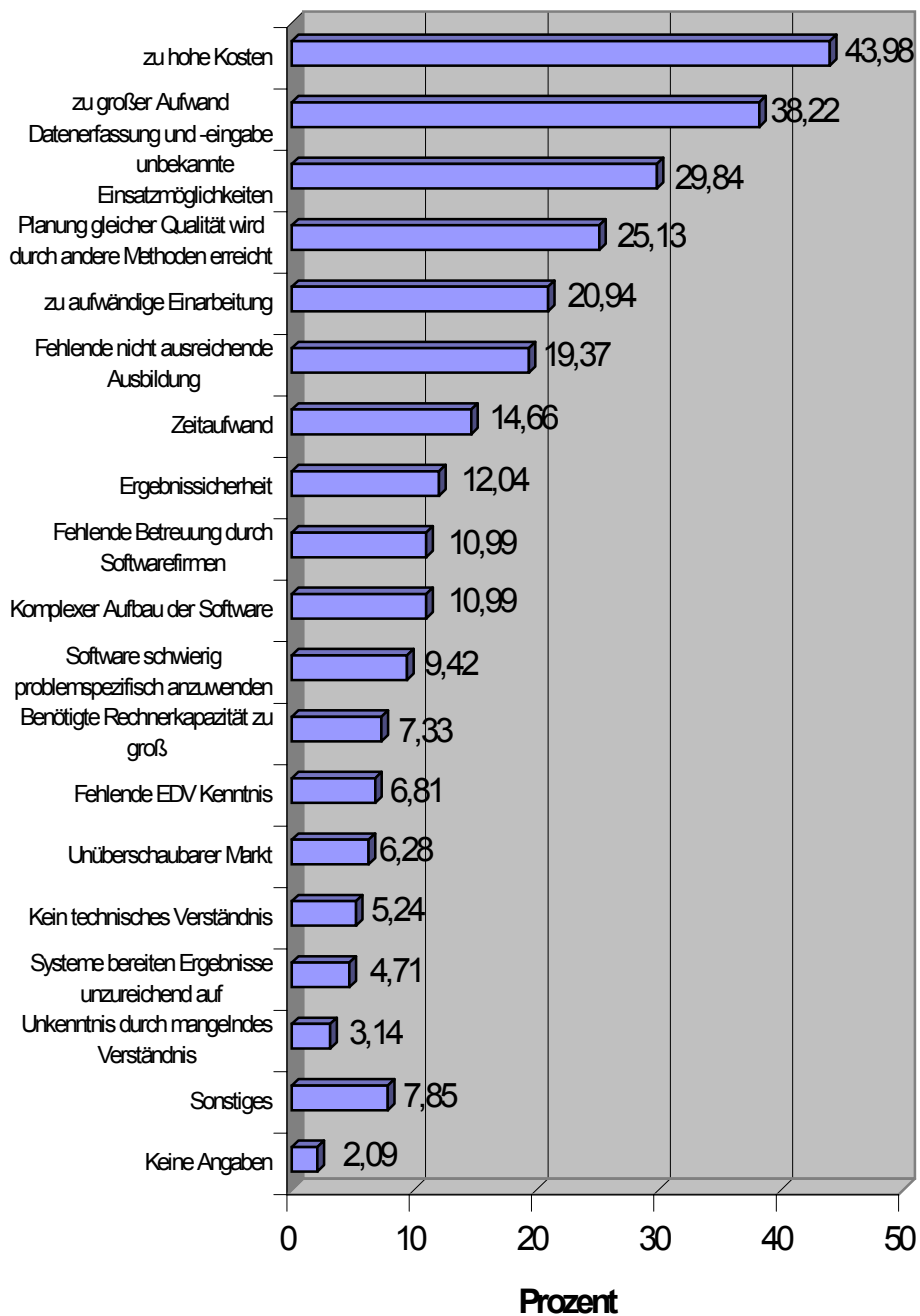
Wie schon vorher erwähnt, lassen sich die möglichen Konstruktionsfehler nur durch eine virtuelle Produktprüfung früh erkennen. Das heißt, der Einsatz der Simulation parallel zum konservativen Konstruktionsprozeß gemäß VDI-Richtlinie 2221 ist ein unbedingtes Muß, wenn der gesamte Produktentwicklungsprozeß effektiver gestaltet werden soll. Unter Simulation wird die Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem Modell verstanden, deren Erkenntnisse auf die Wirklichkeit übertragen werden [VDI93]. Die Abbildung 3.1 zeigt, dass der Einsatz der Simulationstechnik in Deutschland bis heute nicht genügend genutzt wird.



**Abb. 3.1** : Einsatz der Simulationstechnik [VDI93]

Es ist kaum erklärbar, dass bei den oben genannten Forschungstätigkeiten kaum auf die Simulation und erst recht nicht auf die Parallelisierung von Simulationsstrategien komplexer dynamischer Probleme innerhalb des Produktentwicklungsprozesses eingegangen wird und schon gar nicht, wenn diese biomechanisch/mechanisch hybrid sind. Die Abbildung 3.2 soll aufzeigen, warum die Simulationstechnik in Deutschland so wenig Berücksichtigung findet.

Das Argument der hohen Kosten ließe sich durch eine entsprechende Vorbereitung des Einsatz der Simulation in allen Bereichen des produzierenden Gewerbes leicht lösen. Ein Alarmzeichen stellen allerdings die Angaben bezüglich der nicht ausreichenden Ausbildung bzw. des fehlenden technischen Verständnisses dar. Hier sind in starkem Maße die Universitäten und Fachhochschulen gefordert, in Zukunft mehr für die Ausbildung im Bereich der Informationstechnik und hier speziell im Bereich der Maschinenbau- bzw. Ingenieur-Informatik zu tun. Alle Antworten die im Zusammenhang mit der einzusetzenden Software stehen, lösen sich durch einen vermehrten Einsatz von selbst.



**Abb. 3.2** : Gründe für die Nichtberücksichtigung der Simulation [VDI98]

Alle die hier genannten Defizite treffen in besonderem Maße auch auf die Anwendung der Simulationstechnik als Analysewerkzeug komplexer dynamischer / biomechanischer Systeme in Verbindung mit der Produktentwicklung zu. Deshalb gibt es in mittelständischen Unternehmen kaum Anwendungen der Simulationstechnik und selbst in Großunternehmen der Flugzeug- und Automobilindustrie steckt diese Vorgehensweise noch in den „Kinderschuhen“. [WHH94]

Eine wirklich durchgreifende und erfolgversprechende Verbesserung in der Produktentwicklung verlangt nach einer Simulationsintegration in allen Phasen des Produktentwicklungsprozesses und erst recht wegen der schon angesprochenen Kostenverantwortung im Bereich des Konstruktionsprozesses. Aber zunächst sollen die heute übliche Vorgehensweise des Konstruktionsprozesses und die vorhandenen Simulationsstrategien vorgestellt werden.

## 4 Forderungen an den Produktentwicklungsprozeß

### 4.1 Allgemeine Forderungen

Um ein Produkt zu entwickeln bzw. zu überprüfen wird gemäß VDI im Rahmen der Aufgabenklärung eine klare und vollständige Aufgabenstellung erarbeitet. Diese Vorgehensweise wird häufig als Produktentwicklungsmethodik beschrieben. Darunter versteht man die umfassende und zielgerichtete Vorgehensweise eines Konstrukteurs über alle Aktivitäten des Produktentwicklungsprozesses hinweg. Diese Aussage muss auch auf die biomechanisch/mechanischen hybriden Problemstellungen übertragbar sein. Damit das angestrebte Ziel, die Herstellung eines qualitativ hochwertigen Produkts bei reduziertem Zeit- und Kosteneinsatz, erreicht werden kann, ist bezüglich der Konstruktion und der Fertigung die folgende Vorgehensweise unbedingt einzuhalten:

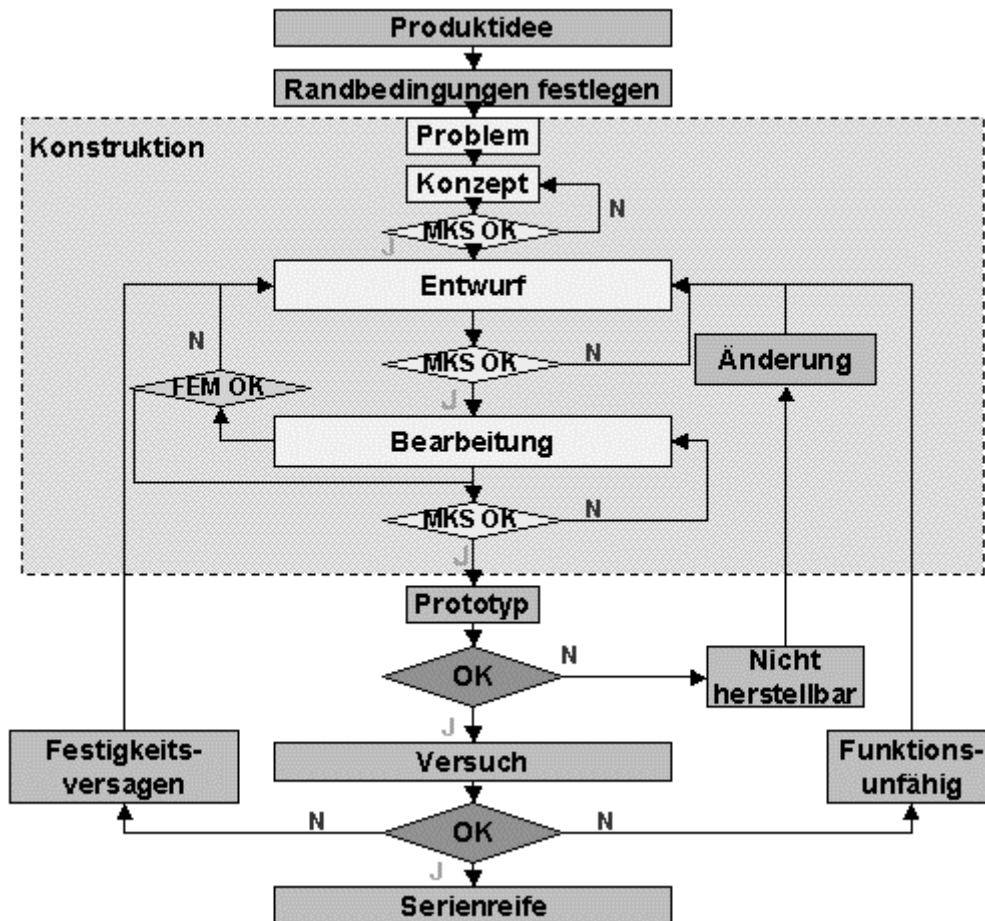
1. Konzeption des Produktes auf der Basis der Konstruktionssystematik unter Berücksichtigung der vier Phasen: Problemstellung, Konzept, Entwurf und Bearbeitung, wie in Kap. 5. dargestellt.
2. Umsetzung der Konstruktionsergebnisse in ein rechnergestütztes Modell mit anschließender Simulation (Kap. 6.3.).
3. Verifizierung der Simulationsergebnisse durch Bau eines Prototypen (Kap. 6.4.).
4. Überprüfen der Simulation mit Hilfe des Prototypen auf einem geeigneten Prüfstand (Kap. 6.5.)
5. Diskussion der Ergebnisse führt zur Freigabe oder zu einem Verbesserungsvorschlag.

Im Folgenden ist noch zu klären, wie die Simulation tatsächlich in den gesamten Prozeß eingebunden werden kann und welche Bedingungen hinsichtlich der Biomechanik zu berücksichtigen sind.

### 4.2 Berücksichtigung der Simulation

Ab der sogenannten Entwurfsphase bis hin zur Prototypenerprobung ist der Einsatz der Rechnersimulation sinnvoll und auch notwendig. Gemäß Abb. 4.1 werden die zur Lösung beitragenden Simulationen und die rechnergestützte Konstruktion (CAD) parallel zu der üblichen Vorgehensweise der Konstruktion (vgl. Abb. 2.3) eingeführt. Dadurch ist eine jederzeitige Kontrolle und Überwachung der gefundenen Teillösungen gewährleistet und diese Teilergebnisse können unmittelbar mit den gewünschten Ausgangsforderungen an das

herzustellende Produkte auf ihre Richtigkeit hin verglichen werden. Die Abb. 4.1 zeigt schematisch eine derartige Parallelisierung der Prozesse.



**Abb. 4.1** : Berücksichtigung der Simulation im Produktentwicklungsprozeß

Die Abb. 4.1 zeigt nun recht anschaulich, dass durch die Einführung möglicher Iterationsschritte, ausgelöst durch den Einsatz der MKS-Methode, zu einem recht frühen Zeitpunkt ein Teil der eventuell auftretenden Fehler erkannt werden kann. Dies bedeutet, dass sicherlich einige sonst notwendige Änderungen am Prototyp und den damit verbundenen erneuten Versuchen entfallen können. Allein die hier erzielte Reduzierung der Kosten, die durch die eingesparten Änderungen ermöglicht werden, rechtfertigt in jedem Fall den Einsatz der MKS-Methode.

Wie weiter oben beschrieben, ist die Bearbeitung von biomechanischen und mechanisch hybriden Problemstellungen kaum erforscht. Deshalb soll im Folgenden die Einbeziehung dieser Problematik noch einmal kurz dargestellt werden.



### 4.3 Berücksichtigung der Biomechanik

Um der Berücksichtigung der biomechanischen Problemstellungen innerhalb des Konstruktionsprozesses einen angemessenen Stellenwert zu gewähren, müssen die Auswirkungen von mechanischen Belastungen in Form von Kräften und Stößen auf biologisches, insbesondere menschliches Material berücksichtigt werden.

Genau wie bei der Erforschung, Verbesserung und Simulation eines mechanischen Bauteils sind zunächst die Punkte abzustecken, welche das Hauptmaß der gewünschten Konstruktionsverbesserung bilden. Darüber hinaus muss die Schnittstelle zwischen Technik und Humanforschung (hybrides System) berücksichtigt werden, nämlich das Gebiet der Biomechanik.

Wie schon zuvor erwähnt, versteht man unter **Biomechanik** die „Festigkeitslehre“ der „Bauteile“ (im wesentlichen Knochen, sowie die Organe und Gewebe) des lebenden menschlichen Körpers zu verstehen. Die Biomechanik für den Ingenieur beinhaltet das Wissen von den Belastungsgrenzen des menschlichen Körpers. Das heißt, es müssen die Fragen beantwortet werden, welche physischen Belastungen dem Menschen ohne oder mit definiert geringen nachfolgenden bleibenden Schädigungen noch zugemutet werden können.

Für den technischen Sachverständigen ist die Biomechanik eine Schnittstelle zur Medizin. In der Unfallforschung, also auch bei der Konstruktion von Einrichtungen, die beispielsweise Verletzungen im oder am PKW verringern sollen oder bei der Konstruktion von Sportgeräten, ist die Kenntnis von biomechanischen Zusammenhängen eine absolute Grundvoraussetzung.

In der Forschung differenziert man bei hybriden Systemen zwischen Belastungsgrenzen und Schutzkriterien. Die Belastungsgrenzen und deren Grenzwerte gewinnt man experimentell durch Verzögerungen, Kräfteeinleitungen, etc. Darüber hinaus birgt das Versagen menschlicher Statik (Knochen oder Gelenkbrüche) lebensgefährliche Risiken bei zu starken Belastungen. Beim Überschreiten dieser Werte sind Schädigungen des menschlichen Körpers zu erwarten. Schutzkriterien sind festgesetzte Werte, die als Restriktion nicht überschritten werden dürfen, und sind für die späteren **Simulationen** unbedingt benötigte Bedingungen zur **Restriktionsbildung** oder Startwertfestlegung. [JHV93]

Der meist angewandte Restriktionswert ist das Head-Injury-Criterion (HIC). Der Motor-Vehicle-Safety-Standard (MVSS) der USA schreibt vor, dass ein HIC-Wert von 1000 nicht überschritten werden darf. Der hohe Anwendungsgrad dieses zeitabhängigen mechanischen „Kopplungswertes“ bei biomechanischen/mechanischen Problemstellungen liegt an dem hohen Schutzbedarf des menschlichen Kopfes. Dies ergibt sich einfach aus der Tatsache, dass die häufigsten Einleitungen von hohen Kräften auf den menschlichen Körper verkehrsunfallbedingt sind und die tödlichen Unfälle auf Kopfverletzungen zurückzuführen sind. Der HIC-Wert (Head-Injury-Criterion). ist also der Standardwert für das Maß der Kopfverletzung. Er berechnet sich wie folgt:

$$HIC = \left( \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} a_{res} dt \right)^{2,5} \cdot (t_2 - t_1)$$

$a_{res}$  = resultierende Kopfverzögerung

Vereinfacht ausgedrückt bedeutet dieser Wert: Je höher die Belastung ist, um so kürzer darf deren Wirkdauer nur sein.

Für die anderen Körperteile gibt es natürlich ebenfalls Grenzwerte, welche durch Hochschulen interdisziplinär durch Erhebungen und Forschungen ermittelt worden sind. Diese Erhebungen gestalteten sich relativ aufwendig, da die biomechanischen Untersuchungsergebnisse auf Grund der großen Streubreite der menschlichen Konstitution (Größe, Gewicht, Alter ) keine allgemeingültigen Grenzwerte liefern. So muss zur Ermittlung dieser Werte vom sogenannten „Worst-Case“ ausgegangen werden, die dann als Grenzwert für eine Simulation beziehungsweise einem Real-Versuch, beispielsweise bei Aufprallversuchen, herangezogen werden.

Als Grenzwert beziehungsweise Restriktionswert werden hier folgende Werte festgelegt:

- Für die Dauer von 3 ms darf die Verzögerung maximal 60 g ( $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ) betragen.
- Die Oberschenkelkraft darf 10 kN als Maximalwert nicht überschreiten.

## 4.4 Fazit

Das Herstellen der Prototypen und insbesondere die Überprüfung durch die Prüfzentren am Ende der „gestaltenden Phase“ stellt natürlich für kleine Produktionsunternehmen eine kostenintensive Belastung dar, die der Markt durch das immer noch nicht ausreichende Sicherheitsdenken der Kundschaft, wie Marktanalysen zeigen, nicht wieder hergibt.

Da der Markt sich nicht durch den Konstrukteur verändern lässt, muss eine Möglichkeit gefunden werden, um insbesondere die biomechanischen Probleme innerhalb der Sicherheitstechnik kostengünstig zu erforschen. Dies soll, wie oben erwähnt, mit Hilfe von Simulationen parallel zur Vorgehensweise der Konstruktion gemäß der VDI-Richtlinie 2221 geschehen.

Um dieses zu erreichen, müssen die minimalen Mehrkosten durch

- eine verkürzte Entwicklungszeit,
- eine Reduzierung der Prototypen gegen Null,

- eine hohe verifizierte Prognosesicherheit mit stabilen Lösungen und
- einer schnellen Verfügbarkeit der Ergebnisse

aufgefangen werden.

Die hier zu erarbeitenden Erkenntnisse und Vorgehensweise müssen dann auf den *Gültigkeitsbereich* der biomechanisch/mechanischen Problemstellungen beschränkt *übertragbar* sein. Diese Arbeit soll vorhandene konstruktive Vorschläge vom Prototypenbau bis zum endgültigen Real-Test mit Bewertung und Optimierung der Konstruktionsidee chronologisch begleiten und die erarbeitete Simulationsstrategie erläutern. Darüber hinaus sollen die durch den Real-Test gewonnenen Ergebnisse die Verifizierung teilweise vorhandener Computersimulationen ermöglichen und darüber hinaus „Eckdaten“ für aufwendigere liefern. Insbesondere soll aufgezeigt werden, dass die Möglichkeit besteht, intensiv Kosten in der Anzahl der Crashversuche einzusparen, indem das Grundkonzept bereits vorher per Rechnersimulation ziemlich genau erprobt wird.

Sollte diese Rechnersimulation zumindest in groben Ansätzen durch den Realversuch verifiziert werden, kann davon ausgegangen werden, dass auch kleinere Firmen diesen Konzeptgedanken von der „Problemstellungsphase“ bis zur „Bearbeitungsphase“ (vgl. Kap. 2.3) mit entsprechender Softwaretechnik und dazugehöriger Hardware erproben und anwenden können.

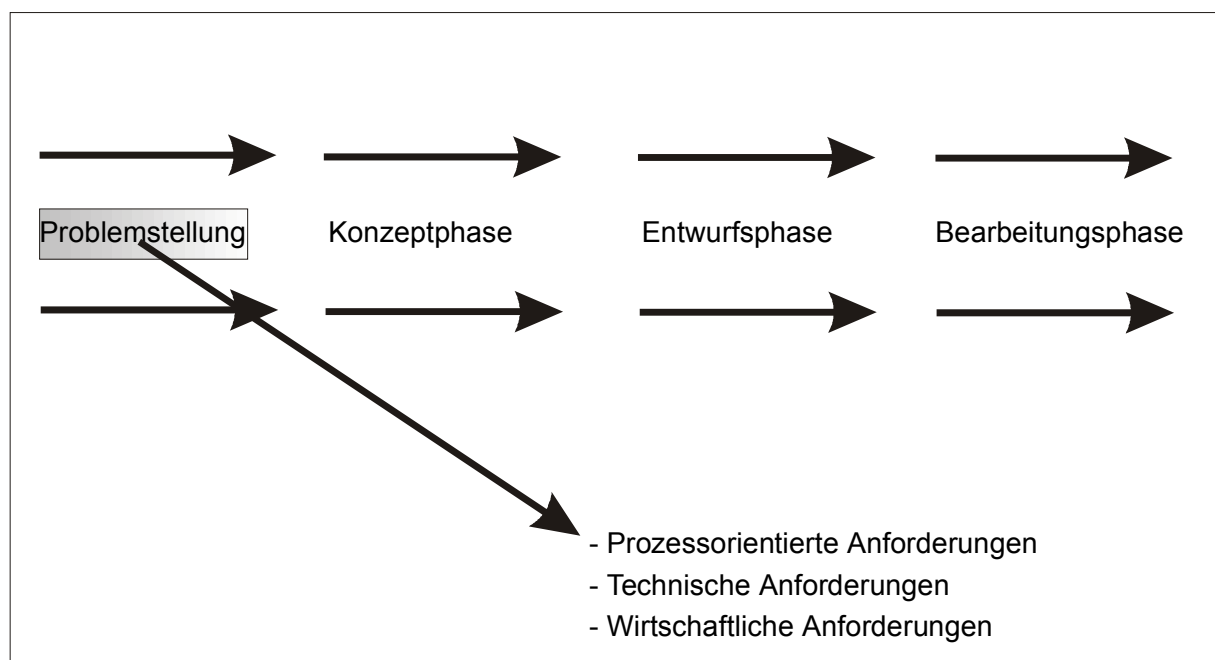
Der dadurch gewonnene *Nutzwert* in Form von *Zeit- und Kostenersparnis* dürfte nicht gerade minimal sein. Die zu erwartende Steigerung an Qualität schlägt sich vielleicht nicht direkt in einem wirtschaftlichen Vorteil nieder, aber es zeugt doch von einem hohen *ideellen* Wert bei einem Produkt, welches für Menschen zugeschnitten (biomechanisch) ist, ohne Mehrkosten für den Konsumenten bessere Technik



## 5 Konzeptvorschläge für eine optimierte Bearbeitung aller Phasen innerhalb des Konstruktionsprozesses

Im Folgenden werden die bereits erarbeiteten vier *Phasen Problemstellung, Konzept, Entwurf und Bearbeitung* darauf hin untersucht, inwieweit der Einsatz der Simulation jeweils möglich ist. Grundsätzlich ist es erstrebenswert die Simulation möglichst in allen Phase gleichermaßen einzusetzen, allerdings lassen die sehr unterschiedlichen Tätigkeiten innerhalb der einzelnen Phasen diese Wunschvorstellung nicht realistisch erscheinen. Zum besseren Verständnis werden diese Vorschläge nicht immer allgemein formuliert, sondern überwiegend an einem biomechanischen Beispiel, dem sogenannten Crash Dummie erläutert. Darunter ist ein menschliches Körpermodell zu verstehen, wie es bei der Konstruktion innerhalb der Sicherheitstechnik zum Einsatz kommt. Diese konkrete Zuordnung ist auch deshalb sinnvoll, weil die später gewählten Beispiel aus der KFZ-Sicherheitstechnik entnommen sind.

### 5.1 Problemstellungsphase



**Abb. 5.1** : Problemstellung innerhalb der Produktentwicklung

Bei der Konzeptgewinnung versucht der Ingenieur im Rahmen der Problemstellung ([Abb. 5.1](#)) jeweils eine Vorstellung davon zu gewinnen, wie und mit welchen Hilfsmitteln ein Produkt prinzipiell oder qualitativ funktionieren könnte. Hierbei müssen alle wirtschaftlichen

und technischen, aber auch prozessorientierten Anforderungen in Einklang gebracht werden. Dazu muss in einem ersten Schritt, durch Zerlegen und Strukturieren der Aufgabe, eine Schnittstelle zwischen der Problemstellung und der Konzeptphase geschaffen werden. Für diese Zerlegung benutzt der Konstrukteur verschiedene methodische Hilfsmittel.

Grundsätzlich wird zur Ideenfindung eines neuen Produktes zwischen dem Sammeln und dem geplanten Suchen unterschieden. Das Sammeln beruht auf der Auswertung vorhandener Informationsquellen durch Lesen von Fachliteratur, dem Besuch von Fachmessen sowie durch Gespräche mit Fachkollegen. Eine solche Ideensammlung ist natürlich zufallsabhängig und höchst unwissenschaftlich im Sinne von Systemordnung.

Bei der Anwendung von systematischen Methoden, wie zum Beispiel dem morphologischen Kasten oder der Funktionsanalyse wird der Versuch unternommen eine gegebene Problemstellung mittels einer fest vorgegeben Vorgehensweise zu lösen. Hierbei ist es sinnvoll die Aufgabe in Teilprobleme zu unterteilen oder diese in Wirkprinzipien zu zerlegen. Dies hat zur Folge, dass die Problematik simpler wird und die Funktionsweise der Grundidee schneller zu überprüfen ist und die Konzeptverifizierung mit Hilfe einer Simulation schneller modellierbar ist.

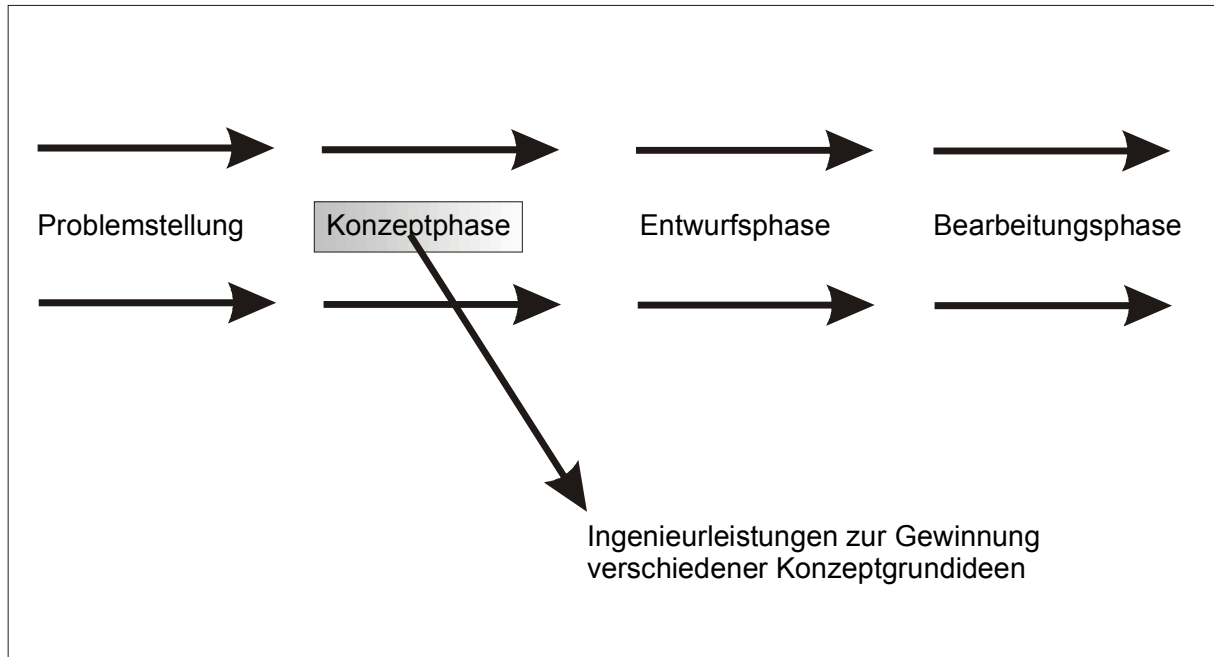
Für hybride Problemstellungen ist gemäß der eingangs aufgestellten Forderung die Zerlegung nach den TPE (Technisch physikalischen Effekte) am geeignetsten. Für die Lösungsfindung wird in den meisten Fällen hier versucht, gestützt auf gedanklich vorhandenes Wissen, wie den bereits erwähnten Fachzeitschriften, Patentschriften, Firmenschriften etc., einzelne Teile eines dort vorgefundenen Lösungskonzeptes zu übernehmen um so den richtigen Lösungsansatz zu finden. Allgemein betrachtet wären auch andere Techniken zur kreativen Lösungsfindung möglich. Man denke an Optimierungsmethoden oder Parallelvergleiche mit Analogiefindung aus einem nicht technischen Bereich, zum Beispiel der Biologie. Diese Vorstellung wäre bei einem hybriden System gar nicht soweit hergeholt.

Bei der Lösungsfindung mit TpE hat der Konstrukteur bei der Anwendung der Simulation jedoch die Möglichkeit für die Gewinnung oder Abstrahierung eines Ansatzes, ein Schema von Merkmalen zu erstellen, welches die Lücken sichtbar macht, in denen ihm noch unbekannte Lösungen enthalten sein könnten. Die Ergebnisse dieser Phase sind also Konzepte, die als prinzipielle Lösung in Frage kommen und vom Konzeptgedanken die allerwichtigsten Anforderungen erfüllen sollten. Die Prüfung dieser Eigenschaften bezüglich der Qualität als auch der Quantität sollte möglichst frühzeitig erfolgen

Für diese Simulation, die der Eigenschaftsfrüherkennung dienen, ist es wichtig, frühzeitig die Eigenschaften zu identifizieren, von denen im Produktentwicklungsprozess nur geringe oder gar keine Informationen vorliegen, damit diese gegebenenfalls nachgereicht werden können. Diese Messwerte werden allgemein Absicherungsbedarfswerte genannt und stellen sicher, dass im Rahmen der Eigenschaftsfrüherkennung die richtigen Eigenschaften analysiert werden.

## 5.2 Konzeptphase

Ein weiteres Ziel der Aufgabenklärung/Problemstellung ist die Umsetzung aller Anforderungen in sogenannte Grundkonzepte (Abb. 5.2). Dieses kann zwar schon teilweise als Randgebiet der Konzeptphase gewertet werden, ist aber zur Eigenschaftsfrüherkennung bei einer Parallelsimulation während des Simulationsprozesses nicht wegzudenken.



**Abb. 5.2** : Konzeptphase innerhalb der Produktentwicklung

Diese wichtigen Punkte müssen erarbeitet und in einer Art Anforderungsliste berücksichtigt werden. Grundsätzlich sind natürlich die bereits erwähnten biomechanischen Restriktionen zu berücksichtigen. Sollte ein Grundfunktionskonzept eine Überschreitung derselben schon hier erkennbar werden lassen, wäre dies zwar für den Konstrukteur sehr ärgerlich, aber erspart schon an dieser Stelle weitere Investitionen an Zeit und Geld in die falsche Richtung, bei der Bewerkstellung eines biomechanisch/mechanischen Problems.

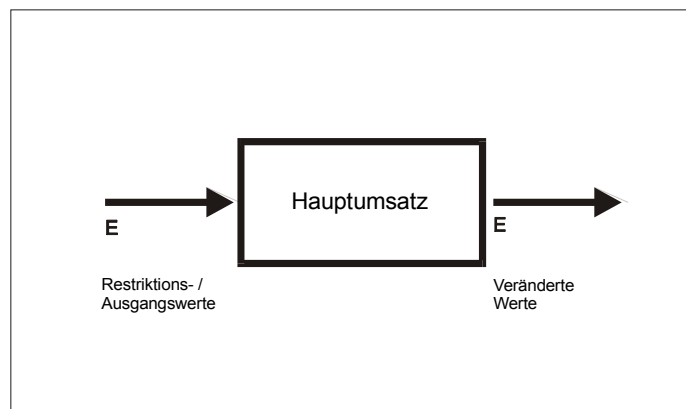
Damit diese komplexe Aufgabe zu beherrschen muss die gesamte Aufgabe systematisch strukturiert werden. Aus der Konstruktionslehre ist bekannt, dass alle Produkte eine Hauptfunktion erfüllen. Diese lässt sich durch eine allgemeinen Funktionen beschreiben. Wird diese Hauptfunktion weiter detailliert, so entsteht daraus eine allgemeine Strukturierung der Funktion. Damit dies gelingt, muss für diese gesamte Aufgabe das Wesentliche vom Unwesentlichen getrennt werden. Hierbei ist es sinnvoll nach dem folgendem Prinzip vorzugehen:

- Hauptumsatz festlegen (Hauptziel und –anforderung)

- Möglichkeit der Strukturierung suchen und festlegen.

Für diesen Hauptumsatz gibt es die Funktionsverben, wie zum Beispiel: speichern, leiten, umformen, wandeln, verknüpfen und die Funktionsgrößen Stoff, Energie, Information, etc.. Die Funktionsgröße für die klassische spanende Bearbeitung wäre „Stoff trennen“, für einen Crash Deformationsversuch wäre dies „Energie umformen“.

Die Festlegung eines Hauptumsatzes geschieht am sinnvollsten durch ein Black-Box (Abb. 5.3) Modell, dessen Funktionsstruktur folgendermaßen aussieht.



**Abb. 5.3** : Black-Box-Modell

Für die Festlegung des Hauptumsatzes muss das zu analysierende Modell zerlegt werden. Die Umsetzung der Zerlegung kann auf verschiedene Art und Weise stattfinden. Die hier verwendete Zerlegung wird in der Analyse der Konstruktionssystematik auch als *Technisch-physikalische-Effekte* (TpE) bezeichnet.

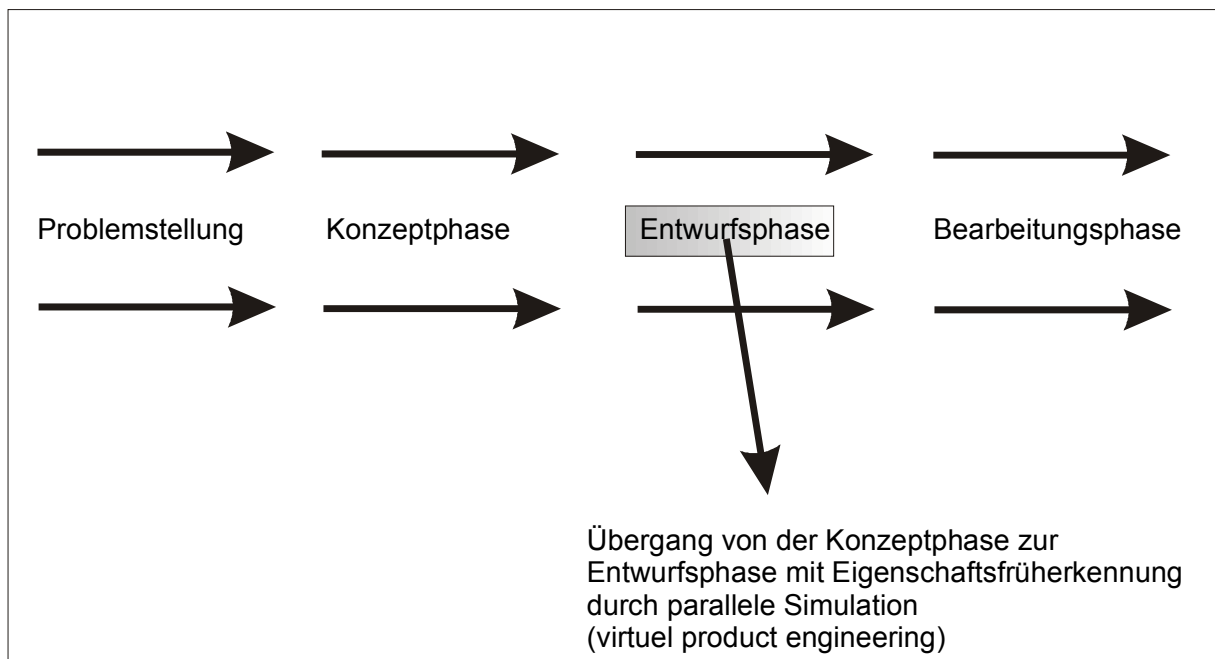
TpE sind elementare, abgrenzbare physikalische Erscheinungen, die auf der Grundlage der Erhaltungssätze wie Masse-, Energie-, Impuls-, Drallerhaltungssatz und Gleichgewichtssätze wie Kräfte- und Momentengleichgewicht durch Beziehungen von physikalischen Größen zueinander beschrieben werden können. Die TpE werden jeweils in 3 Spalten dargestellt:

In der ersten Spalte wird der physikalische Bereich (z. B. Mechanik, Elektrotechnik, etc.) genannt, in der zweiten das physikalische Phänomen (Naturgesetz) und in der dritten Spalte der eigentliche TpE, so wie er in der bestimmten Konstruktion genutzt wird (z.B. Wirkanordnung, Gleichungen, Kennlinien, etc.). Zurückgeführt auf die Grundfunktion der mechanischen Problemstellung oder des mechanischen Ersatzmodells für die biomechanischen Problemstellung bilden diese dann die ideale Abstrahierung zur Vereinfachung des Modells. Schon jetzt wird durch die *Zerlegung* klar, an welcher Stelle der Modellierung bei der späteren *Rechner-simulation* beispielsweise ein Gelenk oder eine Feder berücksichtigt beziehungsweise vorgesehen werden muss.



### 5.3 Entwurfsphase

In der Entwurfsphase (Abb. 5.4) wird auf der Basis der Konzeptphase ein biomechanisches System modelliert. Ein Datensatz zur Modellierung eines Dummys (hybrides System) auf einem Rechnersystem benötigt einige Vorarbeit, denn es soll ja eigentlich nicht ein Dummy simuliert werden, sondern ein Mensch. Als Abstrahierung für die Modellierung ist jedoch der physikalische Dummy geeignet.



**Abb. 5.4** : Entwurfsphase mit Eigenschaftsfrüherkennung

Mechanische menschliche Körpermodelle oder sogenannte Crash Dummies bestehen aus einem Metall- oder Plastikskelett, welches Gelenke beinhaltet und mit einer hautähnlichen Kunststoffmasse überzogen ist. [Fou94] Die Konstruktion ist so gestaltet, dass Dimension, Massenverteilung, die Freiheitsgrade der Bewegung und der mechanische Körperwiderstand, die des realen Menschen nahe kommt. Der Dummy ist mit Elektronik bestückt, welche Beschleunigungen, Kräfte und Bewegungen registrieren und messen kann. Diese Messwerte können dann mit den Grenzwerten der Belastungsgrenze des Menschen verglichen werden..

Neben der Möglichkeit der Nutzung eines physikalischen Dummy ist eine weitere Abstraktion möglich und zwar die Erstellung von mathematischen Modellen. Auch diese Modelle müssen ihrem menschlichen Vorbild in den Grobzügen des Aufbaus ähnlich sein. Ein mathematisches Modell oder besser gesagt ein numerisches Modell gestattet die Ermittlung von Ergebnissen mit Hilfe von Computersimulationen. Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt in der Häufigkeit der Durchführung solcher Simulationen. Durch diese Vorgehensweise wird

erheblich an Zeit eingespart im Vergleich zu dem Aufwand einer Vorbereitung für einen Realversuch und damit werden logischerweise auch erheblich Kosten eingespart.

Diese Vorgehensweise läßt sich auch schon innerhalb des Produktdesign im Rahmen eines Vorversuchs realisieren.

Ein Dummy kann ziemlich gut in seine einzelnen Segmente eingeteilt werden. Jedes Segment stellt einen Körperteil mit den jeweiligen Proportionen dar z.B. Thorax, Kopf, Fuß etc.. Die einzelnen Segmente sind miteinander, teilweise auch gelenkig, verbunden [HWT77]. Während beim Menschen dies durch Elle, Knie Hals usw. realisiert wird, übernimmt in der Simulation eine Anzahl von Knoten diese Aufgabe. [FrN94]

Die Modellierung des Dummy wird in der Regel in fünf Schritten vorgenommen. Im Einzelnen sind dies:

### 1. Schritt

Spezifizierung der einzelnen Segmente mit den jeweils charakteristischen Maße und den Bewegungsmöglichkeiten in Bezug zu den angrenzenden Segmenten. Die Segmente lassen sich in Haupt- und Untersegmente unterteilen. Die Hauptsegmente sind:

- |               |                 |
|---------------|-----------------|
| - Kopf        | - Unterarme     |
| - Hals        | - Hände         |
| - Oberkörper  | - Oberschenkel  |
| - Unterkörper | - Unterschenkel |
| - Oberarme    | - Füße          |

Die Untersegmente sind:

- Wirbelsäule
- Schlüsselbein
- Brustbein und Rippen

Die Untersegmente sind hauptsächlich als Verbindungspunkte der einzelnen Gelenke zu sehen. Die Massen dieser Segmente sind jedoch nicht zu vernachlässigen und bei der Modellierung bei den Hauptsegmenten mit zu berücksichtigen.

### 2. Schritt

Anschließend sind nun die Bewegungsmöglichkeiten und deren Einschränkungen einzugrenzen und auf die Simulation zu übertragen. Dies geschieht am besten durch Festlegen der Freiheitsgrade.

- Drehgelenk	1 Drehfreiheitsgrad
- Translationsgelenk	1 Translationsfreiheitsgrad
- Flexible Verbindung	1 Translationsfreiheitsgrad

### 3. Schritt

Nun sind die geometrischen Parameter zu bestimmen. Als wichtigste Parameter sind die Position der einzelnen Segmente und deren Gelenke, die Orientierung der Gelenkkoordinatensysteme und die äußere Kontur der Körper festzulegen. All diese Parameter lassen sich von einem physikalischen Dummymodell bestimmen. Diese Messwerte werden in ein festgelegtes Koordinatensystem übertragen und addiert.

### 4. Schritt

Durch die Angabe der Kontaktflächen in Anzahl und Dichte und der Angabe der Stoßzahl wird nun die Oberflächenbeschaffenheit und die Energieaufnahmefähigkeit der Dummysegmente auf die Modellierung übertragen.

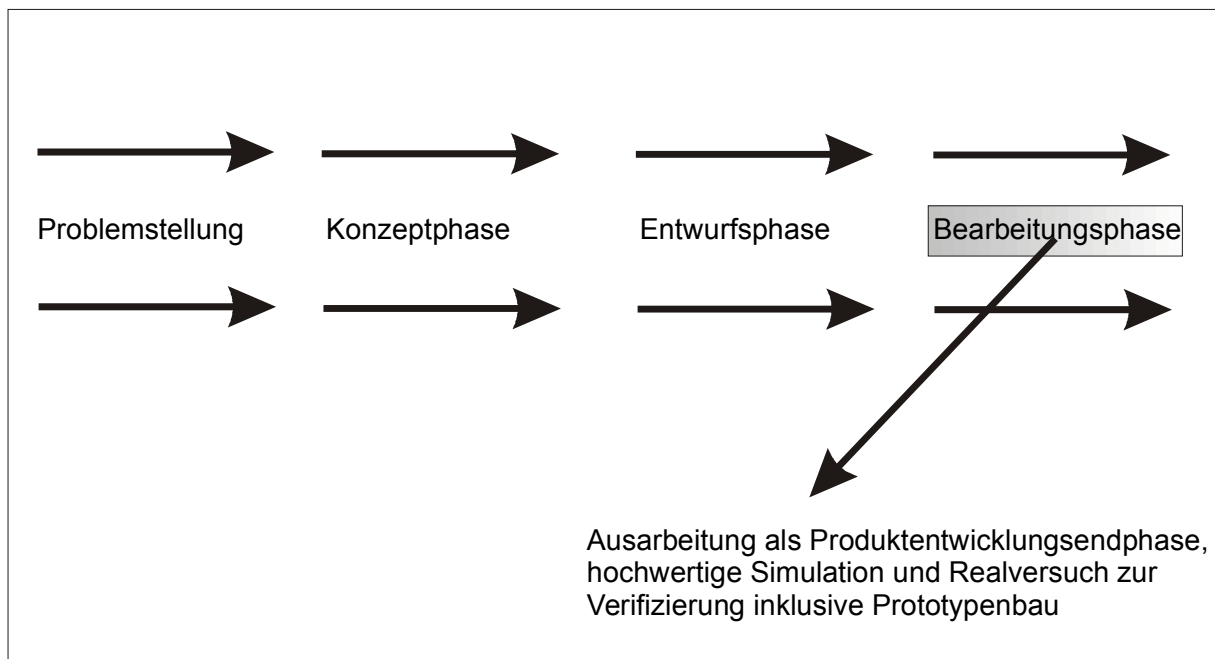
### 5. Schritt

Im letzten Schritt sind die Definition der Massen- und Flächenträgheitsmomente eines Realdummys zu definieren. Dies geschieht durch die Konturgebung der einzelnen Segmente sowie durch Angabe der jeweiligen Dichte.

Die zur Modellierung notwendigen Körperdimensionen sind der zahlreich vorhandenen medizinisch-anatomischen Fachliteratur [RaK87] sowie der Literatur für Biomechanik, die für hybride Anwendungsbereiche besonders geeignet ist, zu entnehmen und an das Verhältnis der Modellierungsgeometrie anzupassen. Dazu zählen die einzelnen Maße der Körperbauteile (Segmente) abhängig von Alter und Geschlecht, sowie die Abstände der einzelnen Gelenkpunkte zur Findung später noch festzulegender Restriktionen. Auch zwangsgekoppelte Bewegungen einzelner Segmente sind der Literatur zu entnehmen und in der späteren Modellierung zu berücksichtigen. [Bau89], [Bir77], [Dvo93], [Fal88], [FrL93] [Pau65]

## 5.4 Bearbeitungsphase

Den Abschluß der Konstruktion bildet die Bearbeitungsphase (Abb. 5.5). Mit dieser Produktentwicklungsendphase soll eine frühzeitige und ausreichend abgesicherte Bewertung der Produktqualität erlangt werden. Auf dieser Basis sollen gegenständliche Modelle der Konstruktion gefertigt werden, die von den Bauteilen her gesehen, denen der virtuellen Konstruktion bzw. Konzeption sehr ähnlich sind.



**Abb. 5.5** : Bearbeitungsphase

Dies ist sinnvoll, da trotz aller vorher getroffenen Maßnahmen Planungs- oder Konstruktionsfehler häufig erst bei der Inbetriebnahme eines Konstruktionsergebnisses festgestellt werden. Die Anwendung der Simulationstechnik besitzt für derartige Probleme noch nicht genügend Erfahrungswerte.

Die Konstruktion eines Prototypenmodells umfasst die folgenden drei Punkte:

- die Bestimmung der Modellbauteile,
- die Definition der Modellstruktur und
- die Ersatzdarstellung für die äußeren Einflüsse.

Bei der Bestimmung der Modellbauteile wird festgelegt, welche Komponenten im Modell vorkommen sollen und wie diese auszusehen haben. Eine Modellkomponente besteht daher aus dem Namen, den Eigenschaften und der Dynamik. Die Dynamik beschreibt hierbei, in welcher Art und Weise sich die Attribute im Laufe der Zeit ändern.

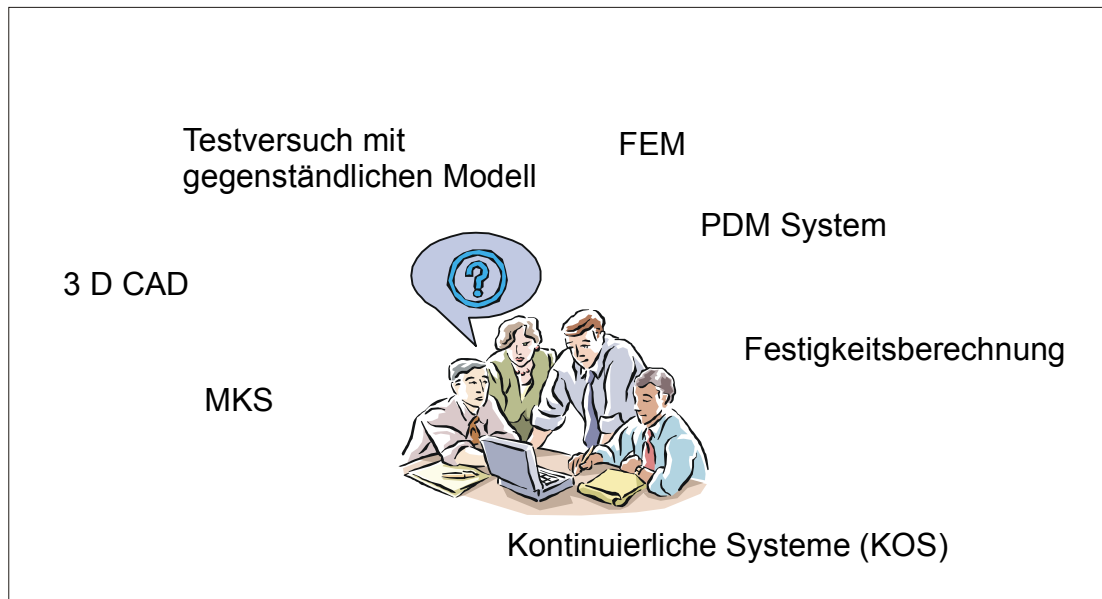
Die Modellstruktur dient zur Festlegung auf welche Art und Weise die einzelnen Bauteile miteinander harmonisieren oder voneinander abhängig sind. Die gegenseitige Beeinflussung ist dabei zu berücksichtigen.

In der realen Welt sind äußere Einflüsse von allen Seiten möglich, welche auch beim Real-Modell berücksichtigt werden müssen. Es reicht hierbei jedoch wenn man sich auf die Komponenten beschränkt, die den Hauptumsatz am stärksten beeinflussen können und für diese jeweils ein Ersatzsystem findet.

Die Genauigkeit der gewünschten Messergebnisse bestimmt die Anforderungen an die Modelle und damit wiederum die Auswahl der Erstellungsverfahren. Mit den Erstellungsverfahren ändert sich die Qualität. Für eine Buchse stellt sich beispielsweise die Frage, ob entsprechend der Qualitätsforderung ein Bohren, ein Fräsen oder ein Drehen erforderlich ist.

## **5.5 Wahl der geeigneten Simulationssoftware**

Zur Absicherung von Produkteigenschaften bei der Konstruktion stehen heute eine Vielzahl von Analysemethoden und Hilfsmittel aus den Bereichen Versuch, Berechnung und Simulation zur Verfügung. Diese einzelnen Methoden unterscheiden sich stark in der Ermittlung ihrer Ergebnisse und sind bezüglich ihrer Anwendung prinzipiell zweckgebunden. Liegt zum Beispiel das Hauptinteresse im Verhalten eines Funktionsträgers, so ist eine genaue Simulation oder ein Real-Test unumgänglich. Ist beispielsweise lediglich die Montagefreundlichkeit eines Produktes zu diskutieren, ist ein sogenanntes Umrissmodell, welches mit einem CAD-System erstellt wird, völlig ausreichend. Im letzten Fall ist diese Vorgehensweise schon deshalb vorzuziehen, da das gewünschte Ergebnis schnell gefertigt werden kann.



**Abb. 5.6** : Auswahl der geeigneten Software

Nachdem die Entscheidung für eine Methode getroffen worden ist (Abb. 5.6), wird der Modellbau im Falle eines Realversuchs bzw. die Modellierung im Falle einer Simulation den nächsten Schritt darstellen. Da diese Arbeit sich hauptsächlich mit biomechanisch/mechanischen, also einem hybriden dynamischen System beschäftigt, bei dem die Kräfteinflüsse von größter Bedeutung sind, fallen hier die CAD-Systeme als mögliche Strategie aus. So bleiben eigentlich nur noch die kontinuierlichen Systeme, die finiten Elemente und die Mehrkörpersysteme als engere Wahl übrig. Der gegenständliche Testversuch soll ebenfalls in den Hintergrund geschoben werden, da dieser immer funktioniert und in dieser Arbeit als Verifizierung für das angehängte Beispiel genutzt werden soll.

Die kontinuierlichen Systeme (KOS) finden ihre Anwendung, wenn das dynamische Verhalten bei einfachen, geometrischen Bauteilen betrachtet werden soll. Diese bestehen aus elastischen, massenbehafteten Körpern, auf die stetig verteilte Kräftevektoren wirken. Diese Vektoren miteinander kombiniert, führen auf partielle Differentialgleichungen, die in den wenigsten Fällen analytisch gelöst werden können. Die Lösung erfolgt meist mit Hilfe von Diskretisierungsverfahren, deren Basis numerisch ist. In der Praxis treten jedoch häufig Bauteile mit geometrisch komplizierten Umrissen auf, welche sehr komplizierte und damit häufig auch fehlerbehaftete Gleichungen zur Folge haben. Dadurch scheiden diese bei biomechanischen Problemen, deren geometrischen Abmessungen sehr aufwendig sind von vorne herein aus.

Bei der Finiten Elemente Methode (FEM) und bei der Methode der Mehrkörpersysteme (MKS) ist die Diskretisierung bereits in der Modellbildung enthalten. Bei der FEM treten die Eigenschaften Viskosität, Elastizität über das gesamte Element homogen verteilt auf. [Göt98] Zwar sind die Elemente geometrisch einfach, können aber zu einer geometrisch komplizierten Gesamtstruktur aneinander gereiht werden. Deren Anwendung ist nur bei minimalen Bewe-

ungen sinnvoll, da die Anzahl der berücksichtigten Freiheitsgrade sehr groß ist und die Rechendauer somit unakzeptabel wird. Sinnvoll ist die Anwendung jedoch bei nicht-linearen Problemen im Frequenzbereich oder statischen Problemfällen. Somit ist es erklärbar, dass das Hauptanwendungsgebiet der Finiten Elemente Methode in der Strukturuntersuchung liegt. Für biomechanische / mechanische / dynamische Problemstellungen bei großen nicht linearen Bewegungen kann diese Methode nicht als sinnvoll erachtet werden, da die innere Strukturuntersuchung nicht primär von Bedeutung ist.

Hinsichtlich der Anwendbarkeit, des Nutzens und der erzielbaren Ergebnisse zeigt die Abb. 5.7 einen Vergleich zwischen den Simulationstechniken FEM und MKS.

Finite-Elemente-Methode	Mehrkörpersysteme
Linearisierung im Arbeitspunkt	Erfassung von Nichtlinearitäten in <ul style="list-style-type: none"> <li>• Geometrie</li> <li>• Material</li> </ul>
Elastische Beschreibung der Teilstrukturen	Starrkörper-Idealisierung
Aussagefähig für hohe Frequenzen	Aussagefähig für niedrige bis mittlere Frequenzen
Analyse im Frequenzbereich	Analyse im Zeitbereich
Harmonische Anregungen	Beliebige Anregungen
Häufige Anwendung: Strukturanalyse	Häufige Anwendung: Analyse des Zusammenspiels verschiedener Massenpunkte

**Abb. 5.7:** Wesentliche Unterschiede MKS zu FEM

Bei der MKS-Methode werden Masse und Trägheit auf starre Körper zurückgeführt. Hierbei werden die Elastizität und die Viskosität masselosen Federn und Dämpfern zugeordnet. Die Kopplung aus beiden Zuordnungen lässt große Bewegungen zu. Die strukturdynamischen Eigenschaften bleiben dabei nahezu unberücksichtigt. Es gibt jedoch Sonderfälle, bei denen Ersatzsysteme, die neben den starren Mehrkörperelementen zusätzlich elastische Körper, die jedoch wieder eine einfache Geometrie aufweisen, zulassen.

Die mit Hilfe der aus MKS gewonnenen Belastungswerte können anschließend äußerst ideal mit Hilfe der FEM-Methode für das jeweilige Material die einzelnen Materialstärken ausgelegt werden. Mit Hilfe der vorgegebenen oder berechneten Belastungswerte sind die idealen Voraussetzungen für eine Strukturanalyse gegeben.

Betrachtet man nun die biomechanischen Forderungen aus Kapitel 4 sowie den hohen Anteil an Dynamik von hybriden Systemen, so ist die Nutzung von MKS-Systemen unumgänglich.

### **5.5.1 Auswahl des MKS-Systems**

Die MKS-Methode ist noch ein recht junges Forschungsgebiet. Aus diesem Grunde sind zur Zeit wenige Systeme auf dem Markt verfügbar. Die bekanntesten sind

- ADAMS
- DADS
- SIMPACK
- Working Model
- ProMechanica

Diese Systeme erlauben eine 2- bzw. 3-dimensionale Modellbildung. Dies geschieht bei einem Teil der Systeme durch eine grafische Benutzeroberfläche (GUI, Graphical User Interface), bei den übrigen durch Makrosprachen oder Hochspracheneingaben (z. B. FORTRAN, C).

Für die hier vorgelegte Arbeit bleibt nun zu prüfen, ob ein System mit 2D- oder 3D-Simulation zum Einsatz kommen soll. Da zum jetzigen Zeitpunkt noch keinerlei Erfahrungen im Bereich der Simulationstechnik von Mehrkörpersystemen in Bezug auf Biomechanik vorliegen, soll zunächst nur ein 2D-System zum Einsatz kommen, zumal bei den hier vorliegenden Belastungsbeispielen auf Grund der Symmetrie nur 2-dimensionale Belastungsfälle in Frage kommen. Aus diesem Grund wird für die Simulation das bei der Fakultät für Bauingenieurwesen der Ruhr-Universität-Bochum vorhandene MKS-Programm Working Model aus Kostengründen verwendet.

Working Model von der Firma Knowledge Revolution ist ein 2-D Mehrkörpersystem, welches eine sehr einfache Modellierung von Szenarien zulässt und sehr schnell Ergebnisse liefert, die allerdings auf den zweidimensionalen Raum beschränkt sind. Diese Software soll nun im Folgenden auf Beispiele angewendet werden, welche nahezu alle Problemfälle bei biomechanisch / mechanischen Systemen abdecken. Darüber hinaus soll beispielhaft auf die MKS-Modellierungstechnik eingegangen werden.

### **5.5.2 Vorgehensweise bei der Modellierung von Mehrkörpersystemen**

Wie bereits beim Vergleich (siehe oben) zwischen MKS und FEM festgestellt wurde, ist ein solches System nichts anderes als eine Ansammlung hierarchischer Einzelstarrkörper, die durch Kinematik- und Kraftkopplungen untereinander verbunden sind. Es entsteht zunächst ein Differentialgleichungssystem, dessen Größe, ähnlich wie bei den Finiten-Elementen, abhängig von den einzelnen Bauteilen und deren Freiheitsgraden ist. Während bei den FE-Systemen die Anzahl der Freiheitsgrade direkt proportional zu der Element- und Knotenanzahl ist, lassen sich diese beim MKS-System durch Ändern bzw. Festlegen der Randbedingungen (kinematische Zwangsbedingungen) drastisch reduzieren. Des weiteren



werden einzelne Gebilde zur rechentechnischen Vereinfachung auf Punktmassen reduziert. Um deren dynamisches Verhalten nicht zu vernachlässigen, wird die Geometrie zur Berücksichtigung des Drehträgheitsverhaltens weiterhin verwendet. Dadurch entsteht ein gemischtes Gleichungssystem von Differentialgleichungen und algebraischen Gleichungen (Differential Algebraic Equations, DAE). Die rechte Seite dieses Differentialgleichungssystems wird durch die Eingabe von äußeren Kräften bzw. Momenten beschrieben.

Da bei komplizierten Modellen schon allein die Aufstellung der Differentialgleichungen nicht trivial ist, wird diese Aufgabe heutzutage von MKS-Programmen durch die Eingabe über Benutzerschnittstellen übernommen. Das Modellieren geschieht durch verschiedene Techniken:

- Eingabe über eine grafische Benutzeroberfläche (Programmierung meist in C++)
- Befehlsreihenfolge einer Makrosprache (herstellerspezifisch)
- Einbindung von Hochsprachenprogramme (meistens FORTRAN oder C)

Die Methode, die am häufigsten in den professionellen MKS-Programmen verwendet wird, ist die Modellbildung über ein grafisches User-Interface, welche den Benutzeroberflächen der CAD-Programmen ähnlich ist [Stra00]. Hier stehen dem Modellierer Menüs zur Verfügung, die über die Menüleiste oder Buttons aufgerufen werden, mit denen er die unterschiedlichen MKS-Elemente wie Körper, Gelenke oder Kräfte eingibt. Der sukzessive Modellaufbau wird durch CAD-ähnliche Funktionen und durch zwei- bzw. dreidimensionale (je nach Programm) grafische Darstellungen unterstützt. Die Auswahl der Elemente erfolgt sehr komfortabel durch interaktives „Picken“ mit der Maus. Die Daten (z. B. Masse, Federsteifigkeiten, Orientierungen, etc.) werden in so genannte Formfills eingetragen.

Eine heute weniger verwendete Methode, ein MKS aufzubauen, ist der Einsatz von Makrosprachen. Diese Sprachen sind ein Relikt aus einer Zeit, als grafische Darstellungen auf Grund der einfachen Hardware nicht oder nur unter großem technischen Aufwand möglich waren. Trotz der Existenz hochwertiger grafischer Benutzeroberflächen wird für bestimmte Anwendungen (z. B. automatisch ablaufende Skripte für immer wieder kehrende Befehlsabfolgen) in der heutigen Zeit die Makrosprachentechnik sekundär eingesetzt. Makrosprachenbefehle folgen einer genauen Syntax (Schlüsselworte), werden Zeile für Zeile eingegeben und besitzen häufig nicht, wie z. B. die Hochsprachen, Möglichkeiten zur Schleifenprogrammierung oder Verzweigungen.

Beispiel einer Makrobefehlsabfolge zum Erzeugen eines Körpers:

```
>create body hugo
>BODY>mass 85.5
>BODY>inertiaxx 134.2
>BODY>done
```

Bei der Verwendung von Hochsprachen wie FORTRAN oder C ist der Benutzer angehalten, eine eigene Subroutine zu schreiben, die vom Hauptprogramm oder anderen Unterprogrammen aufgerufen wird. Hierbei ist lediglich auf die Liste der Übergabeparameter zu achten, die mit dem Aufruf (CALL Befehl) kompatibel sein muss.

Nach dem Modellaufbau hat der Benutzer nur noch wenige Interaktionsmöglichkeiten. Das Aufstellen der Bewegungsgleichungen sowie die anschließende numerische Lösung der Differentialgleichungen erfolgen vollkommen automatisch. Meistens ist es möglich, ein bestimmtes Lösungsverfahren einzustellen sowie Integrations- bzw. Lösungstoleranzen und eine maximale Zeitschrittweite zu setzen. Zur Lösung des Differentialgleichungssystems stehen Einschnitt- (z. B. Euler) und Mehrschritt-Verfahren (z. B. Runge-Kutta) zur Verfügung, welche für solche Differentialgleichungs-Löser typisch sind [Lav00].

Die Auswertung (Postprocessing) erfolgt meist im Zeitbereich mit Hilfe von xy-Kurven und Animationen. Mit diesen Werten lassen sich anschließend weitere Auswertungen wie z. B. eine Fast-Fourier-Transformationen durchführen.

Ein beispielhafter Modellaufbau mit Working Model und ähnlich aufgebauten MKS-Programmen wird im Folgenden dargestellt:

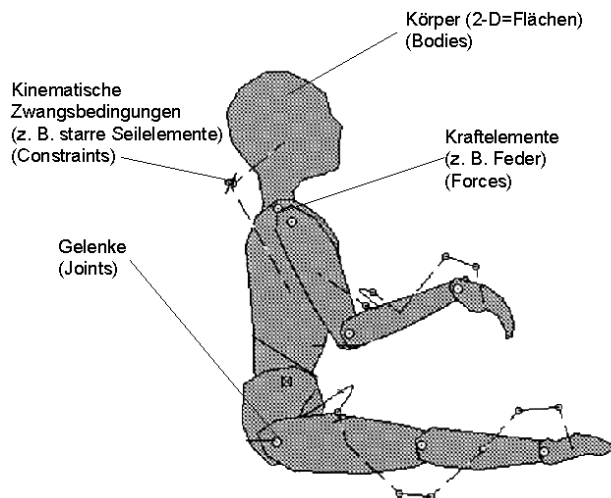
Um aus dem realen Dummy ein mechanisches Ersatzmodell zu generieren, muss man diesen in seine einzelnen Segmente, wie in Kapitel 5.3 beschrieben, spezifizieren. Jedes Segment wird als einzelner Starrkörper (Body) auf dem Modellierungsfenster platziert. Diesen Starrkörpern müssen physikalische Eigenschaften zugeordnet werden, wie z. B. die Zuordnung der Dichte. In diesem Fall wird die Masse sowie das Trägheitsmoment aus der gegebenen Geometrie berechnet. Andererseits kann die Masse und das Trägheitsmoment direkt eingegeben werden, wodurch die Funktion der Geometrie lediglich auf die Funktion der visuellen Darstellung reduziert wird. Dies geschieht sinngemäß mit allen anderen Körpern. Die Trägheitsachsen sind die Achsen eines lokalen Koordinatensystems im Schwerpunkt, welches ebenfalls definiert werden muss.

Nachdem alle Körper definiert sind, ist es nötig, die Kopplungselemente zu spezifizieren. Hierzu müssen die Körper an ihren Berührungsstellen geometrisch erfasst werden und die Art und Weise der Verbindung (Drehgelenke, Translationsgelenke, etc.) definiert werden. Dies geschieht durch Auswahl aus einer vom Programm festgelegten Element-Bibliothek. Intern führt das Programm an jeder Verbindungsstelle lokale Koordinatensysteme ein, die sowohl den geometrischen Verbindungspunkt (Ursprung des lokalen Koordinatensystems) als auch ggf. Orientierungen (z. B. beim Translationsgelenk) festlegen. Dies ist insbesondere beim Modellieren eines 3-dimensionalen Mehrkörpersystems wichtig, da die Anzahl der Freiheitsgrade pro Körper (6) größer und dadurch unüberschaubarer ist. Die Drehungen des lokalen Koordinatensystems werden durch Angabe eines Winkels (2-D) bzw. im dreidimensionalen System nach unterschiedlichen Methoden durchgeführt. Drei wichtige Methoden werden häufig in den kommerziellen Programmsystemen verwendet:

- Drehung um die lokale x-Achse, Drehung um die neue lokale y-Achse, Drehung um die neue lokale z-Achse
- 3-Punkt-Methode: 1. Punkt ist der Ursprung; die Strecke vom Ursprung zum 2. Punkt ergibt den Vektor für die lokale z-Achse; aus dem 3. Punkt ergibt sich die lokale x-Achse; die dritte Achse steht orthogonal zu den beiden anderen Achsen (kartesisches Koordinatensystem)
- Euler Parameter Methode: Diese Methode beruht auf der Tatsache, dass jedes Koordinatensystem im Raum durch genau eine Drehung um einen Vektor in ein anderes Koordinatensystem überführt werden kann. Dazu müssen lediglich der Ursprung des resultierenden Koordinatensystems, die Komponenten des Drehvektors und der Drehwinkel spezifiziert werden. Da diese Methode nur eine einzige mathematische Operation ist, verkürzt diese sehr effektiv die Rechenzeit.

Nach der Definition der Gelenke und den kinematischen Zwangsbedingungen (Joints und Constraints) werden die Kraftelemente (Forces) nach einer ähnlichen Systematik wie die Definition der lokalen Koordinatensysteme definiert. Die Orientierung bezieht sich auf die lokalen Achsen des für die Kräfte zusätzlich angelegten Koordinatensystems. Zusätzlich werden bei den Kräften noch weitere Daten wie Federsteifigkeiten, Dämpfungswerte oder konstante äußere Kräfte benötigt.

Abbildung 5.8 zeigt die Anwendung der oben beschriebenen Systematik auf die Biomechanik mit Hilfe von Working Model.



**Abb. 5.8:** Dummy Modellierung in Working Model<sup>TM</sup>

Zunächst wird das gesamte mechanische System (hier: Dummy) in seine einzelnen Elemente (gemäß Kapitel 5.3) aufgeteilt [Cak97]. Ein solches Element wird als Body bezeichnet. Die einzelnen Bodys sind an den durch die Biomechanik vorgegebenen Stellen durch Gelenke verbunden. Biomechanische Widerstandskräfte werden durch aufgelegte Drehfedern simuliert (Muskulatur). Hohe Widerstandskräfte, die in der Realität durch Sehnen gegeben sind, werden in der Simulation durch so genannte unendlich steife Seilelemente modelliert.

## 6 Anwendung des Konzeptes an Beispielen aus der Sicherheitstechnik

### 6.1 Erläuterung zur Auswahl der Beispiele

Wie schon am Anfang der Arbeit erwähnt, sollen an dieser Stelle der Arbeit Beispiele eingeführt werden, welche die bisher erarbeitete Vorgehensweise zur Integration von Simulation bei hybriden dynamischen Problemstellungen besser darstellt, idealisiert und als verwendbar deklariert. Darüber hinaus sollen diese Praxisanwendungen möglichst viele Argumente der Industrie, welche gegen die Verwendung von Simulationsintegration sprechen, aufgreifen und zumindest teilweise widerlegen.

Die gewählten Beispiele stammen aus der passiven Verkehrssicherheit. Das Forschungs- und Entwicklungsniveau in Sachen Verkehrs- und Unfallsicherheit ist zwar bereits wissenschaftlich und technisch hoch entwickelt, jedoch gerade im Bereich von Kindersicherheit gibt es dagegen erhebliche Rückstände. Dies liegt zum Einen daran, dass Jugendliche bzw. Kinder kommerziell gesehen keine so wichtige Käuferschicht darstellen und daher leider vernachlässigt werden und zum Anderen die Nutzungsdauer (Kurzlebigkeit) von Kindersicherheitstechnik durch das Körperwachstum nur eingeschränkt lang ist.

Zwar werden immer wieder neue Kindersitzmodelle auf den Markt gebracht, jedoch erweisen sich diese sich oftmals nur als „Designmodell“ und können daher den Sicherheitsansprüchen ungenügend gerecht werden. Dies wird auch durch Crash-Tests belegt, z. B. durch renommierte Prüfzentren wie DEKRA und TÜV . [LHF90], [Rom89]

Diese Defizite lassen sich damit begründen, dass konstruktive Neuerungen zur Verbesserung der Sicherheitstechnologie jeweils die kompletten Gestaltungsphasen der Konstruktionssystematik durchlaufen, als Prototyp hergestellt und mit aufwendigen Crash-Tests überprüft werden müssen. Das Herstellen der Prototypen und insbesondere die Überprüfung durch die Prüfzentren am Ende der „Bearbeitungsphase“ stellt natürlich für kleine Herstellunternehmen eine kostenintensive Belastung dar, die der Markt durch das immer noch nicht ausreichende Sicherheitsdenken der Kundschaft, wie Marktanalysen zeigen, nicht wieder hergibt.

Wie schon erläutert, ist der meist angewandte Restriktionswert, das Head-Injury-Criterion (HIC). Der Motor-Vehicle-Safety-Standard (MVSS) der USA schreibt vor, dass ein HIC-Wert von 1000 nicht überschritten werden darf. Zum besseren Verständnis sei hier noch einmal erwähnt, dass der HIC-Wert der Standardwert für das Maß der Kopfverletzung ist. Er berechnet sich zu Erinnerung wie folgt:

$$HIC = \left( \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} a_{res} dt \right)^{2,5} \cdot (t_2 - t_1)$$

$a_{res}$  = resultierende Kopfverzögerung

Für die Brust darf die maximale Verzögerung  $60\text{ g}$  ( $g = 9.81\text{ m/s}^2$ ) über die Dauer von  $3\text{ ms}$  betragen. Die Oberschenkelkraft darf  $10\text{ kN}$  als Maximalwert nicht überschreiten. Allein an der Einheit dieses Wertes ist die Wichtigkeit des Zeitfaktors und der damit verbundene dynamische Anspruch erkennbar. Darüber hinaus ist die Halskraft ein Maß für ein hohes Verletzungsrisiko. Gerade bei kleinen Kindern, welche von der Masse ein sehr großes Kopf-/Rumpfverhältnis aufweisen, bildet diese Stelle einen biomechanischen Schwachpunkt. [Stü81], [WMD97]

Bei den hier gewählten Beispielen ist außerdem zu bemerken, dass auch ECE geprüfte Kinderrückhaltesysteme (KRS) im Test diese HIC-Werte oftmals bei weitem überschreiten. Das liegt daran, dass die bisherigen Forderungen für ECE-Prüfungen reine Belastungskriterien waren und somit HIC-Schutzkriterien nicht berücksichtigen. [Pre99] Sowohl bei der Betrachtung des HIC-Wertes, als auch bei der Berechnung der Halskraft, welche in Folge von Massenträgheit entsteht, kann unweigerlich festgestellt werden, dass hohe Beschleunigungen die Ursache für unerwünscht hohe Belastungswerte sind.

Um die Grenzen der Simulation voll auszuschöpfen, werden an die ausgewählten Beispiele zwei Hauptforderungen gestellt, die bei der Anwendung der Simulation unbedingt zu berücksichtigen sind:

- deutliche Reduzierung der Halskraft
- deutliche Reduzierung der Kopfbeschleunigung

Wenn die Hauptforderung Reduzierung der Halskräfte und Kopfbeschleunigungen nicht gelingt, sind die Kräfte in eine andere Ebene zu verlagern um so eine unkritische Krafteinleitung zu erlangen. Als Lösung werden daher zwei unterschiedliche Beispiele vorgeschlagen und auch durch Konstruktion, Versuch und Simulation realisiert, von denen angenommen werden kann, dass diese das Verletzungsrisiko verringern. Hierbei soll durch die Simulation die Anzahl der Versuche deutlich reduziert werden, damit die anschließenden Realtests lediglich zur Verifizierung der Simulation benötigt werden.

Bei den gewählten Beispielen für den Bereich der Kindersicherheit handelt es sich um

- ein Gurtstraffsystem (GSS) und
- ein Pendelrückhaltesystem (PRS).

### **Für beide Beispiel-Systeme gilt**

An der Ruhr-Universität Bochum hat der Verfassers u.a. in einer theoretischen Arbeit mit dem Titel „Optimierung der Montagemöglichkeiten von Kinderrückhaltesystemen in serienmäßigen Personenkraftwagen“ [LiS95] auf der Basis der in Kap. 5. definierten Konstruktionsphasen Problemstellung, Konzept, Entwurf- und Bearbeitung ein Pendelrückhaltesystem

konzipiert und in Form von Konstruktions- und Fertigungsunterlagen ausgearbeitet. Mit dem Ergebnis dieser Vorarbeit wurden im Rahmen dieser Arbeit für beide Beispiele je eine softwaretechnische Modellierung mit Hilfe eines CAD-Systems vorgenommen, anschließend eine Simulation mit Hilfe des Systems Working Model durchgeführt, die wiederum durch den Bau eines Prototypen mit anschließendem Versuch auf einem Prüfstand abgeschlossen worden ist.

Wegen der Ähnlichkeit der Vorgehensweise sollen die Details bezüglich der Anwendung der Konstruktionssystematik (vgl. Abb. 6.4 – 6.6) und der Durchführung der Simulation beispielhaft nur an dem Beispiel Gurtstraffsystem aufgezeigt werden. Die erzielten Ergebnisse werden allerdings für beide Systeme wiedergegeben.

## 6.2 Konstruktion und Simulation des Gurtstraffsystem

Nach Meinung einiger Experten ist es sehr sinnvoll, ein Kinderrückhaltesystem mechanisch so fest wie möglich mit der Karosserie des Pkws zu verbinden. Dieses wird inzwischen bei den aktuellen Modellen durch das sogenannte ISOFIX-System [FFR97] verwirklicht. Dieses System ist eine Art Bajonettverschluss, der ein KRS direkt mit der Fahrzeugkarosserie verankert. Allerdings sind die Experten der Meinung, dass durch die vorhandenen Gurtlose für die jeweils gesicherte Person ein sogenannter Crash/Zeitversatz (Doppel-Ruck-Effekt) entsteht und so die Dämpfung der Knautschzone eines Pkws nur teilweise genutzt wird. [HJV93], [HoR97]

Im Übrigen gibt es keine Nachrüstversion dieser Lösung für ältere Fahrzeugmodelle wegen der erhöhten Nachrüstkosten. Die Kosten werden durch das nachträgliche Einschweißen von formsteifen Aufnahmepunkten oder sogenannten Verankerungsgeweißen verursacht, die ähnlich wie bei den Anhängerkupplungen von PKW's typenindividuell konstruiert werden müssen.

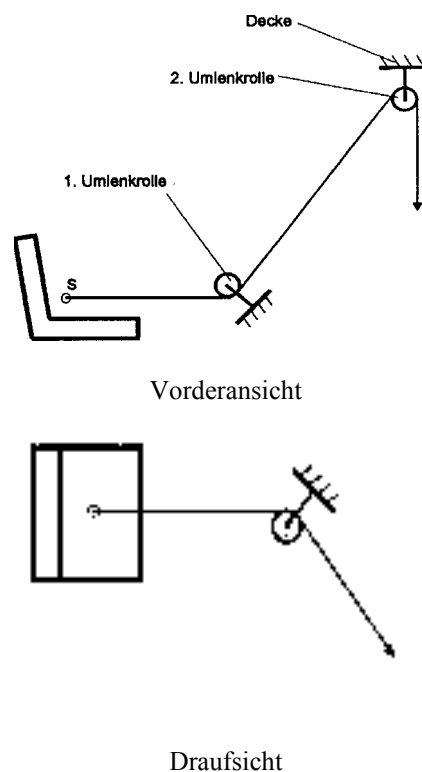
Aus verschiedenen Konstruktionsvorschlägen wurden eine sogenannte Gurtratsche als gurtstraffendes System ausgewählt. Durch dieses System gehen die Gurtlose gegen Null, da der Kindersitz in die Polsterung des Pkws gedrückt wird.

### 6.2.1 Versuchsaufbau der Gurtratsche

Eine „Gurtratsche“ gleicht den Modellen, wie sie bei der Befestigung von Gepäckgut und LKW-Planen verwendet wird. Die Grundüberlegung, ein Gurtstraffsystem vernünftig zu analysieren, war die experimentelle Gegenüberstellung eines Systems mit und ohne Straffer. Damit eine allgemeingültige Aussage gemacht werden konnte, sind mehrere Versuche mit verschiedenen KRS durchgeführt worden.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurden zwei handelsübliche Kindersitze (Befestigung durch 3-Punkt-Gurt des Pkws und vorhandenen 4-Punkt-Gurt zur Sicherung des

Kindes) im Versuch verwendet. Die Montage erfolgte auf der Rücksitzbank eines Audi 90 mit Automatikgurten. Den dazugehörigen Versuchsaufbau zeigt die Abb. 6.1.



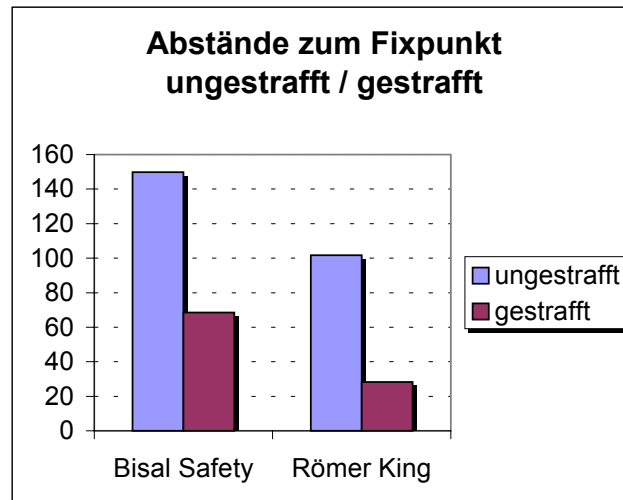
**Abb. 6.1** : Versuchsaufbau

Die Gurtstraffung wurde durch eine LKW-Ladespannvorrichtung erzeugt. Da die Kraft und der mechanische Impuls auf den im PKW montierten Kindersitz horizontal am Schwerpunkt angreifend wirken sollte, eingeleitet mit Hilfe eines Seils, musste eine spezielle „Umlenkrollenkonstruktion“ geschaffen werden. Da im PKW-Innenraum in dieser Höhe keine geeignete Stelle vorhanden war, ist eine Vorrichtung konstruiert worden, welche mittels Umlenkrollen und gleichzeitiger Verankerung in dem formstifen Bereich der vorderen Sitzschienen einen definierten Impuls auf den Sitz aufbringen konnte.

Der Sitz wurde mittels Gewichten (bis zu 120 kg) belastet, wobei festgestellt wurde, dass die Gurtlose weniger von dem Gewicht abhängt, sondern eher vom mechanischen Impuls. Da auch bei verschiedenen großen Impulsen kaum Veränderungen zu erwarten war, wurde die Größenordnung  $50 \text{ kg m / s}$  als Prüfgröße festgesetzt. Der Impuls selbst wurde durch Fallenlassen eines bestimmten Gewichtes aus einer definierten Höhe ausgelöst. Im unbelasteten Zustand wurden Messpunkte am PKW und am Sitz festgelegt, um in der Versuchsauswertung die Veränderung dieser Position zu messen.

Die Versuche führten gemäß Abb. 6.2 zu den folgenden Ergebnissen für die Gurtlose die als Randbedingung für die spätere Simulation dient. Die Ergebnisse wurden aus jeweils drei Messreihen gemittelt und zwar sowohl gestrafft als auch ungestrafft:



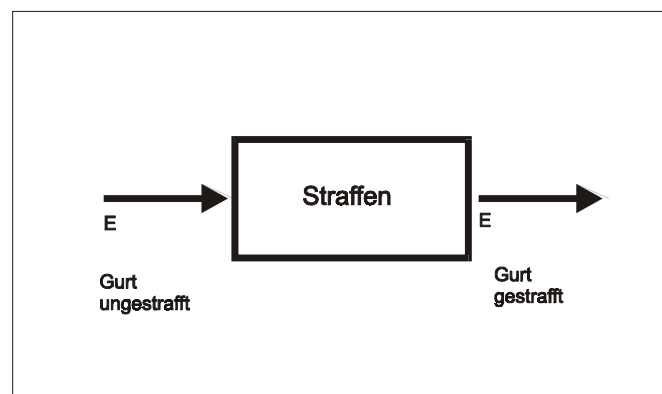


**Abb. 6.2** : Messergebnisse

Das Ergebnis dieses Versuches spricht für sich. Gerade in dem Messpunkt, der sich in Höhe der gefährdesten Stelle des Kindes, nämlich der Kopflage, befindet, ist eine Verbesserung der Gurtlose bis zu über 70 % erreicht worden. Dies sind jedoch nur statische Werte, die keinerlei Aussagen über dynamische Belastungen machen. Die gewonnenen Messwerte sind aber äußerst wichtige Grundwerte zur Restriktionsbildung, um später Schnittstellen zur Simulation zu gewinnen.

### 6.2.2 Analyse des Konzeptes Gurtstraffer als Abstrahierung für die Simulation

Wie das Beispiel im Sinne der Konstruktionssystematik aussieht, zeigt die Abb. 6.3. Interessant hierbei ist, dass der eigentliche Wunsch, nämlich die Kopfbeschleunigung zu reduzieren, ein Nebeneffekt und somit ein sogenannter Nebenumsatz ist.

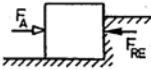
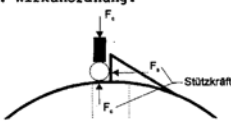
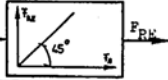
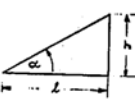
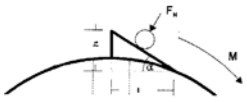


**Abb. 6.3** : Black-Box-Modell

Diese Tatsache fällt jedoch erst bei der Analyse auf. Der Hauptsatz hierbei ist Energie (E). Der Haltegurt wird von dem ungestrafften Energiezustand in den gestrafften Energiezustand überführt. Die Umsetzung findet bei den bisherigen Modellen auf verschiedene Art und Weise statt, die im Rahmen der Analyse der Konstruktionssystematik als *Technisch-physikalische-Effekte* (TpE) bezeichnet werden. Diese werden nun nachfolgend dargestellt und erläutert.

Die TPE sind der Fachliteratur entnommen [Sei92]. Die Aufteilung der TPE erfolgt in den drei gewohnten Spalten:

- Spalte 1: Nennung des physikalischen Bereichs (z. B. Mechanik, Elektrotechnik, etc.)
- Spalte 2: Zuordnung des physikalischen Phänomens (Naturgesetz)
- Spalte 3: Definition des eigentlichen TpE, so wie er in der bestimmten Konstruktion genutzt wird (z.B. Wirkanordnung, Gleichungen, Kennlinien, etc.).

phys. Bereich	phys. Phänomen	Technisch Physikalischer Effekt (TPE)
Mechanik	Undurchdringlichkeit fester Körper (Stützkraft)  $F_A = F_{RE}$	1. Wirkanordnung:  2. Gleichungen: $F_A = F_{RE}$ $l_1 = l_2$ 3. Black Box: (Kennliniendarstellung) 
Mechanik	Schiefe Ebene:  $\frac{h}{l} = \tan \alpha$	Wirkanordnung: 

- Undurchdringlichkeit fester Körper: Direkte mechanische Übertragung von Kräften ohne zeitliche Verluste und mechanische Übersetzung; hier vorhanden in der Gurtkraft, Sperrbolzen der Ratsche, Griff der Ratsche
- Schiefe Ebene: Umsetzung eines Drehimpulses in vektoriell gerichtete mechanische Energie

**Abb. 6.4** : TPE für die Kraftübertragung [Sei92]

- Feder (Hooke'sches Gesetz):  
 Problemloseste Methode zur Speicherung potentieller Energie; Anwendung hier als Sperrkraft für den Ratschenbolzen

phys. Bereich	phys. Phänomen	Technisch Physikalischer Effekt (TPE)
	$\Sigma T = 0$ $T = F \cdot r$	2. Gleichungen: $\Sigma T = 0$ $T_1 = F_1 \cdot r_m$ $F_1 = \frac{T_1}{r_m}$
		3. Black Box (Kennlinien-darstellung) 
Mechanik	Hooke'sches Gesetz  $F_C = F_0 + c \cdot \Delta x$	1. Wirkanordnung  2. Gleichungen $F_C = F_0 + c \cdot \Delta x$ 3. Kennlinie 

Abb. 6.5 : TPE zur Energiespeicherung [Sei92]

phys. Bereich	phys. Phänomen	Technisch Physikalischer Effekt (TPE)
Mechanik	Balken (einfach drehbar gelagert)  $F_1 \cdot l_1 = F_2 \cdot l_2$ $\frac{F_1}{F_2} = \frac{l_2}{l_1}$	1. Wirkanordnung:  2. Gleichungen: $F_2 \cdot l_2 = F_1 \cdot l_1$ $F_2 = F_1 \cdot \frac{l_1}{l_2}$
		3. Black Box: (Kennlinien-darstellung) 
Mechanik	Momentengleichgewicht an einer Kreisscheibe 	1. Wirkanordnung: 

Abb. 6.6 : TPE für die Gurtstraffung [Sei92]

- Drehbar gelagerter Balken:  
Einfachste Variante eines Getriebes, mit einer geringen Handkraft kann später eine hohe Zugkraft des Gurtes erzielt werden (Gurtstraffung)
- Momentengleichgewicht an einer Kreisscheibe:  
Übertragung des drehbar gelagerten Balkens auf eine Kreisscheibe (bzw. Zylinder in 3-D), wird benötigt zur Übertragung der Handhebelkraft in eine übersetzte, rotierende Bewegung (Spuleffekt)

Die TpEs zeigen, dass einfache, mechanische Lösungen der einfachste Weg zu einer kompakten Bauform sind. Eine grobe mechanische Fertigung erweist sich als völlig ausreichend und zweckerfüllend und ist daher für die Simulation am einfachsten zu modellieren. Ein weiterer Vorteil der mechanischen Abstrahierung ist der, dass kleine Änderungen in der Simulation, von denen eine Verbesserung erwartet wird, schnell in das reale Produkt umgesetzt werden können.

Auf der Grundlage dieser Erkenntnisse wurde das Ratschenprinzip als geeignetes Konzept für die Straffung eines Gurtes gewählt und dies dürfte den gewünschten Effekt der Gurtlosenreduzierung und damit die Herabsetzung der Kopfbeschleunigung als Nebenumsatz haben.

Es besteht prinzipiell nur aus einem Hebel, welcher eine Handkraft in eine übersetzte Rotationsbewegung umsetzt und mit Hilfe einer Welle einen Gurt spulen kann. Als Hemmung dient eine bestimmte Anzahl Zahnflanken, die auf die Welle aufgebracht wurden. Diese sind auf der einen Seite als schiefe Ebene ausgebildet und auf der anderen Seite als Null-Grad-Flanke konzipiert. Auf diesen Zahnflanken tastet ein Stift, der mit Hilfe einer Feder auf die Welle gepresst wird, die Kontur ab. Er wird bis zum Ende der schiefen Ebene entgegen der Federkraft angehoben, um dann in die durch die Null-Grad-Flanke entstehende Nut zu rutschen. So wird ein rückwärtiges Drehen stufenbehafet gehemmt.

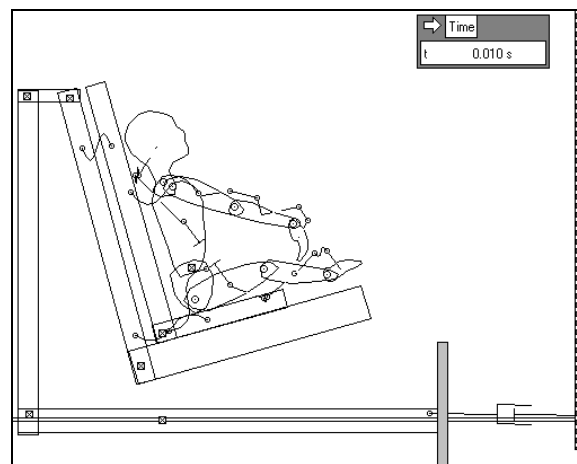
Aufwendigere Konstruktionen sind auch denkbar, z. B. eine elektrisch angetriebene Version mit einem nachgeschalteten Getriebe. Doch ist spätestens hier der Nachrüstgedanke erschöpft. Die Gurtstraffung soll nur eine preiswerte Ergänzung vorhandener gurtgesicherter KRS sein und wird niemals die Qualität moderner festverankerter Kindersitze (zum Beispiel ISO-Fix) erreichen. Das Preis/Leistungsverhältnis rechtfertigt daher keine aufwendige Lösung.

### **6.2.3 2D-Simulation für den Gurtstraffer**

Die Durchführung des im vorherigen Abschnitts beschriebenen Praxisversuches diente zur Bestimmung der Gurtlosen. Mit Hilfe der erzielten Ergebnisse für die Gurtlose aus den Messreihen, die für eine Adaption auf Rechnermodelle von höchster Notwendigkeit sind, kann nun die 2D-Simulation durchgeführt werden. Mit den zwei Datensätzen für eine ungestraffte und eine gestraffte Version pro Sitz lässt sich nun ein Schlittenversuch zur Unterstüt-

zung der Konzept- und Entwurfsphase mit Bestimmung der Hals-Wirbelsäulen-Kräfte simulieren.

Dazu wird zunächst ein Szenario mit Hilfe des Editors von Working Model™ aufgebaut, in das ein abstrahiertes Dummymodell implementiert wird (vgl. [Abb. 6.7](#)). Dieser sogenannte Simulations-Dummy besteht aus 9 Festkörpern, welche die einzelnen Körperteile simulieren. Diese sind, ähnlich wie beim menschlichen Körper, gelenkig verbunden und vor „Überbewegungen“ durch Separator- und Seilelemente, welche den Muskulatur- und Sehnenzügen entsprechen, geschützt.



**Abb. 6.7:** Working Model Szenario „mechanischer Gurtstraffer“

Das Szenario besteht aus einer starren Konstruktion, welche die Rückbank eines Pkws darstellt und auf einer Linearführung geführt ist. Die Konstruktion bewegt sich mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 13.89 m/s (50 km/h) und wird gegen einen Dämpfer „gefahren“, der die Knautschzone eines Personenkraftwagens simuliert [CKP95].

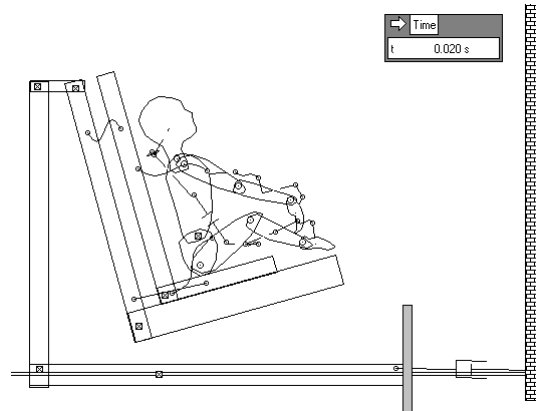
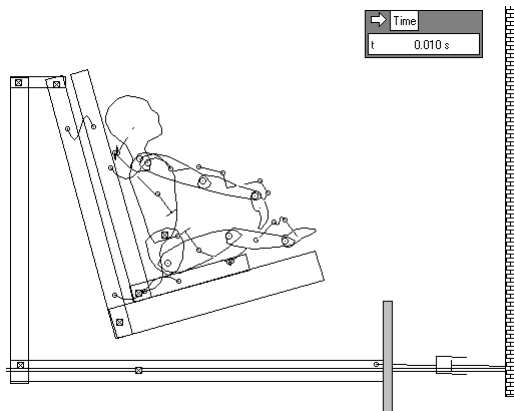
Dies ist an dieser Stelle besonders wichtig, da der Gurtstraffer gerade den Vorteil nutzen soll, einen möglichst geringen Zeitversatz zum Kollisionszeitpunkt zu bieten und auf diese Art und Weise das Kind einem gedämpften Stoß auszusetzen. Wäre die Gurtlose sehr groß, wäre der Zeitraum der Dämpfung längst überschritten und die meist sehr aufwendig konstruierte Knautschzone könnte nicht genutzt werden. Das heißt, der PKW wäre schon längst im Stillstand, während das Kind sich noch in Bewegung befindet.

Für die Durchführung eines Vergleichs wird der Kindersitz je nach Versuchstyp mit gestrafften PKW-Haltegurten (verringerte Gurtlose) und ungestrafften Gurten (Normalfall) auf der Rückbank montiert. Die Zwischenschritte der einzelnen Bilder der Simulation werden auf  $t = 0,001 \text{ s} = 1 \text{ ms}$  festgelegt. Die momentane Zeit, die Gelenkkraft am Hals sowie die Bewegungen des Kindersitzes werden in Diagrammform graphisch und numerisch während der Simulation Online ausgegeben.

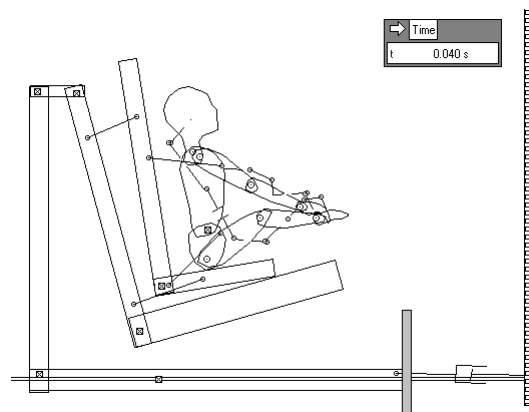
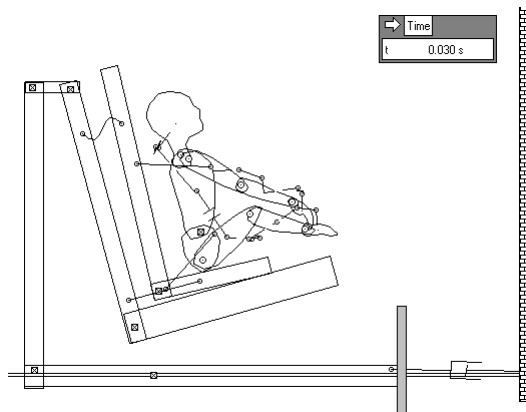
Die durch die Simulation erzielten Ergebnisse werden wie folgt wiedergegeben: Wegen der Übersichtlichkeit wird allerdings unter Berücksichtigung der kritischen Situationen nur ca. jedes 10. Bild dargestellt. Nach den Szenario-Bildern folgen die Komponenten der Halskräfte

in Diagrammform in bezug auf das Weltkoordinatensystem  $x, y$ , da sich das System Working Model ebenfalls auf dieses Koordinatensystem bezieht. Die Darstellung erfolgt zunächst für den Zustand der ungestrafften Haltegurte (Kap. 6.2.4) und anschließend als Verbesserungsvorschlag für den Zustand der gestrafften Haltegurte (Kap. 6.2.5).

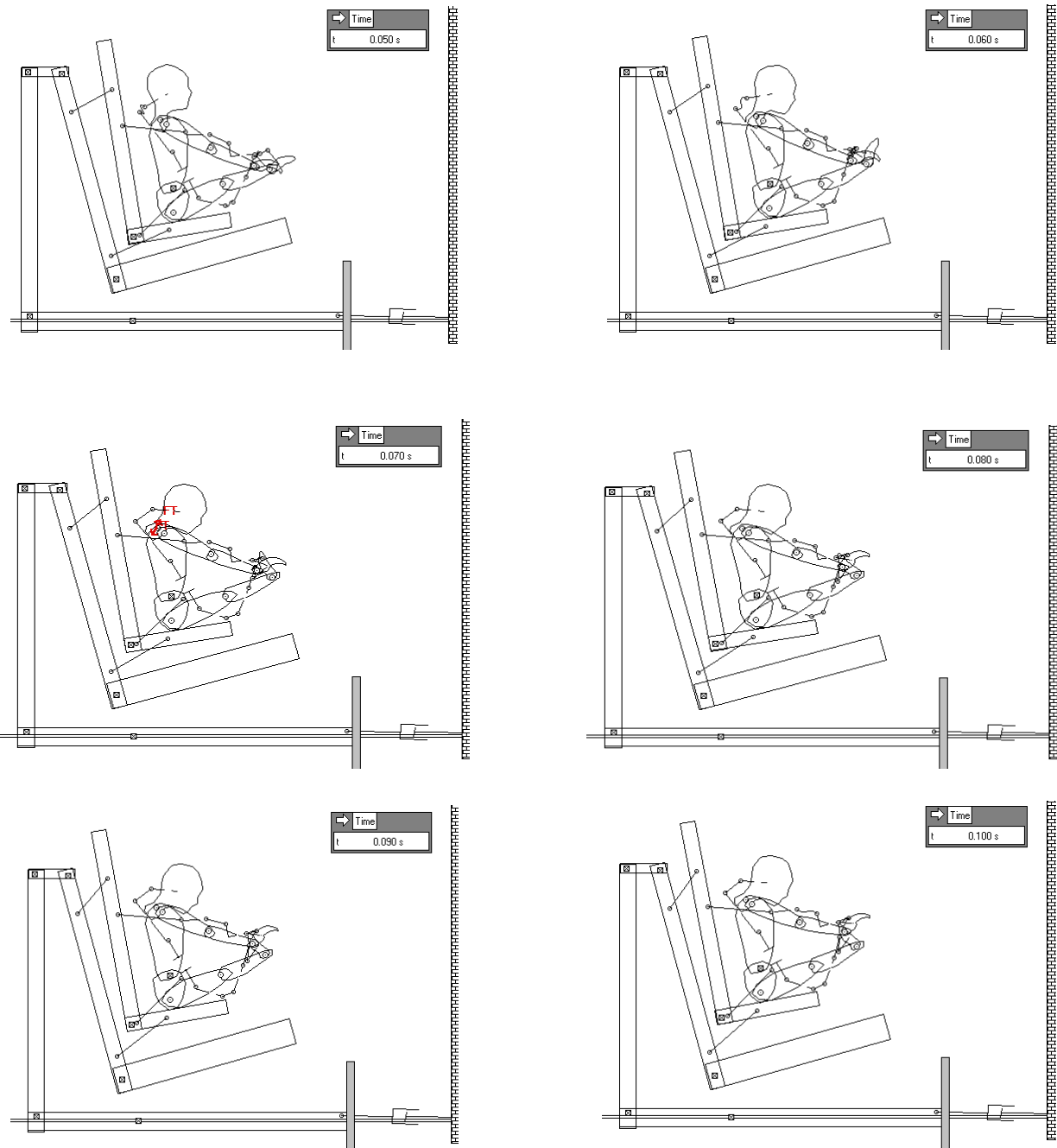
### 6.2.4 Simulation eines Crashes ohne zusätzliche Gurtstraffung



Zeit: 0,01 s		Zeit: 0,02 s
Kompletter Schlitten in Bewegung, Schlitten, PKW-Rückbank, Kindersitz und Dummy haben die gleiche Geschwindigkeit → keine äußeren Kräfteinflüsse auf irgendeinen „Szenario-Baustein“		Schlitten wird durch Anstoß an ein gedämpftes System verzögert, Dummy und Kindersitz haben bedingt durch die Gurtlose volle Geschwindigkeit



Zeit: 0,03 s		Zeit: 0,04 s
Gurtlose des Kindersitzes sind gestrafft, geringe Kräfte wirken auf den Körper des Dummys ein <b>Abb. 6.8</b> : Crash-Simulation „Ungestraffte Haltegurte I“		Sowohl Gurtlose des Kindersitzes als auch Gurtlose der PKW-Rücksitzbank gestrafft – bedingt durch die Trägheit des Dummykörpers entstehen Gurtkräfte, die den trägen Dummy belasten



**Zeit: 0,05 s**

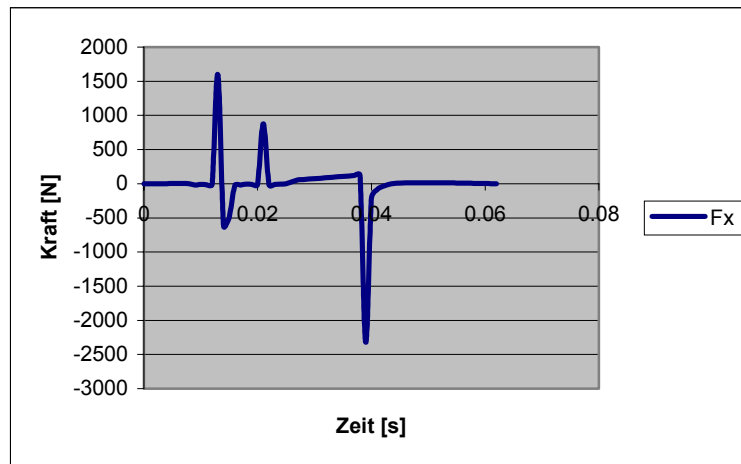
Hohe Differenzgeschwindigkeit von Dummy-Rumpf und übrigen „Szenario-Bauteilen“

**Abb. 6.9** : Crash-Simulation „Ungestraffte Haltegurte II“

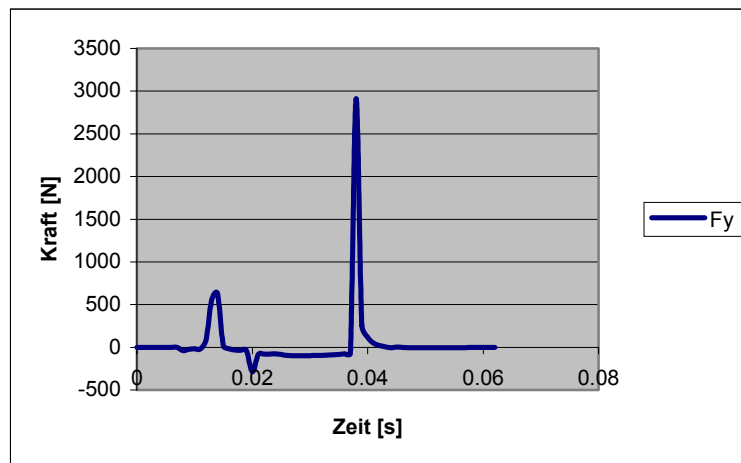
**Zeit: 0,10 s**

Bedingt durch die Trägheit, Vorverlagern aller beweglichen Körperteile in die ursprüngliche Bewegungsrichtung, hohe Scher- und Längskräfte im Halsbereich sowie hohe Gurtkräfte im Bereich der Brust und Becken des Dummies

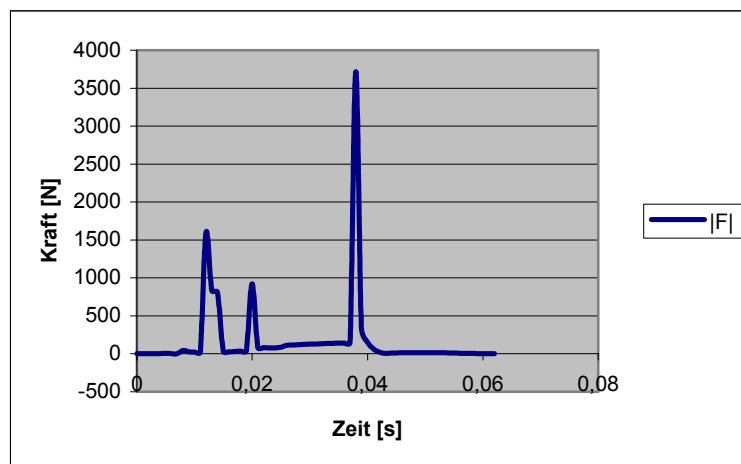




**Abb. 6.10** : Vektorielle simulierte Halskraft in Fahrtrichtung (globale x-Richtung)



**Abb. 6.11** : Vektorielle simulierte Halskraft in vertikaler Richtung (y-Richtung, senkrecht zur Fahrtrichtung)

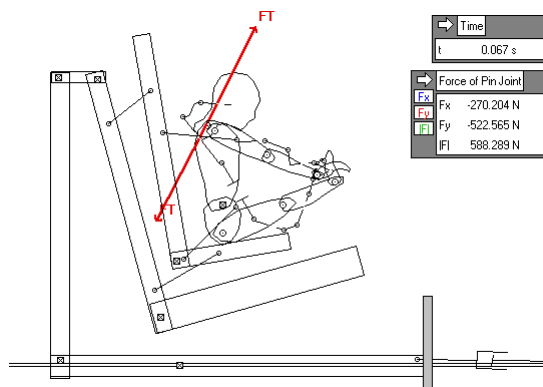


**Abb. 6.12** : Halskraftverlauf (Betrag) während der Aufprallphase

Die Abb. 6.10 und 6.11 zeigen als Ergebnis der Simulation den qualitativen Verlauf der Halskräfte in x- bzw. in y-Richtung und die Abb. 6.12 den Betrag der Belastung während der Aufprallphase. Die Aussage *qualitativ* muß deshalb benutzt werden, da zwar die richtigen Körper-Proportionen und Trägheiten bei der Generierung verwendet worden sind und das Working Model-System diese auch berechnen kann, aber bei relativ hohen Massen und damit verbundenen Kräften die Ergebnisse nicht anschaulich darzustellen.

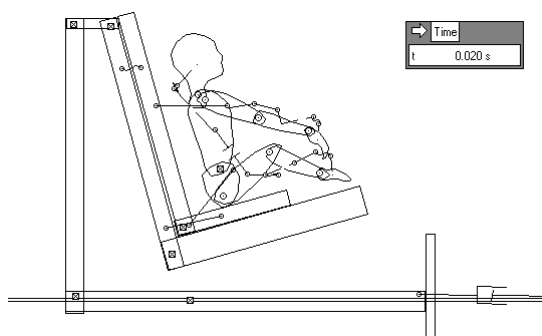
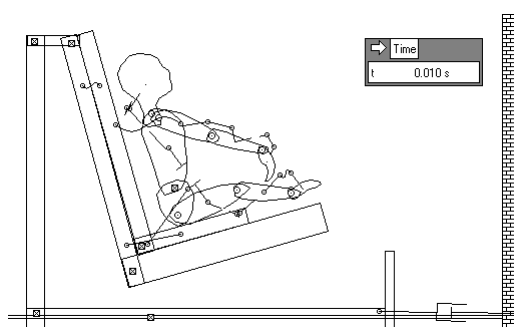
Aus allen Bildern des Szenarios lässt sich die kritische Situation herausfiltern. Diese stellt sich in dem Szenario-Bild bei einer Zeit von 0,067 s dar.

- Stärkste Belastung während der Aufprallphase
- Sämtliche Gurtlosen der einzelnen Komponenten gestrafft, sowohl Gurtlose Kindersitz als auch Gurtlose 3-Punkt-Gurt des PKW

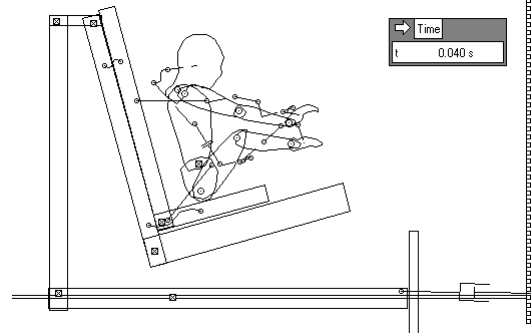
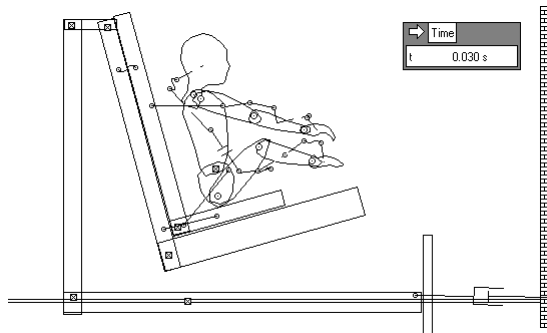


**Abb. 6.13** : Crash Simulation „Kritische Situation“ bei 0,067 s

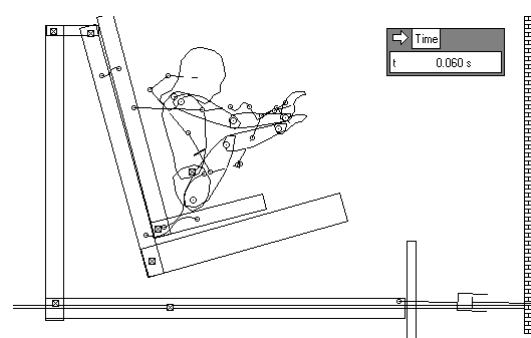
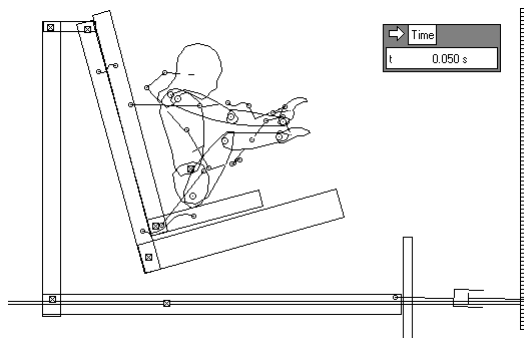
**6.2.5 Simulation mit gestrafftem PKW-Hauptgurt**



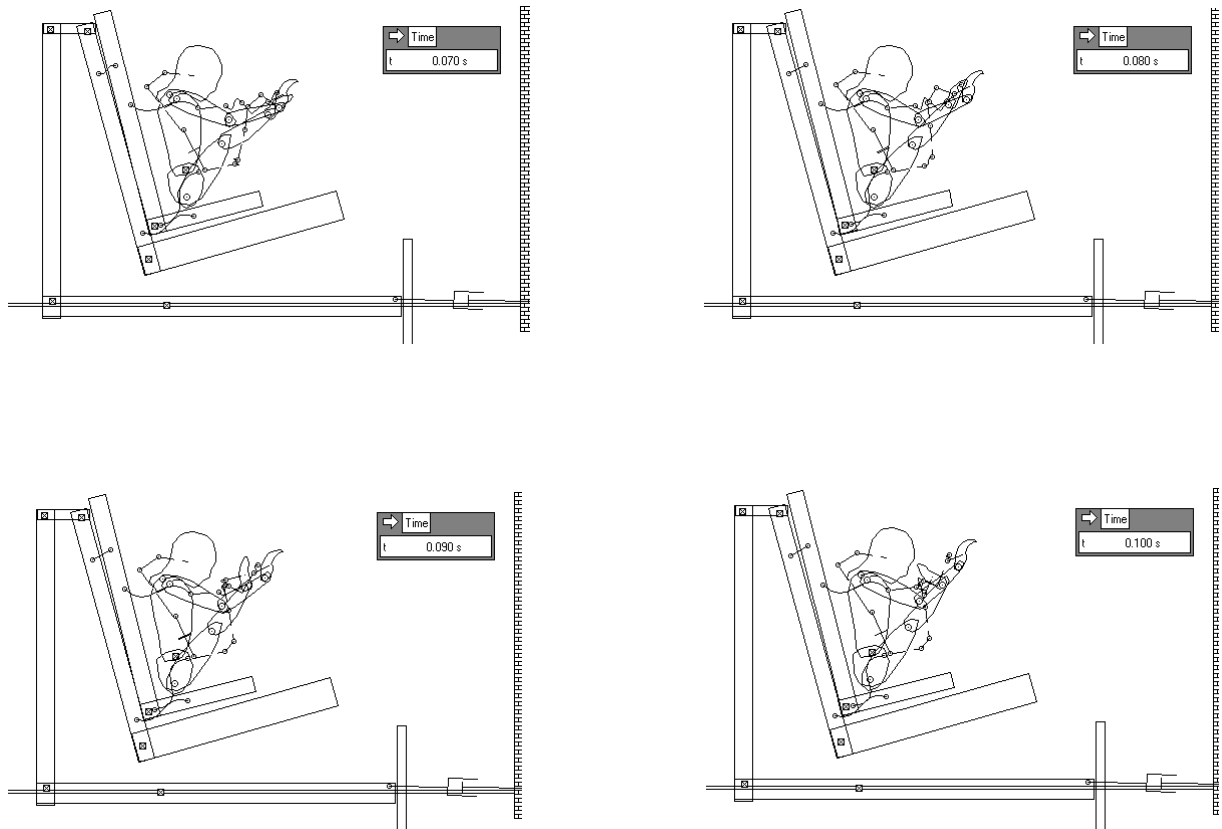
Zeit: 0,01s		Zeit: 0,02 s
<p>Kompletter Schlitten in Bewegung, Schlitten, PKW-Rückbank, Kindersitz und Dummy haben die gleiche Geschwindigkeit → keine äußeren Kräfteinflüsse auf irgendeinen „Szenario-Baustein“</p> <p><b>Abb. 6.14</b> : Crash Simulation „Gestraffte Haltegurte I“</p>		<p>Schlitten wird durch Anstoß an ein gedämpftes System verzögert, Dummy und Kindersitz haben bedingt durch die Gurtlose volle Geschwindigkeit</p>



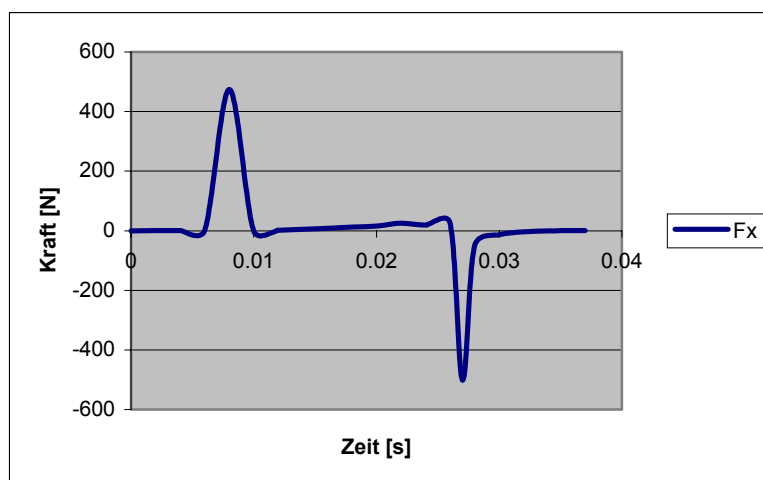
<p><b>Zeit: 0,03 s</b></p>		<p><b>Zeit: 0,04 s</b></p>
<p>Bereits hier Straffung sämtlicher Gurtlosen → Dummy wird mit verzögert noch bevor die Dämpfung am Anschlag ist → geringere Differenzgeschwindigkeit → geringere Trägheitskräfte</p> <p><b>Abb. 6.15</b> : Crash Simulation „Gestrafte Haltegurte II“</p>		<p>siehe links</p>



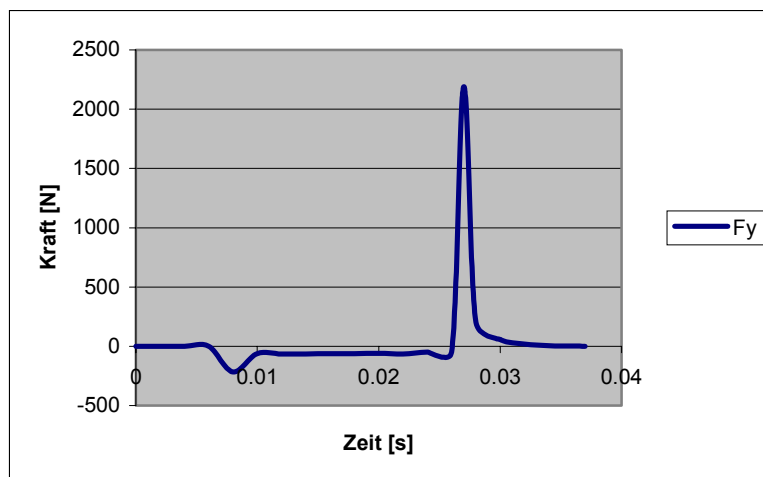
<p><b>Zeit: 0,05 s</b></p>		<p><b>Zeit: 0,06 s</b></p>
<p>Auch hier Vorverlagerung sämtlicher bewegter Teile mit entsprechender Kräftebeaufschlagung, jedoch sämtliche Bewegungen weniger extrem und kräftebelastet.</p> <p><b>Abb. 6.16</b> : Crash Simulation „Gestrafte Haltegurte III“</p>		<p>siehe links</p>



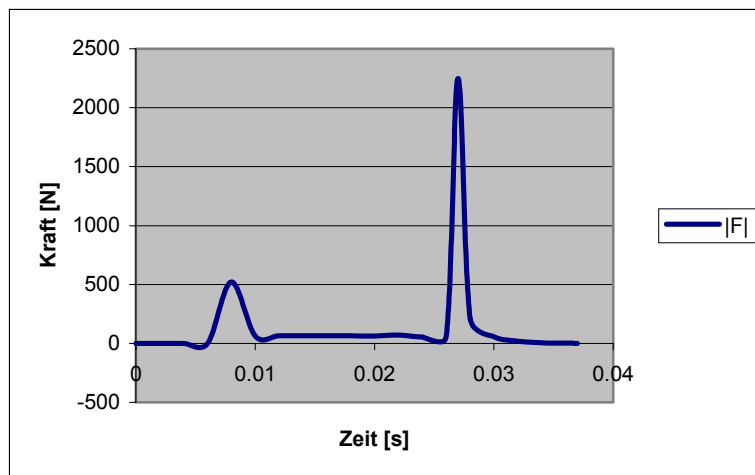
<b>Zeit: 0,07 s – 0,10 s</b>		
siehe Abbildung 6.16		
<b>Abb. 6.17:</b> Crash Simulation „Gestrafte Haltegurte IV“		



**Abb. 6.18** : Simulierte vektorielle Halskraft in Fahrtrichtung (globale x-Richtung),  
Reduzierung der vektoriiellen Kraft um min. 25 %



**Abb. 6.19** : Simulierte senkrechte Halskraft in Fahrtrichtung (globale y-Richtung),  
Reduzierung der Kraft um ca. 60 %

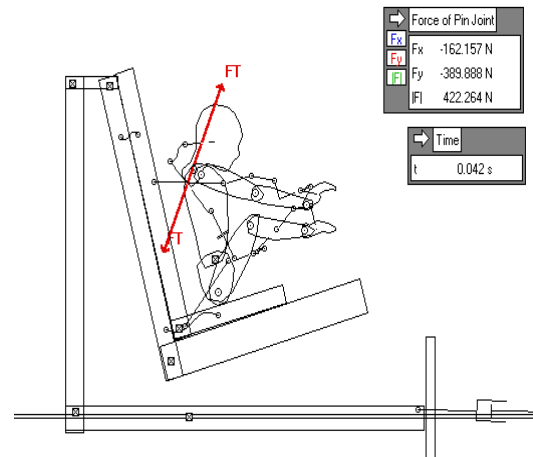


**Abb. 6.20** : Halskraftverlauf (Betrag) während der Aufprallphase,  
Reduzierung der Gesamtkraft um ca. 30 % durch Straffen

Der simulierte Halskraftverlauf (Abb. 6.18 – Abb. 6.20) zeigt eine deutliche Reduzierung der Halskraft in einen unkritischen Bereich. Die Peaks sind wesentlich „glatter“. Das Gurtstraffen bedeutet für den Insassen eines Kinderrückhaltesystems bei gleichen Aufprallrandbedingungen somit ein deutlich reduziertes Verletzungsrisiko.

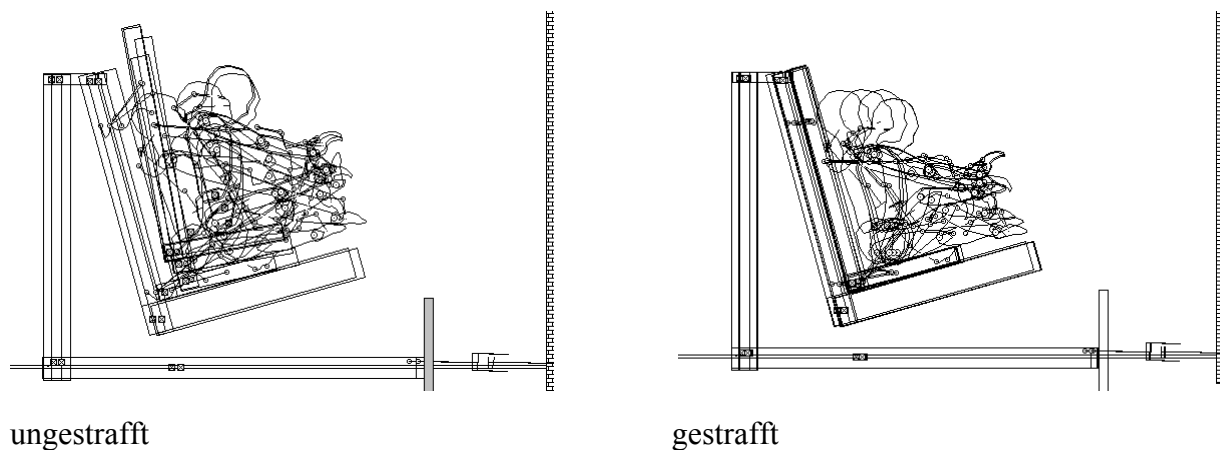
Die kritische Situation stellte sich in dem Szenario-Bild bei einer Zeit von 0,042 s dar. Stärkste Belastung beim Aufprall mit sichtlich erkennbar kürzeren Kraftpfeilen zur ungestrafften Version.

**Abb. 6.21** : Crash Simulation „Kritische Situation“ bei 0,042 s



### 6.2.6 Auswertung mittels Spurbilder

Zum direkten Vergleich des ungestrafften / gestrafften Gurtes sind an dieser Stelle einzelne Spurbilder beider Versuchsabläufe überlagert dargestellt.



**Abb. 6.22** : Vergleich der Crash Simulationen „ungestrafte / gestraffte Haltegurte“

Eindeutig nimmt der Körper des Dummies wesentlich früher an der Dämpfung teil und wird so geringeren Kräften ausgesetzt. Der Gesamtbewegung der einzelnen Bauteile des Szenarios widerfahren viel geringere Differenzgeschwindigkeiten, wie die Spurbilder zeigen. Durch die geringeren Differenzgeschwindigkeiten kommt es zu wesentlich geringeren Gesamtbelastungen (Impulssatz) des Dummies bzw. der in der Praxis zu schützenden Person.

## 6.3 Konstruktion und Simulation des Pendelrückhaltesystem

Bei diesem Konstruktionsvorschlag handelt es sich um ein als physikalisches Pendel aufgehängtes Kinderrückhaltesystem. Dieses System soll den bei Kindern besonders stark gefährdeten Kopf-/Hals-Bereich entlasten. Durch die Pendelbewegung wird der HWS-Bereich nur in der horizontalen Lage, die als weniger problematisch gilt, belastet.

Mit Hilfe des 2-D Mehrkörpersystems Working Model wurde diese Konstruktion ebenfalls simuliert, wobei deutlich veränderte Belastungswerte im Vergleich zu der starren Version ermittelt wurden. Um diese jedoch besser vergleichen zu können, ist zunächst durch das ständig wechselnde Koordinatensystem eine Transformation in ein raumfestes System nötig. Dazu wird bei der Auswertung von Simulationssoftware und ihrer Anwendung üblicherweise die Koordinatentransformation [BeK95] verwendet.

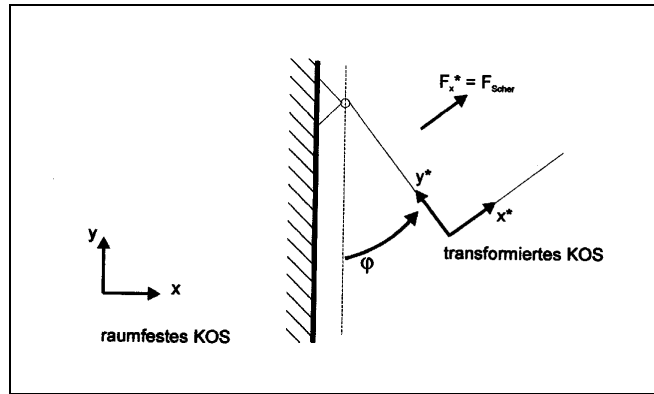
### 6.3.1 *Koordinatentransformation als notwendiges Hilfsmittel zur Datenauswertung*

Die in der Simulation des Pendelrückhaltesystem ermittelten Werte lassen sich direkt als Scherkräfte bezeichnen, da diese sich auf ein raumfestes Koordinatensystem  $(x, y)$  beziehen. Hier muß eine Möglichkeit geschaffen werden, dass sich die Ergebnisse auf ein Koordinatensystem beziehen, welches mit dem Sitz rotiert. Das heißt, aus den Koordinaten  $x, y$  eines Punktes müssen die Koordinaten  $x^*, y^*$  dieses Punktes in Bezug auf das neue System berechnet werden. Diese Umrechnung von Koordinaten geschieht mit Hilfe der Koordinatentransformation. Hier müssen drei Fälle unterschieden werden:

- Translation
- Drehung (Rotation)
- Kombination aus Translation und Rotation

Streng genommen handelt es sich hier um eine Kombination aus Translation und Rotation (Fall 3). Da aber nur die Beträge von Vektoren (Kräfte) und keine Raumpositionen betrachtet werden und diese auf einer Achse parallel verschieben werden können, ist es zulässig das Koordinatensystem mit einer einfachen Drehung (Fall 2) zu transformieren.

Im Working Model werden die berechneten Vektoren immer auf das raumfeste Koordinatensystem bezogen. Um nun die besonders gefährliche Halscherkraft abzuschätzen, werden die errechneten Kräfte auf das transformierte kartesische Koordinatensystem  $x^*$ ,  $y^*$  (Abb. 6.23) bezogen, dessen  $y^*$ -Achse mit der Längsachse des Kindes zusammenfällt.



**Abb. 6.23** : Koordinatentransformation Pendelrückhaltesysteme

Die Scherkraftkomponente der Halskraft ist dann näherungsweise mit der Kraftkomponente in  $x^*$ -Richtung ( $F_{x^*}$ ) gleichzusetzen. Die Koordinaten eines beliebigen Punktes in der Ebene transformieren sich dann nach den folgenden Gleichungen:

$$x = a_{11} x^* + a_{12} y^* \Leftrightarrow x^* = a_{11} x + a_{21} y$$

$$y = a_{21} x^* + a_{22} y^* \Leftrightarrow y^* = a_{12} x + a_{22} y$$

mit:

$$a_{11} = \cos(\varphi) \quad a_{12} = \cos(\varphi + 90^\circ) = -\sin(\varphi)$$

$$x^* = \cos(\varphi) x + \sin(\varphi) y$$

$$a_{21} = \cos(90^\circ - \varphi) = \sin(\varphi) \quad a_{22} = \cos(\varphi)$$

$$y^* = -\sin(\varphi) x + \cos(\varphi) y$$

ergeben sich für die Kräfte  $F_{x^*}$  und  $F_{y^*}$  folgende Gleichungen:

$$F_{x^*} = F_S = F_x \cos(\varphi) + F_y \sin(\varphi)$$

$$F_{y^*} = F_L = -F_x \sin(\varphi) + F_y \cos(\varphi)$$

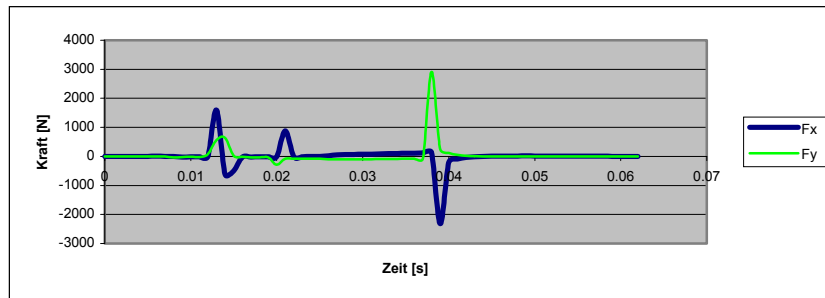
bzw.

$$\begin{pmatrix} F_{x^*} \\ F_{y^*} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi \\ -\sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix}$$

Aus dieser Transformation folgen nun die genaueren Scher- und Längskräfte der Halswirbelsäule. Die exakten Werte der Transformation mit den ursprünglichen Werten sind im Anhang dieser Arbeit zu finden.

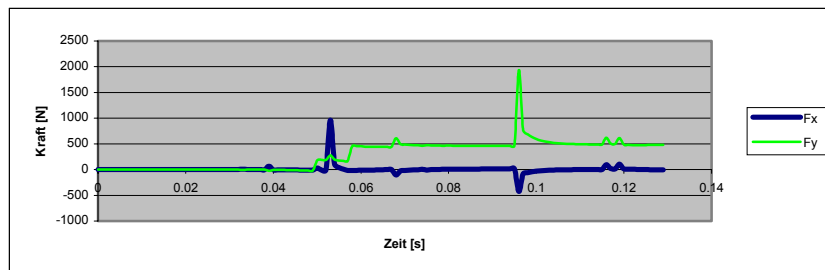


Beim Vergleich von  $F_x$  und  $F_{x^*}$  fällt auf, dass die Werte durch die Transformation deutlich realistischer sind, aber die gleiche Tendenz wie die auf das globale Koordinatensystem bezogenen Kräfte aufweisen (siehe [Abb. 6.24](#)) und damit die Innovation dieser Aufhängung nach wie vor bestätigt.



**Abb. 6.24** : Zeitlicher Verlauf der Kräfte  $F_x$  und  $F_y$  starres System

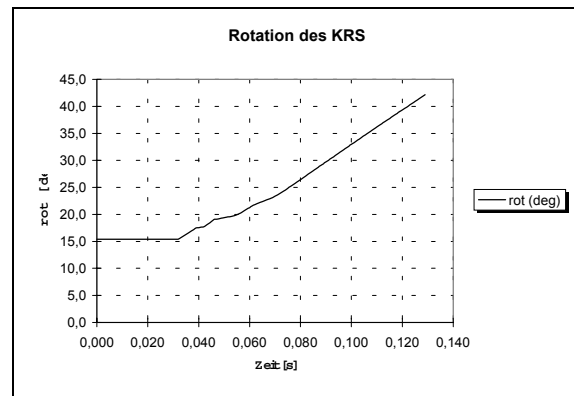
Obwohl beim starren System keine Drehung erfolgt, ist es sinnvoll eine Transformation durchzuführen, da die Rücklehnen im PKW ebenfalls nicht senkrecht sind. Durch diesen kleinen Winkel (ca.  $15^\circ$ , Audi 90) ist eine kleine Abweichung zur Senkrechten gegeben ([Abb. 6.25](#)), die der Vollständigkeit halber berücksichtigt werden sollte.



**Abb. 6.25** : Zeitlicher Verlauf der Kräfte  $F_x$  und  $F_y$  gelenkiges System

Beim gelenkig gelagerten Kindersitz ist die Abweichung der untransformierten Scherkräfte im Vergleich zu den transformierten natürlich am Anfang der Bewegung sehr gering, da erst bei größeren Rotationswinkeln die Verdrehung des transformierten Koordinatensystems stärker ins Gewicht fällt. Dieser Ablauf der Rotation in Abhängigkeit mit der Zeit ist in dem nachfolgenden Diagramm ([Abb. 6.26](#)) aufgezeichnet.

Nach dem Aufprall wird der Kindersitz in eine Rotationsbewegung versetzt, die zunächst von der Winkelgeschwindigkeitsänderung nicht-linear ist. Der Grund hierfür ist die zunächst nicht stabile Situation, z. B. sind die Gurte nicht gleichmäßig gestrafft und der Einfluss der „Störfaktoren“ wie Reibung an der Sitzfläche ist nicht zu vernachlässigen.



**Abb. 6.26 :** Rotation des Pendelrückhaltesystems

Am Ende der Gurtlosen bei  $t \approx 0,06$  s (Gurte gestrafft) führt das physikalische Pendel eine annähernd lineare Drehbewegung mit der konstanten Winkelgeschwindigkeit von  $\omega \approx 300$  °/s aus.

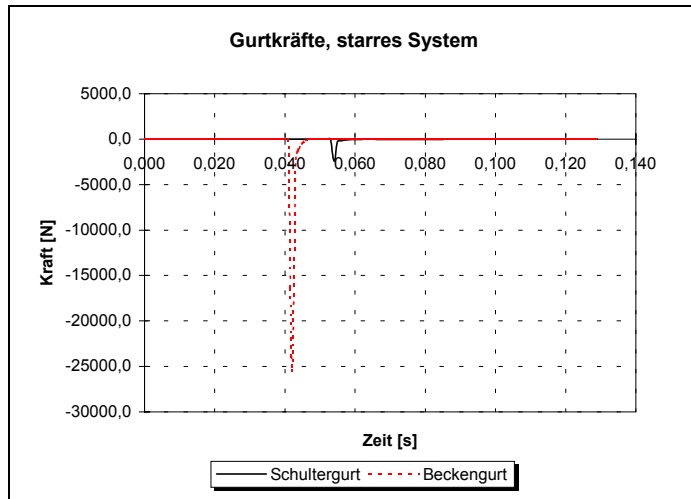
### 6.3.2 Untersuchungen der Haltegurtkräfte des KRS

Obwohl die überwiegend von Haltegurten verursachten abdominellen Verletzungen und die Beckenverletzungen mit 13,9 % aller auftretenden Verletzungen an dritter Stelle (Kopfverletzungen 60,4 %, HWS-Verletzungen 15,3 %, [LaH89]) der am häufigsten betroffenen Körperregionen stehen, sollten sie nicht völlig ignoriert werden. Nach statistischen Untersuchungen des HUK-Verbandes weisen diese Bereiche bei Front- und Heckkollisionen jedoch schwere und schwerste Verletzungen von AIS 2<sup>1</sup> oder größer auf.

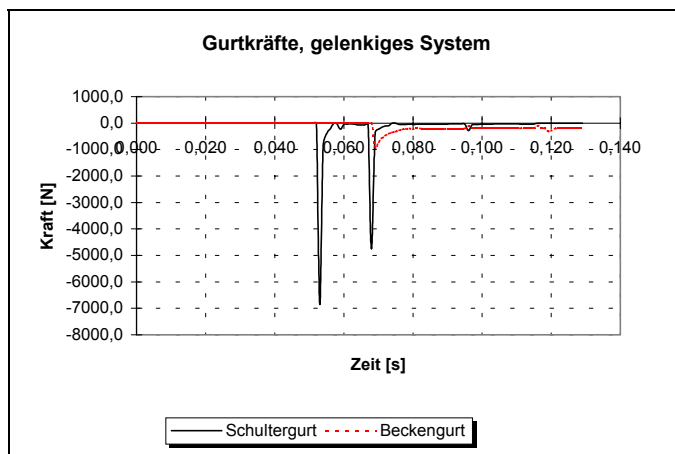
Im einzelnen traten in den untersuchten Fällen bei gesicherten Kindern Nierenprellungen (AIS 2), Leber- (AIS 6) und Nierenrisse (AIS 4) auf.

<sup>1</sup> Der AIS (Abbreviated Injury Scale) dient zur Einordnung und zum Vergleich realer Verletzungen.

AIS 2 = mäßig verletzt, AIS 3 = ernsthaft verletzt, AIS 4 = gefährlich verletzt, AIS 5 = kritisch verletzt, AIS 6 = maximal verletzt



**Abb. 6.26** : Gurtkräfte, starres System  
lässigbar klein).

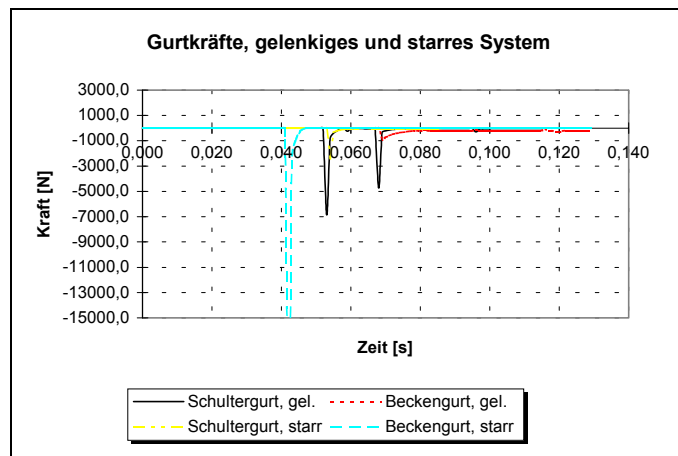


**Abb. 6.27** : Gurtkräfte, gelenkiges System

Aus all diesen Gründen darf eine detaillierte Auswertung der Gurtkräfte für die Verbesserungsvorschläge nicht vernachlässigt werden.

Mit Hilfe von Working Model<sup>TM</sup> ist es möglich, die Gurtkräfte zu bestimmen, indem die Gurte selbst als mechanisches Seilelement betrachtet und definiert werden (Abb. 6.26). Da PKW-Gurte eine sehr hohe Tragkraft haben, kann deren Dehnung im Verhältnis zu der sehr großen Gurtlose, vernachlässigt werden ( $\epsilon$  vernach-

Die maximalen Ausschläge des starren und gelenkigen Systems sind zeitlich und in Art und Weise sehr ähnlich (Abb. 6.27 u. 6.28), jedoch die Beträge der Kräfte haben sich beim PRS deutlich reduziert. Dies entspricht einer Verbesserung von über 70 %.



**Abb. 6.28 :** Vergleich Gurtkräfte: starres, gelenkiges System

Die analytische Auswertung dieser Zahlen mit medizintechnischen Tabellen führt zu der Schlussfolgerung, dass die durch die Haltegurte verursachten abdominalen Schäden bis zu ca. 4 % reduziert werden können.

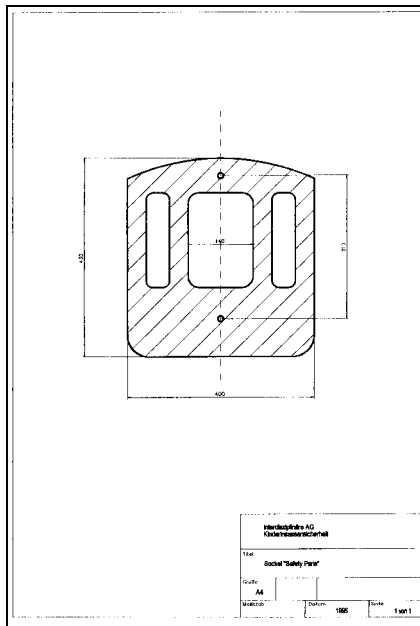
## 6.4 Herstellung von Prototypen

Da die beiden gewählten Beispiele Gurtstraffer und Pendelrückhaltesystem zum einen biomechanisch/ dynamisch hybrid sind, zum anderen aus der Verkehrssicherheit stammen und darüber hinaus die Konstruktion eines Testschlittens die derzeitigen finanziellen und materiellen Möglichkeiten der AG „Kinderrückhaltesysteme“ bei weitem überschreiten würde, wurde das Prüflabor der DEKRA AG in Dresden um Hilfe gebeten [TrN97]. Die DEKRA AG war auf Grund ihrer Aufklärungsaktion „Kindersitze find’ ich spitze!“ dazu bereit, die Prüfanlage mit ihrem Testschlitten dem Verfasser dieser Arbeit kurzfristig zu überlassen. Bedingung jedoch war eine gute Versuchsvorbereitung mit vorgefertigten Prüfobjekten und mitgebrachten Materialien.

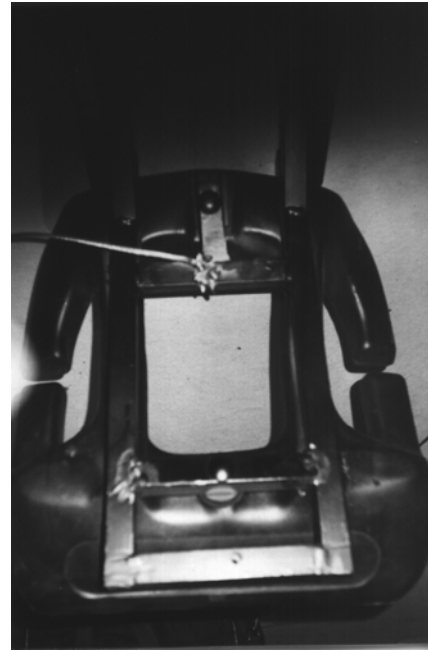
Vor der Durchführung des Realversuchs zur Verifizierung der rechnergestützten Entwicklung und der Simulation (Kap. 7.5) musste zunächst ein Pendelrückhaltesystem (Kap. 7.4.1) und ein praxisgerechter Gurtstraffer (Kap. 7.4.2) konstruiert und hergestellt werden.

### 6.4.1 Fertigung des Pendelrückhaltesystem

Zur Konstruktion des Pendelrückhaltesystems wird der Kindersitz „Safety Paris“, ein Auslaufmodell der Firma Osann, Gottmadingen, benutzt und gemäß des konstruktionssystematischen Modells des PRS adaptiert. Als erstes wird der Grundsockel des Kinderrückhaltesystems (KRS) von der Sitzschale entfernt und die einzelnen Befestigungspunkte geometrisch vermessen und konstruktiv erfasst. Entsprechend dieser geometrischen Vorgaben ist es nun möglich, ein Grundgestell zu fertigen, an dem ein Gelenk befestigt werden kann.



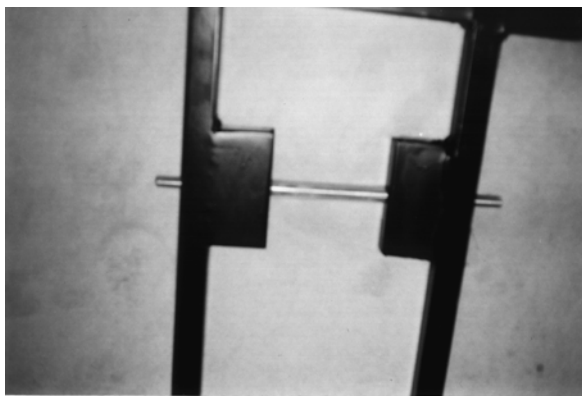
**Abb. 6.29** : Sockel der Sitzschale für Kinderrückhaltesysteme



**Abb. 6.30** : Sockel der Sitzschale für Kinderrückhaltesysteme

Die Konstruktion selber wird durch Punkt- und Nahtschweißungen gefertigt. Darauf wird ein Aufbaugesstell adaptiert, welches an die Originalverschraubungspunkte des ursprünglichen Montagesockels des Kindersitzes montiert werden kann (vgl. [Abb. 6.29](#) und [6.30](#)). Dies geschieht, genau wie beim Grundgestell, durch geometrisches Vermessen, konstruktives Erfassen und anschließender Herstellung mit permanenter Anlehnung an das Konstruktionskonzept.

Die einzelnen Detailschritte dieses Grundkonzeptes werden nun im Folgenden genauer beschrieben.



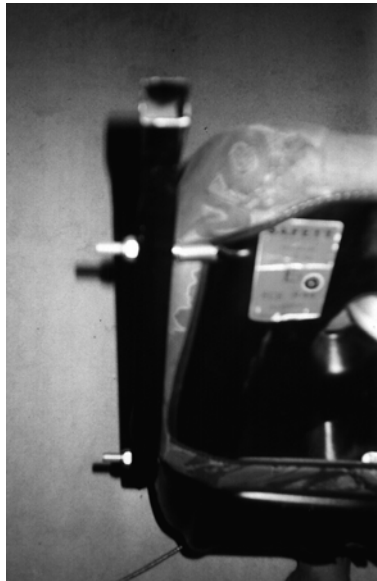
**Abb. 6.31** : Querstrebe von Pendelrückhaltesystem

Die gleiche Winkelstellung zum Kindersitz im nicht-ausgelenkten Zustand kann nur erreicht werden, indem der Kunststoffsockel im höheren Bereich (hinten) eingeschnitten wird.

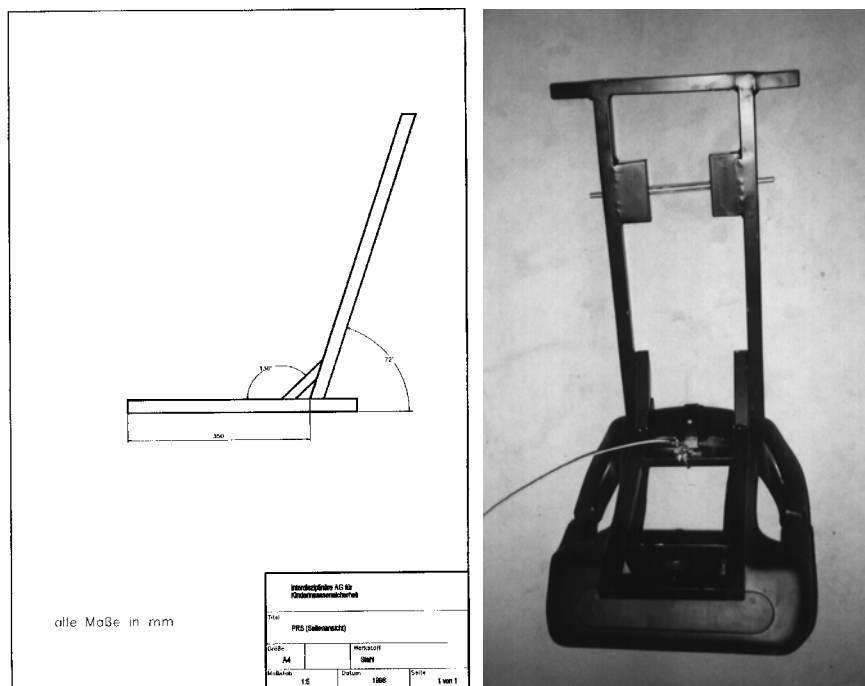
Das untere Stahlgestell besteht aus einem Vierkantröhr (25 mm, 1 mm Wandstärke). Die Grundform ist U-förmig, welches an der Unterkante durch ein Querrohr verstärkt ist. Vorne ist ein weiteres Querrohr verschweißt, welches den „Grundverschraubungspunkt vorne“ ([Abb. 6.31](#)) ergibt.

Hinten wird ein weiteres Mittelteil (2) ange-

schweißt, das T-förmig und leicht nach oben versetzt ist. An diesem Teil wird die zweite Bohrung für den 2. Verschraubungspunkt (3) gefertigt. An dieses Grundgestell kann das obere Stahlgestell problemlos befestigt werden (Abb. 6.32 und 6.33).



**Abb. 6.32** :Unteres Stahlgestell des Pendelrückhaltesystems



**Abb. 6.33** : Oberes Stahlgestell des Pendelrückhaltesystems

Über die bisherigen Gedankengänge hinaus muss natürlich eine Möglichkeit gefunden werden, das gesamte PRS zu befestigen. Da nur eine serienähnliche PKW-Rückbank mit 3-Punkt-Gurt zur Verfügung steht, wird eine Haltevorrichtung am Gestell gefordert, die mit der eines normalen Kindersitzes vergleichbar ist. Um optimale Vergleichbarkeit zu bekommen, wurde eine Befestigungsmethode gewählt, welche der des serienmäßigen „Osann-Modells“ sehr ähnlich ist.

Das „Osann-Modell“ wird durch einen herausziehbaren Splint mit einer Länge von ca. 100 mm an dem Schultergurt des Pkws gehalten. Um eine ähnliche Konstruktion am PRS zu gewinnen, werden zwei Rechteckprofile an das bereits vorhandene Aufbaugestell verschweißt.

Der entstehende Zwischenraum (siehe [Abb. 6.34](#)) ergibt einen Abstand von 100 mm, welcher der Befestigung des Safety-Paris, für den 3-Punkt-Gurt des Pkws, entspricht. Ein Quersplint durch das gesamte Trägergestell fixiert an dieser Stelle genau wie beim Serienmodell den Gurt. In Verbindung mit dem oben erwähnten Gurtstraffsystem dürfte die Gesamtkonstruktion auf der PKW-Sitzbank ausreichend befestigt sein.



**Abb. 6.34** : Seitenstrebe des Pendelrückhaltesystems

Die gelenkige Verbindung zwischen dem oberem Stahlgestell und der Sitzschale wird durch Bohrungen durch das Stahlgestell mit Hilfe einer Gewindestange M12 hergestellt. An dieser Gewindestange werden an den Außenpunkten zwei abgewinkelte Vierkantrohre mit selbstsichernden Muttern<sup>2</sup> verschraubt, welche an die Sitzschale des Osann-Modells mittels Kupferpassstücken und zwei weiteren Gewindestangen montiert werden ([Abb. 6.35](#)).

---

<sup>2</sup> In diesem Fall werden Muttern verwendet, welche die Selbstsicherung durch ein kunststoffgefülltes Gewinde realisieren.

Zwei 425 mm lange Vierkantrohre werden nach einem Abstand von 55 mm dreimal einseitig eingeschnitten, um sie anschließend auf einen Winkel von  $138^\circ$  biegen zu können.

Nach dem Biegen sind die Kerben durch das Einschneiden wieder verschlossen und können nun wieder verschweißt werden. Eine obere Bohrung bildet die Aufnahme für den späteren Drehpunkt.

Zwei seitliche Bohrungen dienen der späteren Befestigung an der eigentlichen Sitzschale mit Hilfe von M10 Verschraubungen.

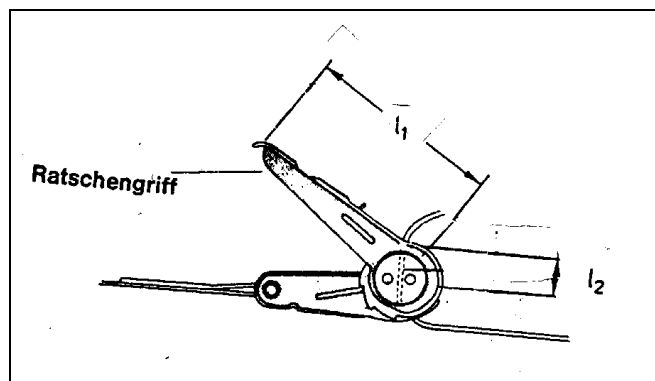
In dem Gelenkpunkt fanden zwischen den Sechskantmuttern und den Vierkantrohren Teflon-Scheiben Verwendung, welche die Reibung bei der später geplanten Rotation auf ein Minimum reduzieren.



**Abb. 6.35:** Pendelrückhaltesystem komplett

#### 6.4.2 Fertigung des Gurtstraffer

An dieser Stelle soll das zweite Konzept der Anwendungsbeispiele konstruiert werden. Bisher wurden für die Straffungsversuche zur Reduzierung der Gurtlose ein vorhandener leicht modifizierter LKW-Spanngurtstraffer (Abb. 6.36) verwendet. Dieser erweist sich gerade in kleinen PKW als viel zu unhandlich und daher unpraktisch in der Handhabung. Das Einfädeln des Gurtes ist ebenfalls sehr umständlich.



**Abb. 6.36 :** Prinzipzeichnung „Gurtratsche“

Daher wurden von der Arbeitsgruppe (Interdisziplinäre AG für Kinderinsassensicherheit der Ruhr-Universität Bochum) verschiedene Möglichkeiten aus der Arbeit [LiS95] zur Realisierung einer Gurtvorstraffung durchdacht und in Ansätzen auch konstruktiv konzipiert. Für die Versuchsdurchführung in Dresden wurde jedoch die Grundkonzeption des Lkw-Spanngurtes übernommen und auf ein ansprechendes Maß gebracht sowie die Aussparungen zur Durchfädelung des Gurtes vergrößert und damit das Anbringen erleichtert. Durch diese Optimierungsmaßnahmen verringert sich das Bauvolumen des Gurtstraffers für die Verwendung im PKW auf ein akzeptables Maß. Auf Grund der Einfachheit dieser Konstruktion erübrigt sich eine weitergehende detaillierte Beschreibung.



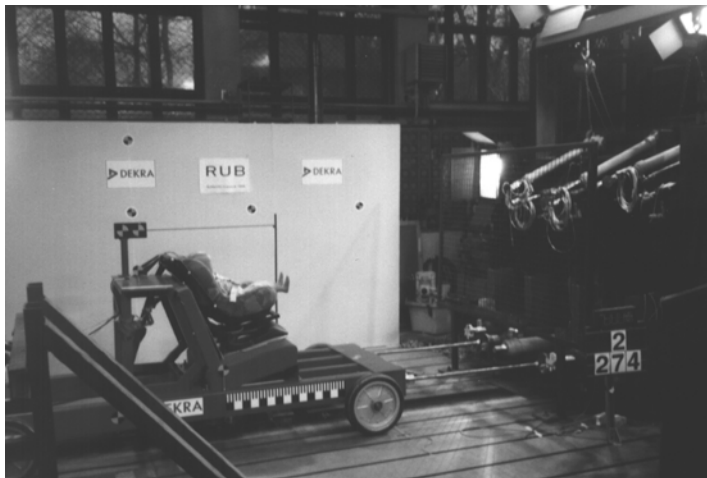
## 6.5 Durchführung eines Realversuchs nach ECE-R 44 [ECE99]

### 6.5.1 Allgemeines

Die DEKRA Typprüfstelle / Technischer Dienst der DEKRA Automobil AG Dresden (siehe Photo) ist ein akkreditiertes Prüflaboratorium und führt seit 1990 Prüfungen zur Erlangung von ECE-Genehmigungen durch. Diese Typprüfstelle ist vom International Consumer Research & Testing Ltd. als offizielles Prüflabor anerkannt. Es führt Prüfungen nach internationalen und nationalen Prüfrichtlinien durch mit entsprechenden Qualitätsurteilen, die auch in Presseorganen wie z. B die der Stiftung Warentest veröffentlicht werden.

Ziel der Prüfungen sind objektive und unabhängige Verbrauchertests, Einflussnahme auf die Weiterentwicklung der Technik. Darüber hinaus übt die Prüfstelle in der Funktion eines staatlich anerkannten technischen Dienstes Einflussnahme auf die Weiterentwicklung des Regelwerkes für die Genehmigung und Zulassung von Produkten aus

Grundlage des Labors ([Abb. 6.37](#)) ist die Analyse des Sicherheitspotentials, das in direkter Verbindung mit einer ACCESS-Datenbank, welche über ca. 50 000 Dateneinträge verfügt, zu plausibler Urteilsfindung gelangen kann.

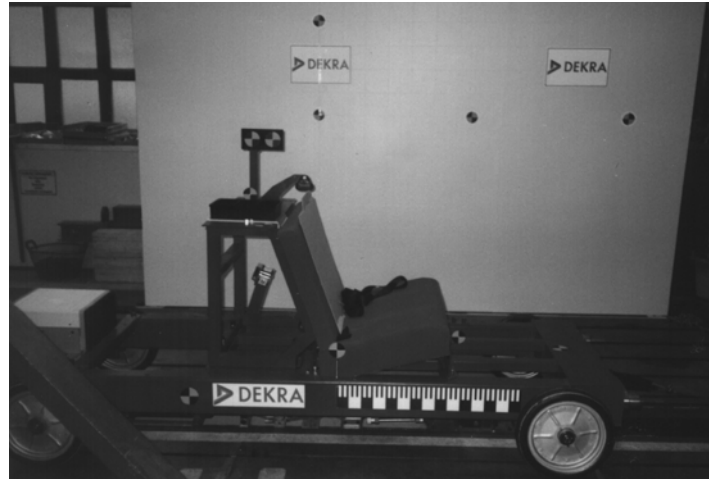


**Abb. 6.37** : Schlittenprüfstand für Crashversuche (DEKRA AG, Dresden)

### 6.5.2 Schlittenaufbau

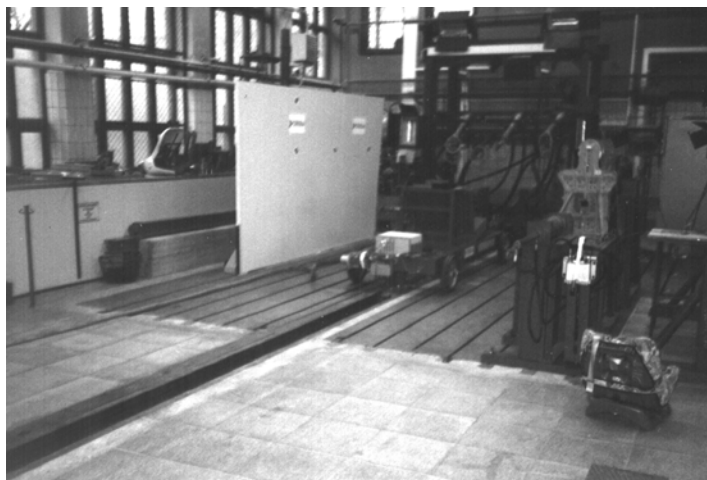
Der Prüfschlitten der Technischen Prüfstelle der DEKRA AG in Dresden verfügt über folgenden Aufbau:

Eine PKW-Rückbank ist auf ein Plateau geschraubt, welches über vier Räder verfügt. Der Geradeauslauf dieses Plateaus wird durch eine ca. 30 m lange Schiene geführt, so dass eine sogenannte Schlittenbahn entsteht ([Abb. 6.38](#)).



**Abb. 6.38** : Versuchsschlitten

Der Antrieb wird durch eine sehr starke Winde gewährleistet, deren Motorisierung vorher bereits vor Prüfbeginn anläuft und mittels eines Schalter eingekuppelt werden kann. Dadurch wird eine sehr hohe Beschleunigung realisiert, die dafür sorgt, dass der Schlitten am Bahnenende eine Geschwindigkeit von ca. 50 km/h aufweist (Abb. 6.39).



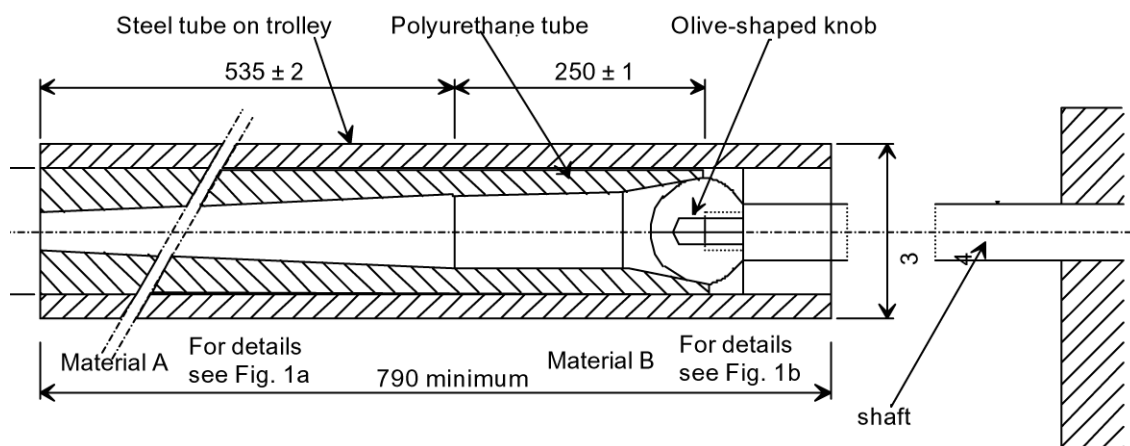
**Abb. 6.39** : Seilwinde / Führungsschiene

Der Anstoßvorgang wird durch eine Konstruktion realisiert, die dem plastischen und elastischen Verzögerungsverhalten [ECE99] einer PKW-Knautschzone sehr nahe kommt. Diese Konstruktion besteht aus zwei gleichen, parallel angeordneten Energieaufnehmern. Jeder Energieaufnehmer besteht aus einem Mantel aus Stahlrohr und einem Energieaufnehmerrohr aus Polyurethan. Dieser Werkstoff zeichnet sich durch eine hohe Elastizität und einer guten Abrieb-, Schnitt und Reißfestigkeit aus.

In den Energieaufnehmer taucht eine olivenförmige Bremsvorrichtung ein, welche mit einer Stange verbunden ist (Abb. 6.40.1). Durch das Eintauchen dieses Formteils in den Energieaufnehmer verklebt dieses sich zunehmend und es kommt so zu einer definierten Verzögerung gemäß Abb. 6.40.2. Die vollständige Bremsvorrichtung ist mindestens 12 Stunden lang bei einer Temperatur zwischen 15° und 25°C zu lagern, bevor sie verwendet wird..

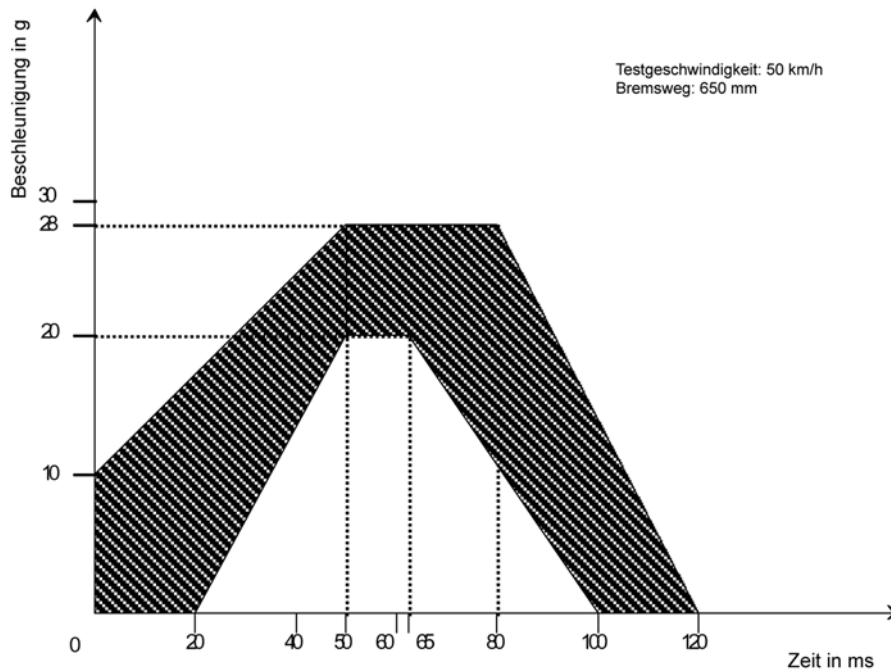


**Abb. 6.40** : Bremssystem des DEKRA-Schlittens



**Abb. 6.40.1** : Bremssystem nach ECE R44

Nach Angaben der Dekra Dresden sind die Kunststoffenergieaufnahmerohre nach einem Versuch, in Verbindung mit einem sofortigen Auspressen der Formteile, nach 24 Stunden bei bestimmter Lagerung wiederverwendbar und daher umweltfreundlich.



**Abb. 6.40.2** : Bremsverlauf (Beschleunigung) nach ECE R44

So wird ein PKW-Crashverhalten annähernd simuliert. Der gesamte Versuchsablauf wird zeittechnisch durch ein Lichtschrankensystem erfasst sowie durch zwei hochwertige Videokameras phototechnisch dokumentiert.

### 6.5.3 Dummy und Rechnersystem



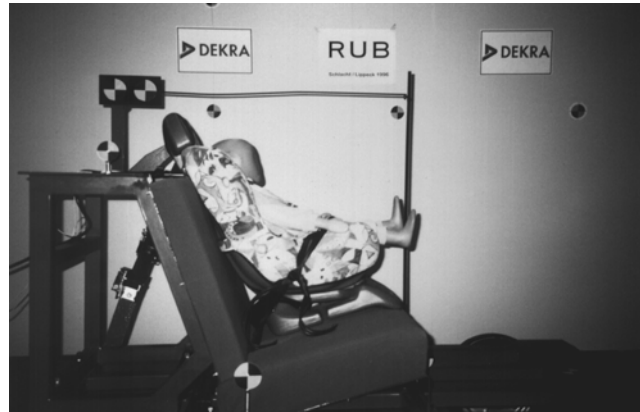
Der Dummy ([Abb. 6.41](#)) ist ein 9 kg schwerer Kinderdummy der neuesten Generation. Er verfügt im Kopf-Hals-Rumpf-Bereich über Kraft und Beschleunigungsmesser, welche direkt über einen Verstärker mit einem Rechnersystem verbunden sind. Das Rechnersystem ist ein Messdatenerfassungssystem, das mit einer eigens für diesen Versuchsstand entwickelten Software arbeitet. Die ermittelten Daten werden in verschiedenen Darstellungsformen ausgewertet und in Real-Time in Belastungswerte umgerechnet. Die Auswertung selber ist natürlich druckfähig und teilweise in dieser Arbeit zu einem späteren Zeitpunkt wiedergegeben.

**Abb. 6.41** : Kinder-Dummy in Kinderrückhaltesystem

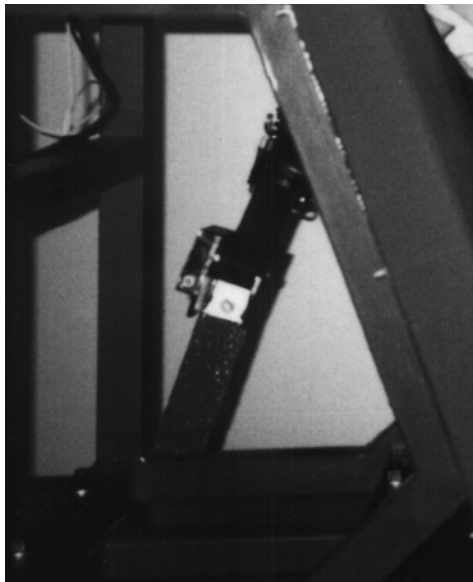
### 6.5.4 Versuchsdurchführung

Zunächst wird der Versuch mit dem Pendelrückhaltesystem (PRS) durchgeführt. Das PRS wird mittels Gurt und dem zusätzlich später verwendeten Gurtstraffer auf der Rücksitzbank befestigt. Der Dummy wird in der Sitzschale mit dem serienmäßigen Vierpunktgurt des Kindersitzes „Safety“ angeschnallt (Abb.6.42).

Der Schlitten wird zurückgefahren und der von „Insidern“ sogenannte „Schuss“, wie das Starten des Schlittens genannt wird, ausgelöst. Die dabei entstehenden Daten (Beschleunigungskräfte am Dummy) werden zwischengespeichert und nachher ausgewertet.



**Abb. 6.42** : Seitenansicht von Kinder-Dummy im Kinderrückhaltesystem auf Versuchsschlitten



Die Versuchsanlage wird mit neuen Dämpfern bestückt und neu justiert. Im Anschluss daran wird der „Safety“-Kindersitz mit Hilfe des Gurtstraffers montiert (siehe Abb. 6.43). Dieser „Schuss“ wird ebenfalls gefahren und die Messwerte zwischengespeichert

Beide Versuche werden durch die beiden installierten Videokameras zur späteren Analyse aufgezeichnet.

**Abb. 6.43** : Gurtstraffer des Kinder-rückhaltesystems

### **6.5.5 Auswertung der Verifizierungsversuche**

Das Messdatenerfassungssystem der DEKRA AG Dresden liefert Kräfte, Beschleunigungen und Momente in x-, y- und z-Richtung sowohl für den Kopf-, den Hals- und den Brustbereich. Des weiteren wird der HIC-Wert (siehe Anhang) berechnet und ausgegeben.

Damit sind folgende Schutzkriterien berechenbar:

- Kopfvorverlagerung des Dummies horizontal und vertikal
- Brustverzögerung (Resultierende und vertikale-)
- Abdominalpenetration
- Kopfverzögerung

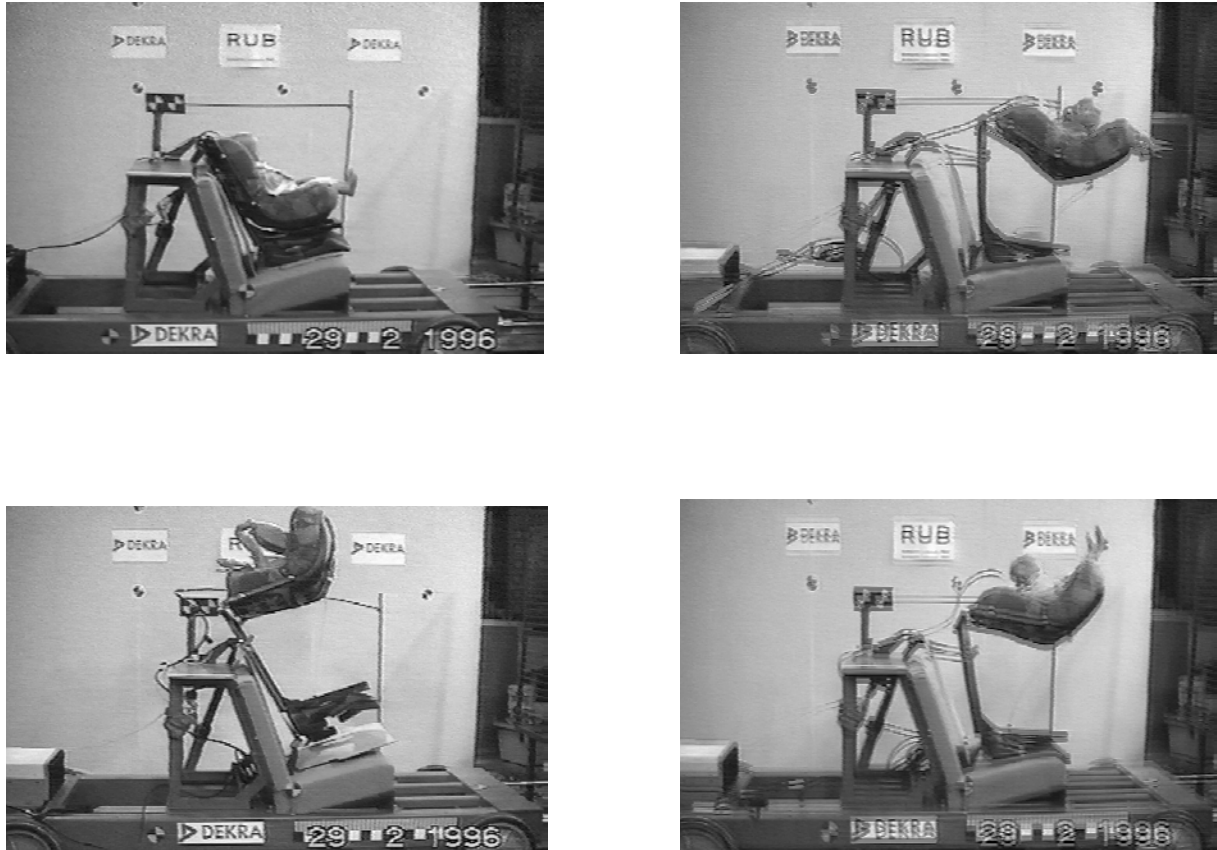
Darüber hinaus kann Folgendes bestimmt werden:

- Intrusion des Diagonalgurtes in den Hals des Dummies
- Verlassen der Gurtführung vor, während und nach dem Aufprall
- Bruch von Teilen der Gurtführung
- Torsorotation

Alle Auswertungen erfolgen graphisch in Diagrammform mit Angabe der Maximal- und Minimalwerte. An dieser Stelle ist für die Verifizierung der Simulation nur der Halsbereich und der HIC-Wert von größerer Bedeutung.

### 6.5.6 Videosequenz

#### Konzeptbeispiel: Pendelrückhaltesystem



**Abb. 6.44** : Videosequenz des Crashversuchs mit Pendelrückhaltesystems auf Schlittenprüfstand

Dieser Auszug aus der Videosequenz (Abb. 6.44) zeigt den Bewegungsablauf des Crashes während der Messung. Die gemessenen Werte (siehe Ende dieses Kapitels) zeigen eine eindeutige Übereinstimmung zu den Werten der Simulation. Insbesondere die gemessenen Ausschläge sowie die Zeitabstände  $\Delta t$  bei den Peaks sind nahezu deckungsgleich.

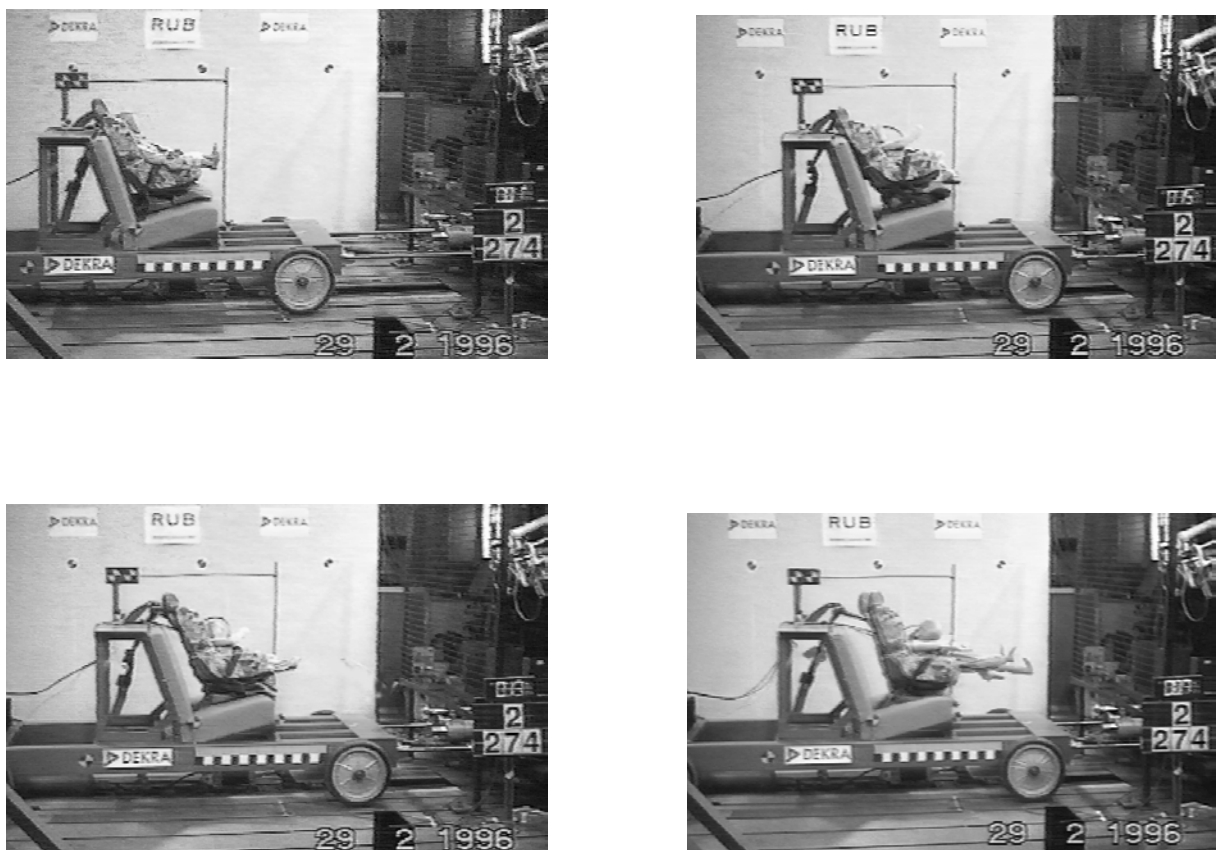
Die Fehler bzw. die Unterschiede, lassen sich durch die Querkräfte erklären, welche auf Grund von softwaretechnischen Einschränkungen bei der Simulation vernachlässigt wurden. Diese Querkräfte resultieren aus dem unsymmetrischen Verlauf eines Dreipunktgurtes im PKW und die dadurch entstehende leichte Verdrehung. Ein aufwendigeres Mehrkörpersystem unter anderem mit elastischen Mehrkörpern würde dort sicherlich genauere und noch bessere Ergebnisse liefern.

Der Versuch kann somit als erfolgreich gewertet werden, da er die Simulation weitgehend bestätigt. Die biomedizinisch bedenklichen Beschleunigungskräfte am Ende des Versuches

wurden und konnten bei der Simulation nicht erkannt werden, da sie über die Grenzen des Simulationsprogramms hinausgehen. Bei solchen hohen Winkel ist die Simulation vorher gar nicht durchgeführt worden und damit derartige Zentrifugalkräfte erst gar nicht berücksichtigt und berechnet worden.

Als Fazit kann gesagt werden, dass die Kinderrückhaltesimulation vernünftige Werte liefert. Aus technischer Sicht bezüglich des Pendelrückhaltesystems konnte klar per Simulation und Praxisversuch bewiesen werden, dass Kräfte, sowohl zeitlich als auch vektoriell bei einem Crash deutlich zu verschieben sind und diese somit dämpfungstechnisch auffangbar sind.

### **Konzeptbeispiel Gurtstraffer**



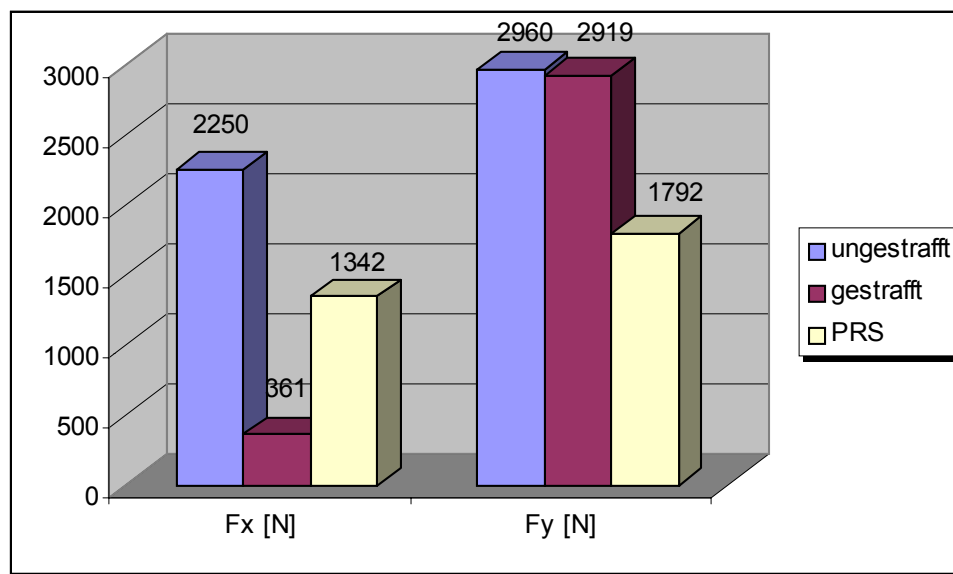
**Abb. 6.45** : Videosequenz des Crashversuchs mit Gurtstraffer auf Schlittenprüfstand

Schon allein der Vergleich der beiden Videosequenzen (Abb. 6.44 u. [Abb. 6.45](#)) zeigt deutlich den wesentlich „ruhigeren“ und damit belastungsärmeren Bewegungsablauf des Gesamtsystems. Bereits zu Beginn der Aufprallphase nimmt der Kindersitz und der Dummy an der gedämpften Verzögerung teil.



## 6.6 Fazit

Zunächst sollen die Maximalwerte der Halskräfte in x- und y-Richtung aus den Versuchen für die verbesserten Versionen (Gurtstraffer und Pendelrückhaltesystem) gegenübergestellt werden siehe [Abb. 6.46](#)). Die Werte für den Standardsitz (ohne Verbesserung) sind von der Stiftung Warentest bereits durch vorhergehende Versuchsreihen ermittelt und dem Verfasser zur Verfügung gestellt worden. Es wurde daher auf eine erneute Ermittlung auf der Versuchsanlage in Dresden verzichtet.



**Abb. 6.46:** Gegenüberstellung der Belastungskräfte von Crashversuch auf Schlittenprüfstand

### Versuchsauswertung Gurtstraffer

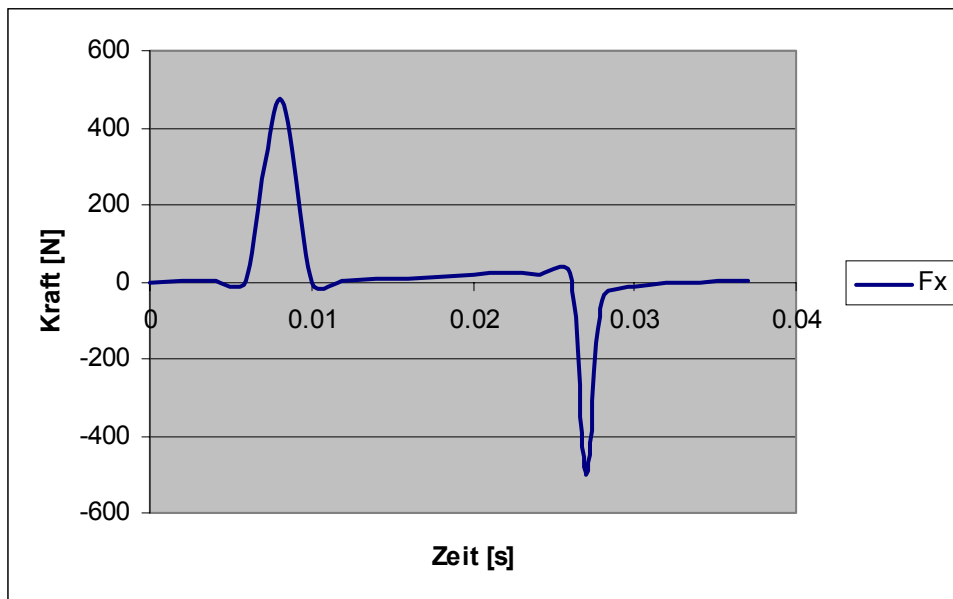
Der Gurtstrafferversuch liefert zwar Werte (siehe nachfolgende Kräfteverläufe [Abbildungen 6.47-6.56](#)), die biomedizinisch gesehen nicht niedrig sind, jedoch sind diese auf die Konstruktion des veralteten Sitzsystems der Firma Osann<sup>3</sup> zurückzuführen. Dieses Modell lieferte in früheren Testreihen Belastungswerte in erheblich größeren Dimensionen, welche in einem realen Unfall durch den viel zu hohen HIC-Wert, tödlich gewesen wären.

In Verbindung mit der optimierten Gurtlose durch die Straffung des Systems hätte ein Kind bei ähnlicher Unfallkonstellation und gleichem Sitz zwar schwer verletzt, jedoch eindeutig überlebt. Dies stellt biomedizinisch eine deutliche Verbesserung dar und bestätigt an dieser Stelle, sowohl messtechnisch als auch aus medizinischen Gesichtspunkten die Konstruktion, was darüber hinaus durch die vorhergegangene Simulation zusätzlich bestätigt wird. Die Diagramme zeigen eindeutig Verbesserungen insbesondere im Kraftbereich in x-Richtung (Scherkräfte), wie schon in den Simulationen qualitativ vorher berechnet worden ist. Eine

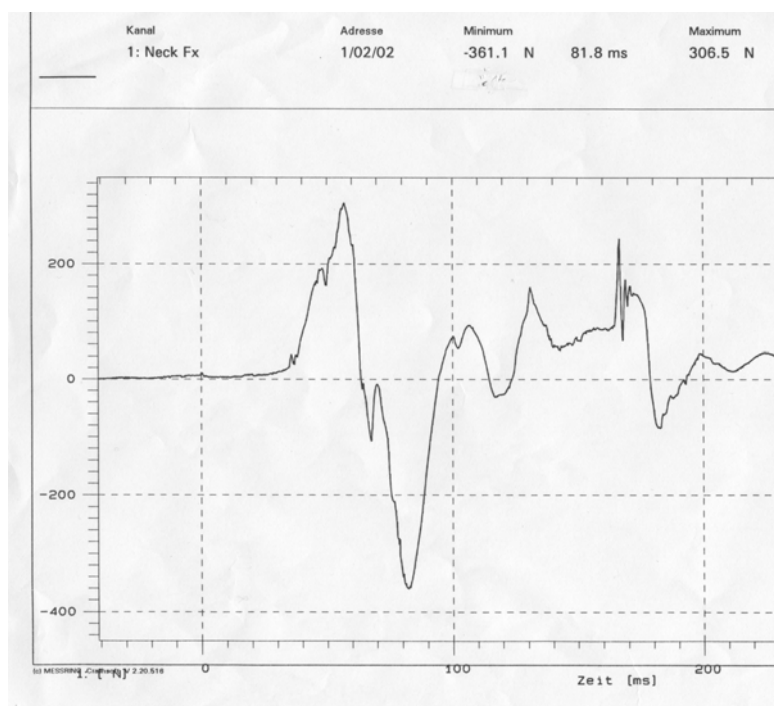
<sup>3</sup> Die Firma Osann bzw. die Nachfolgefirma sind mittlerweile mit zwei wesentlich verbesserten Nachfolgenerationen des Kinderrückhaltesystems „Safety“ auf dem Markt vertreten.

deutliche Reduzierung der y-Kräfte ist nicht feststellbar, was auch einsichtig ist, da eine Reduzierung der Gurtlose auf ein Minimum lediglich, bedingt durch die Konstruktion eines Dreipunktgurtes, ein Halten des Sitzes in x-Richtung erwirkt.

Das heißt: Durch das Anbringen eines Gurtstraffers wird das Kinderrückhaltesystem in die Rückenlehne und damit die Dämpfungsstruktur der PKW-Rückbank gepresst. Bei etlichen Vorversuchen konnte konstruktionsbedingt keinerlei Einpressung in die Sitzfläche der Bank festgestellt werden. Eine entsprechende Konstruktion, um auch in diese Richtung eine Vorstraffung zu erzielen, wäre daher sicher überlegenswert.

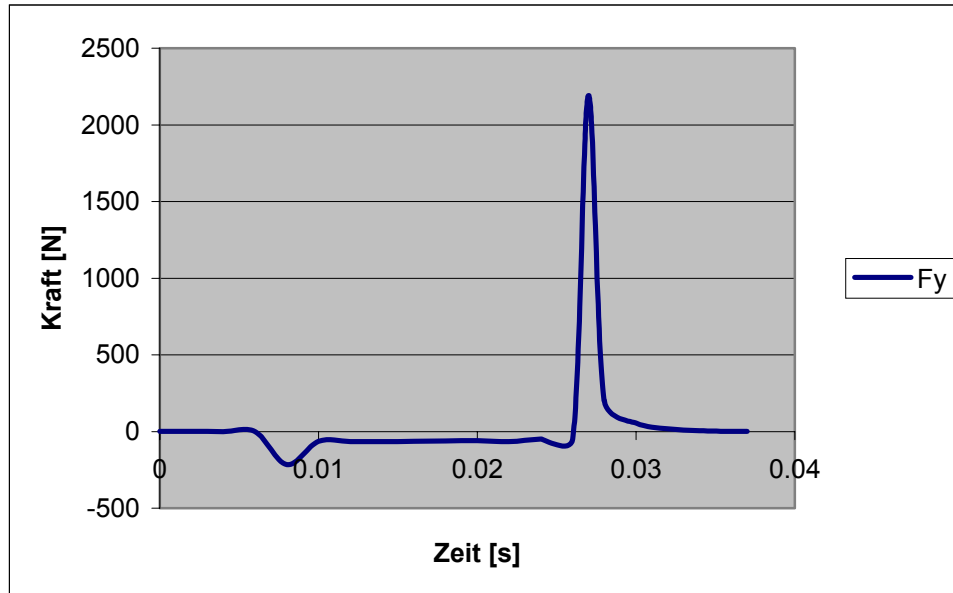


**Abb. 6.47** : Kraftverlauf  $F_x$  aus der Crash-Simulation „Gestraffter Gurt“

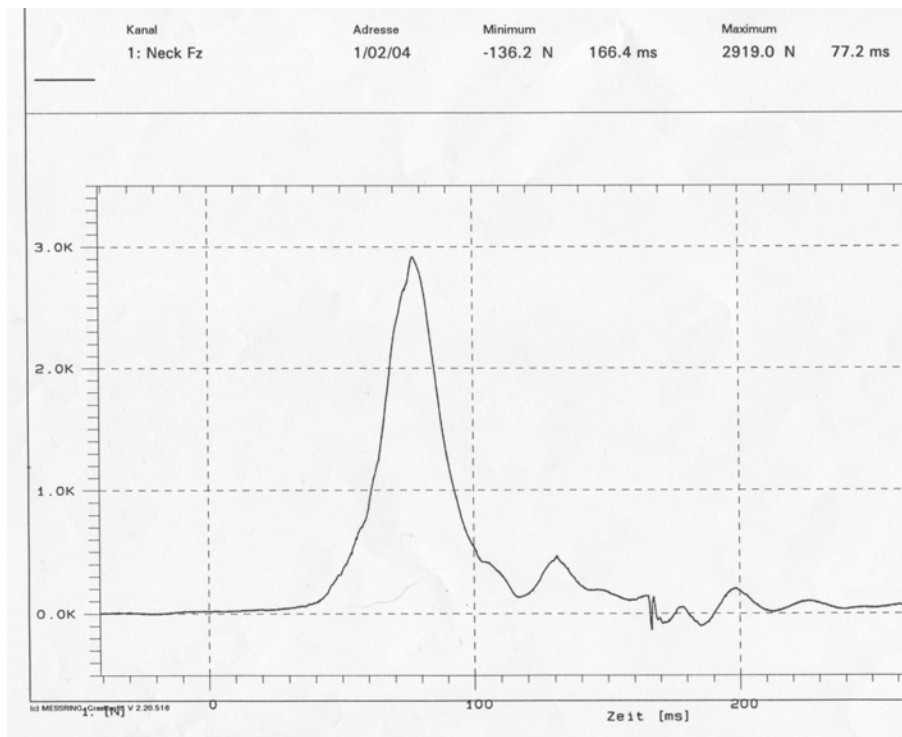


**Abb. 6.48** : Kraftverlauf  $F_x$  aus der Messung „Gestraffter Gurt“

Der Vergleich zwischen  $F_x$  (simuliert und gemessen) zeigt eine gute Kongruenz zwischen den beiden Kraftverlaufskurven. Die Simulationen zeigen klar die richtige Tendenz an. Die Beträge der x-Kräfte sind im akzeptablen Bereich.

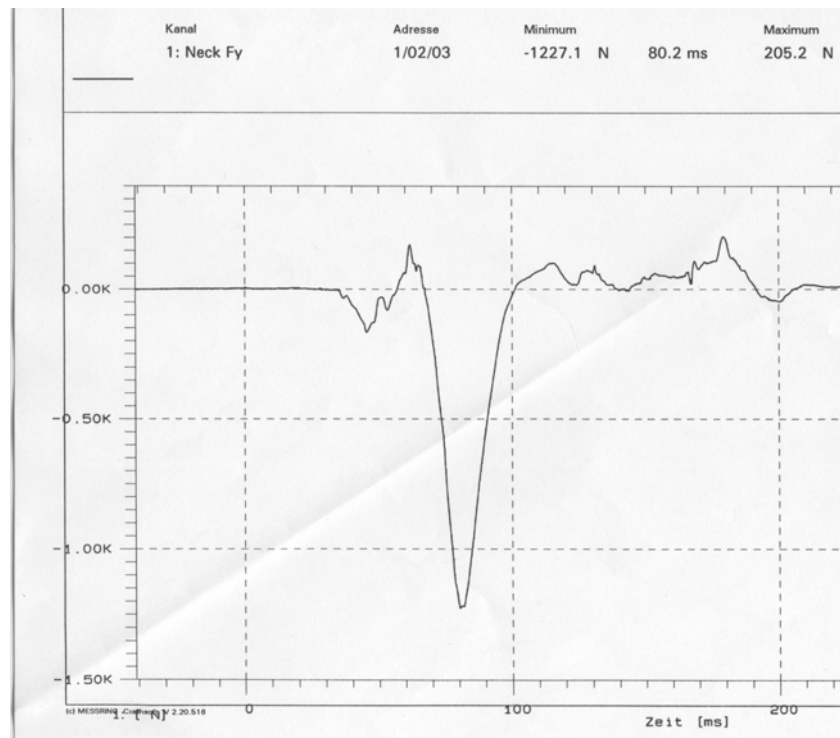


**Abb. 6.49** : Kraftverlauf  $F_y$  aus der Crash-Simulation „Gestraffter Gurt“



**Abb. 6.50** : Kraftverlauf  $F_y$  aus der Messung „Gestraffter Gurt“ (entspr.  $F_z$  im Realversuch)

Die unwesentliche Reduzierung in y-Richtung durch das Straffen der Gurte wird, wie zuvor ebenfalls, durch die Rechnersimulation bestätigt, so dass der Sinn einer Zusatzkonstruktion eigentlich vorher hätte erkannt werden können, um in y-Richtung ähnlich gute Verbesserung zu erzielen. Dies wird auch durch den ähnlichen Verlauf von Simulations- und Messkurve bestätigt.

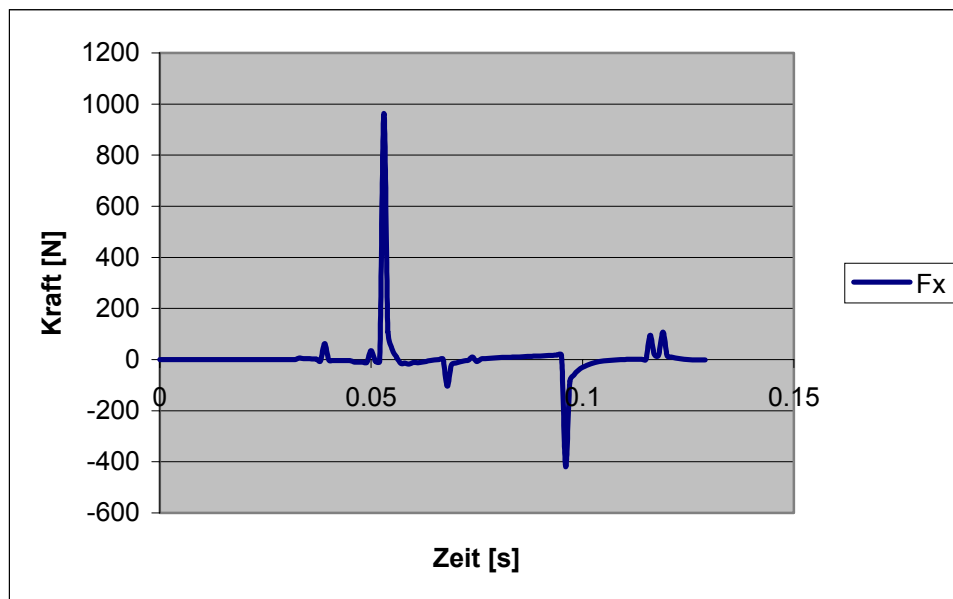


**Abb. 6.51** : Kraftverlauf  $F_z$  aus der Messung „Gestraffter Gurt“ (entspr. im Realversuch  $F_y$ )

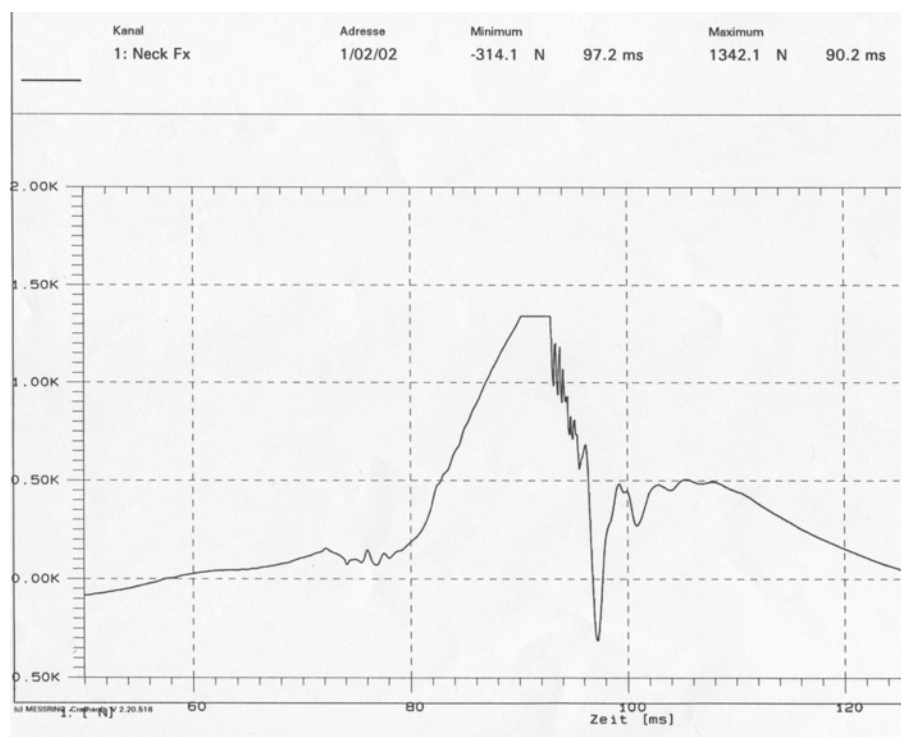
Die durch das Messsystem in der dritten Ebene festgestellten Belastungswerte sind biomechanisch nicht zu vernachlässigen. Sie wurden und konnten durch die Simulation nicht festgestellt werden, da diese auf zwei Dimensionen beschränkt sind. Eine entsprechende Veränderung / Verbesserung des Produktes ist daher nicht vorgenommen worden. Dieser Fehler wäre simulationstechnisch in der Konstruktionsphase nur durch ein 3-D-Programm aufgedeckt worden.

### Versuchsauswertung Pendelrückhaltesystem

Der Realversuch bestätigt die durch die Simulation bereits vorausberechnete Reduzierung der Belastungswerte im Halsbereich durch das Pendelrückhaltesystem. Die Ausschläge auf den Kraftverlaufskurven sind im Vergleich zur unverbesserten Version (siehe Kapitel 6.2) deutlich reduziert.

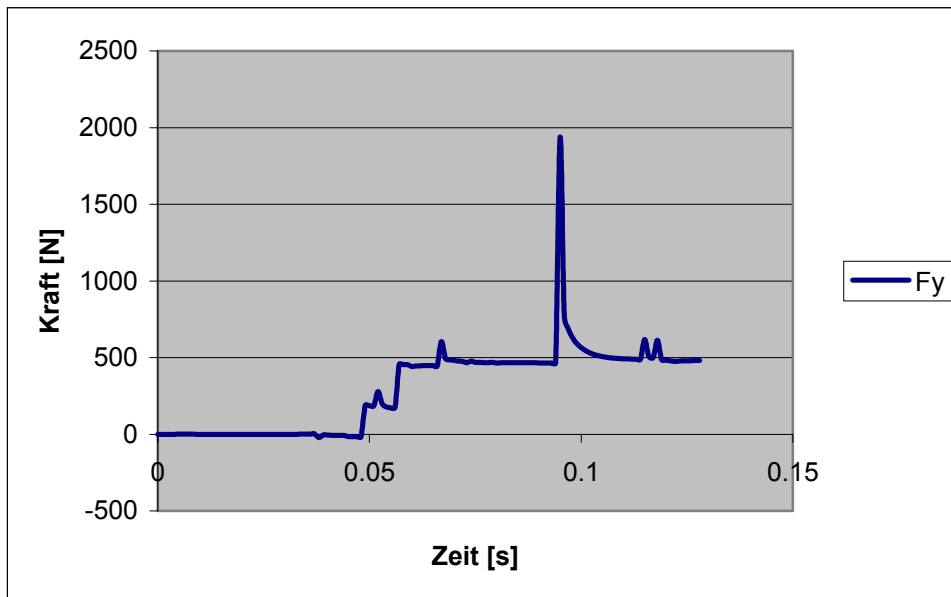


**Abb. 6.52** : Kraftverlauf  $F_x$  des simulierten Pendelrückhaltesystems

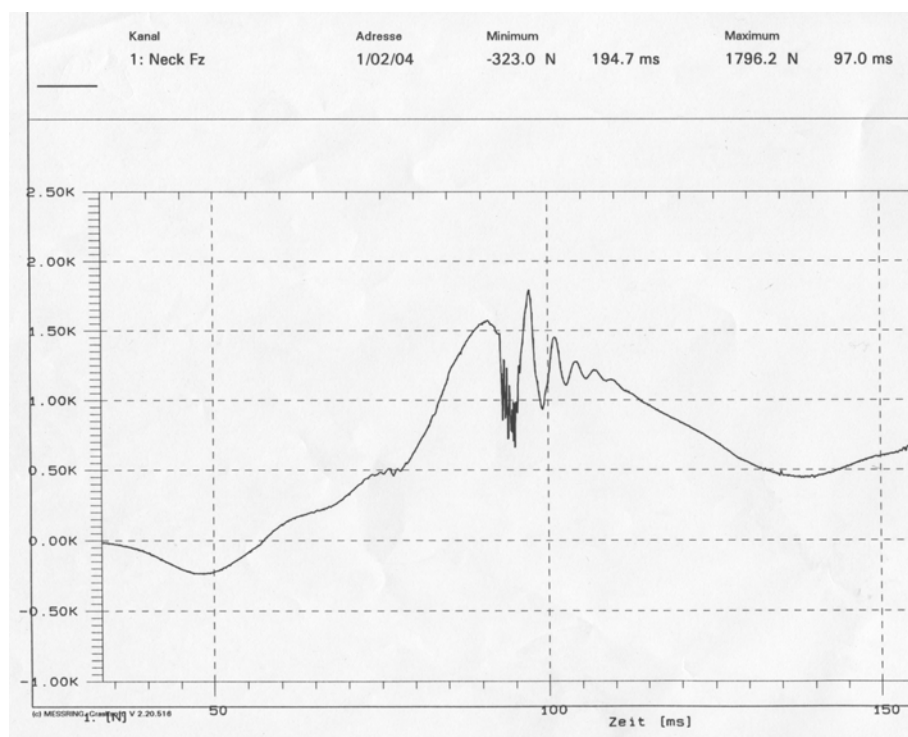


**Abb. 6.53** : Kraftverlauf  $F_x$  der Messung des Pendelrückhaltesystems

Simulation und Messung zeigen in x-Richtung sehr ähnliche Kraftverläufe. Die betragslichen Differenzen ergeben sich systembedingt und finden sich weiterhin ursächlich in den teilweise abweichenden, angenommenen Randbedingungen bei der Szenariomodellierung.



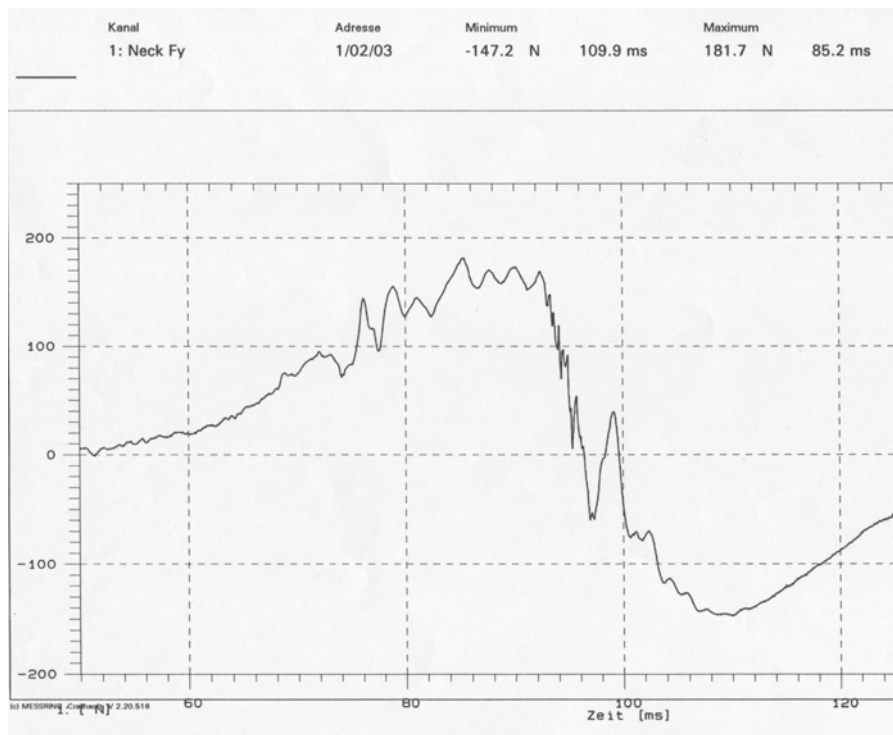
**Abb. 6.54** : Kraftverlauf  $F_y$  des simulierten Pendelrückhaltesystems



**Abb. 6.55** : Kraftverlauf  $F_y$  der Messung des Pendelrückhaltesystems (entspr.  $F_z$  im Realversuch)

Der y-Verlauf der Simulation zeigt ebenfalls eine gute Kongruenz zum Realversuch. Der bei der Simulation nicht erklärable kontinuierliche Grundwert von ca. 500 N außerhalb der Peaks lässt sich in Verbindung mit dem Realversuch nun erklären. Es handelt sich um den Anteil einer Zentrifugalkraft. Dies wurde dadurch festgestellt, dass das DEKRA Messsystem auf ein

erhöhtes Drehmoment um die Trägheitsachsen des Dummys als Belastungswert hingewiesen hat. Die Simulation wurde in Bezug auf auftretende Momente bislang gar nicht betrachtet.



**Abb. 6.56** : Kraftverlauf  $F_y$  der Messung des Pendelrückhaltesystems (entspr.  $F_z$  im Realversuch)

Auch bei dem Pendelrückhaltesystem wurde bei der Messung eine Kraft in der dritten Ebene festgestellt. Diese ist jedoch, wie bei der Simulation zunächst angenommen, tatsächlich vernachlässigbar klein.

Dass diese oben erwähnten Problematiken bei beiden Anwendungsbeispielen nicht schon in der Frühphase der Konstruktion bei der Parallelsimulation registriert worden sind, lag zum einen an der eingeschränkten Dauer der Simulation des Programms Working Model und zum anderen an der Einschränkung auf lediglich zwei Dimensionen. Drehmomente und die zusätzlich entstehenden Kräfte in den „Raum“ hinein wurden daher völlig vernachlässigt und wurden so erst bei der Realmessung registriert. Die erzielten Ergebnisse sind zwar auf die zwei Ebenen beschränkt, kommen der Realität jedoch so nah, dass die Verifizierung als positiv angesehen werden kann.

Die Anschaffung eines aufwendigeren Mehrkörpersystems, welches dreidimensional arbeitet, ist somit dringend notwendig und begründet. Darüber hinaus ist ein derartiges System auch in späteren Konstruktionsphasen einsetzbar. Vorbelastet durch die Erfahrung mit dem zweidimensionalen System und den bausteinähnlichen Finite-Elemente-Systemen konnte nun ein Forderungskatalog aufgestellt werden, wie ein besseres Simulationsprogramm auszusehen

hat. Diese Forderungen konnten zusätzlich durch die Messung und Ergebnisse der Realversuche ergänzt werden.

Von dem 3-D-System, welches die oben beschriebenen Kriterien erfüllt, ist zu erwarten, dass es nahezu perfekte Werte im Vergleich zum Realversuch liefert. Sämtliche Hochbelastungen müssten nachvollzogen und vorab berechnet werden können. Das Ziel, den Beweis zu erbringen, Mehrkörpersysteme für Crash-Versuche als Simulationsprogramm zu verwenden, ist bereits durch die 2-D-Simulation erbracht und kann durch eine 3-D-Simulation nur bestätigt werden.

Auch kleineren Firmen sollte somit die Möglichkeit gegeben sein, schon vor Markteinführung ihrer Produkte mindestens 2-dimensional am Rechner zu testen, so dass nicht erst ein Kindersitztest durch ein Prüflabor oder gar einen tragischen Unfall auf die Fehlfunktionen hinweisen muss.

Die Anschaffungskosten dürften durch die nicht mehr vorhandenen, nicht funktionierenden Grundkonzepte, welche durch eine Überprüfung in der Frühphase einer Konstruktion durch eine 2-D-Simulation selektiert werden könnten, aufgefangen werden.

Mit diesem Tenor sollte in naher Zukunft eine deutliche Bewegung im Bereich der Entwicklung von Sicherheitstechnik möglich und keine „Zukunftsmusik“ sein.



## 7 Qualitäts- / Anwendungsanalyse bezüglich Simulation und Realversuch

Anhand der vorher durchgeführten Beispiele in Form von Simulation und anschließendem Versuch soll nun der Versuchsaufbau und die Versuchsdauer bezüglich der Qualität, des Aufwandes, des Speicherbedarfs und der Rechendauer in Form einer Tabelle gegenübergestellt und verglichen werden. Die hier gewählte Strukturierungsgrundlage hat die Grundmerkmale des vom Institutes für Maschinenkonstruktion der TU-Berlin entwickelten ABC-Konzeptes. Dieses Konzept ist entwickelt worden, um unter Beachtung von Zeitaufwand und Aussagegüte eine flexiblere, anwendungsorientierte Verwaltung und Ausführung von Berechnungsmethoden zu erlangen. Vorrangig ist die Strukturierung nach dem Zeitaufwand bei der Anwendung einer Methode, der Zeitaufwand zur Entwicklung einer Methode wird dagegen eher in der Aussagegüte berücksichtigt. Aus Sicht des Kompetenzzentrums ist die Methodenebene C vor allem für Faustformeln und analytische Kurzprogramme geeignet. Auf dieser Ebene finden sich die produktspezifischen Auslegungsmethoden, vor allem für die frühen Phasen des Konstruktionsprozesses. Hochwertige Berechnungsmethoden sollen auf der Berechnungsebene A, die spezielles Fachwissen und Rechnererfahrung verlangt, verwaltet werden.

Die Integration dieser Methoden in dem Entwicklungsprozess eines Produktes ist bis auf spezielle Ausnahmen nicht anzustreben. Vielmehr sind mit diesen meist generischen Methoden solche der schnelleren aus den Gruppen B und C zu entwickeln. Bei der Analyse der Qualitätsstufen im Vergleich zum Zeitaufwand wird die eingangs aufgestellte These dieser Arbeit bestätigt. Schon mit einfachen Simulationstechniken können dynamisch-hybride Systeme mit vernünftigen Werten analysiert werden und ein „Abrutschen“ einer Konstruktion in die falsche Richtung bezüglich Qualitätsverbesserung vermieden werden. Allein diese Tatsache rechtfertigt Parallelsimulationen während der Konstruktionsphase in Bezug auf Kostenersparnis.

Im Folgenden ([Abb. 7.1](#)) sollen nun die Ergebnisse der hier erzielten 2D-Simulation mit den vom Verfasser angenommenen, möglichen Ergebnissen einer 3D-Simulation [HaT94], [JNV91] und den tatsächlichen Werten des Versuches verglichen werden.

	Produktbewertung für		
	2-dimensionales Mehrkörpersystem	3-dimensionales Mehrkörpersystem	Dummy-Versuch
<b>Aufwand / Speicherbedarf / Rechendauer</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Überschaubarer Zeitaufwand zur Modellierung (Grundkonzept in einigen Stunden)</li> <li>• Eingeschränkter Speicherplatzbedarf (&lt; 2 MB)</li> <li>• Rechendauer (&lt; 360 sec.)</li> <li>• PC mit einfacher Ausstattung (Grafik, Prozessor, RAM)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sehr zeitintensive Modellbildung durch Berücksichtigung mehrerer Koordinaten (Grundkonzept 1-2 Wochen)</li> <li>• Hoher Speicherplatzbedarf (&gt; 5 MB)</li> <li>• Rechendauer (&lt; 10 min.)</li> <li>• PC oder Workstation mit hochwertiger Ausstattung (empfehlenswert: Pentium III / MIPS 4)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Extrem zeit- und kostenintensiver Modellaufbau</li> <li>• Allein der Rechnerbedarf beim Meßsystem übertrifft den der Simulation bei weitem</li> <li>• Versuchsaufbau und -vorbereitung: mehrere Monate</li> <li>• Crashtestzentrum wird benötigt</li> </ul>
<b>Prognose- / Aussagequalität</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• In den vorhandenen 2 Dimensionen ausreichend (innerhalb 80% des realen Messwertes)</li> <li>• Hauptproblem: Durch fehlende dritte Dimension vernachlässigte Querkräfte und dadurch nicht beachtete realkritische Momente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• In allen 3 Dimensionen befriedigende bis gute Aussagequalität (bis zu 90% des realen Messwertes)</li> <li>• Hauptproblem: Modellierungsqualität „lebt“ von vorgegebenen Restriktions- und Messwerten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gute bis sehr gute Messergebnisse</li> <li>• Hauptproblem: Die Biomechanik des Menschen in einem hybriden System nachzubilden</li> </ul>
Beispiele	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Working Model</li> <li>• DADS 2-D</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DADS 3-D</li> <li>• ADAMS</li> <li>• MADYMO</li> <li>• SIMPACK</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• TNO / Delft</li> <li>• TÜV Rheinland</li> <li>• DEKRA Dresden</li> </ul>

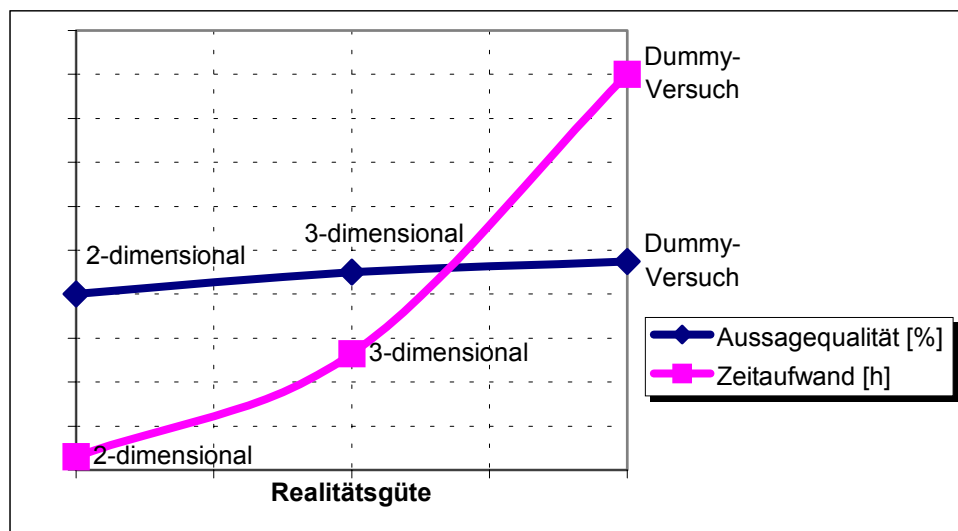
**Abb. 7.1** : Anwendungsanalyse

Die zweidimensionale Simulation eignet sich ideal für die funktionelle Phase sowie zu Beginn der Prinzipienphase gemäß VDI-Richtlinie 2221. Auf dieser Entwicklungsstufe der Konstruktion werden erste Funktionsstrukturen sowie grundsätzliche Prinziplösungen entwickelt, und bereits hier können, wie das vorhergehende Beispiel der Rückhaltesysteme zeigt, klare Aussagen gemacht werden. Auch erste Werte können berechnet werden, so dass diese Konstruktionsstufe nicht länger rein qualitativ bleibt. Der überschaubare Zeitaufwand zur Modellbildung bei der zweidimensionalen Simulation passt ebenfalls zu dieser Stufe.

Der eingeschränkte Speicherplatzbedarf lässt schon einfache PCs mit minimaler Ausstattung zu und garantiert trotzdem eine kurze Rechendauer von wenigen Minuten. Die errechneten Werte erreichen meist eine Genauigkeit von 80 %. Da die Konstruktion in dieser Phase meist

derartig grob ist, dürften die zu erwartenden Veränderungen bis zum Prototypen diesen Wert bei weitem überschreiten und somit dürfte dieser Genauigkeitsfaktor als ausreichend bezeichnet werden. Die fehlende dritte Dimension sollte immer als die mit den zu geringsten Belastungswerten sein, so dass die Reduzierungen derselben erst beim späteren „Feinschliff“ einer Konstruktion Berücksichtigung finden müssen.

Mit dem dreidimensionalen System werden aufwendigere Prinziplösungen bis hin zur Überprüfung eines Gesamtentwurfs analysiert und rechnerisch erprobt. Die doch sehr zeitaufwendige Modellbildung verlangt daher schon ein vernünftiges Erprobungsgedankengut, welches entweder bereits eine zweidimensionale Simulation durchlaufen hat oder durch andere Erprobungstechniken konventioneller Art auf Prinzipfunktion überprüft wurde. Restriktionswerte müssen schon in genauer Form vorliegen und auch der Rechner muß über eine gehobene Ausstattung verfügen. Auch in dieser Phase kann im Vergleich zum Gesamtaufwand der Konstruktion die Rechendauer von 0,2 bis 6 Stunden als gering betrachtet werden. Der Speicherplatz von 5 MB ist von dem heutigen Preisgefüge der Speicherbausteine ebenfalls vertretbar. Bei der Einhaltung dieser Vorgaben werden bis zu 90 % der realen Messwerte erreicht und sind damit nicht mehr weit von der Messtoleranz von Dummy-Versuchen entfernt.



**Abb. 7.2** : Aussagequalität und Zeitaufwand in Abhängigkeit der Realitätsgüte

Die extrem zeit- und kostenintensiven Dummy-Versuche, deren Versuchsaufbau meist mehrere Monate in Anspruch nimmt und Crash-Testzentren mit großem Gebäudeaufwand beanspruchen, liefern zwar nach wie vor die besten Messergebnisse, man muss sich doch darüber im klaren sein, dass ein Dummy auch nur eine mechanische Simulation eines Men-

schen ist. [GrM95] Somit werden durch diese hybriden Tests ebenfalls niemals Realwerte erreicht. In Anbetracht dieser Tatsache rechtfertigen sich diese Form der Fehleranalyse kaufmännisch nicht mehr. Die rasend schnelle Entwicklung der Rechnertechnik sowie die immer besser werdende Bedienerfreundlichkeit der Mehrkörpersysteme werden diese Aussage bekräftigen.

Wie die Abb. 7.2 zeigt, steigt der Zeitaufwand überproportional stark im Vergleich zur Messwertegenauigkeit an. Der Realtest ist somit so gut wie nicht mehr gerechtfertigt und sollte, wenn überhaupt, nach Abschluss einer Konstruktion als Verifizierung verwendet werden. Sollte jedoch in Zukunft eine kaum messbare Abweichung von den Simulationen vorhanden sein, übersehene Fehler ebenfalls nicht zum Vorschein kommen, kann auch gänzlich auf einen Realtest verzichtet werden. Das Argument „Forschungskosten“ kann bei vielen Produkten in Bezug auf Qualität daher jetzt schon kaum noch ein akzeptables Argument sein. Davon abgesehen, dass Simulation auf Rechnern durchgeführt werden können, die jetzt schon für Design- oder buchhaltungstechnische Zwecke eingesetzt werden und somit vorhanden sind.

## 8 Schlusswort

Diese Arbeit stellt prinzipiell ein chronologisches Tagebuch dar, welches zu Beginn Forderungen stellt, die kontinuierlich erfüllt werden sollten und größtenteils erfüllt werden konnten.

Zunächst wurde festgestellt, aus welchen Gründen bei dynamischen hybriden Problemstellungen Simulation so wenig an Bedeutung innerhalb des Produktentwicklungsprozesses zugestanden wird. Darüber hinaus konnten als Randeffekt konstruktive Vorschläge bzw. Beispiele aus dem Bereich der Verkehrssicherheitstechnik genauestens erforscht und zudem als Hauptanliegen die Effizienz und Funktion moderner noch nicht häufig angewendeter Simulationstechnik im Konstruktionsprozess erprobt und die notwendigen Schnittstellen geschaffen werden.

Dazu wurden als Beispiel einige sinnvoll zu verwertende Neukonstruktionen aus vorher angefertigten wissenschaftlichen Arbeiten auf das zweidimensionale Mehrkörpersystem Working Model von der Firma Knowledge Revolution adaptiert und auf diese Weise das Funktionsverhalten und damit die Wirkung simuliert werden. [WoM96]

So wurde schon im Frühstadium der Konstruktion die grobe Grundidee einer Produktverbesserung auf ihre Funktion überprüft, obwohl diese zur Lösung eines dynamisch biomechanisch/mechanischen Problems diente. Dies dürfte als innovativ gelten, da diese Vorgehensweise beim Konstruktionsprozess aus diesem Themengebiet, von vielen Experten aus vielerlei Gründen als nicht möglich verworfen wurde. [Gia95+96]

Die aus der Simulation resultierenden Ergebnisse wurden nach einem Prototypenbau dieser Konstruktion in einem Versuchslabor verifiziert. Dies geschah anhand mehrerer Crash-Versuche konform zu der vor durchgeführten Simulation. Beim Vergleich der Simulations- und Messergebnisse wurden erstaunlich genaue Übereinstimmungen in den ersten beiden Dimensionen festgestellt.

Die Belastungswerte in der dritten Dimension zeigten nicht vernachlässigbar hohe Werte, die durch entstehende Momente auf Grund von Asymmetrien der Verankerung in modernen Fahrzeugen resultieren.

Dadurch wurde festgestellt, dass zweidimensionale Systeme für die Grunderforschung eines Konzeptes auf Grund der schnellen Adaptionsmöglichkeit sehr gut geeignet sind, jedoch nicht vollständig einen Realitätstest verzichten lassen, so dass dann immer in den späteren Konstruktionsphasen ein Eingriff durchgeführt werden muss. Dadurch entsteht automatisch die Forderung nach einem dreidimensionalen System, welches die entstehenden Momente und die damit verbundenen zusätzlichen Kräfte berechnen kann, damit diese auch von einem Konstrukteur ohne aufwendige Praxisversuche berücksichtigt werden können.

Die dritte Dimension fordert natürlich einen größeren Bedarf an Daten und Restriktionswerten, da im Raum die Abhängigkeiten der einzelnen Körper in drei Ebenen definiert werden muss (6 Freiheitsgrade).

Von der 3-D-Simulation ist zu erwarten, dass die erstellte Modellierung anhand der gewonnenen Restriktionen aus der 2-D-Modellierung sowie den Praxisversuchen eine nahezu perfekte Parallelsimulation zu den vorhandenen realen Crash-Versuchen liefert. Damit würde die Beweislast dieser Arbeit, nämlich Bewegungsabläufe mit deren Krafteinflüssen nahezu praxisidentisch zu simulieren, mit Sicherheit bestätigt werden.

Anwendungsbereiche über die hier gezeigten Beispiele aus dem Bereich der Kinderrückhaltesysteme hinaus finden sich in der heutigen Umwelt zu genüge.

Die Aussage, Weiterentwicklung auf Grund zu hoher Kosten im Praxisversuch einzuschränken, dürfte somit keinen Halt mehr haben. Vorhandene aufwendige Rechnersysteme, die bei Herstellern vieler Produkte nur dem Design dienen, könnten problemlos mit diesen Programmen bestückt werden und von den Entwicklungsteams nach überschaubarer Einarbeitungszeit während des Entwicklungsprozesses parallel genutzt werden.

Da wie zu Anfang der Arbeit erwähnt, der Qualitätsanspruch der Konsumenten an alle Produkte wächst, soll das Ergebnis dieser Arbeit dazu beitragen, dass die der Einführung von Simulationssoftware in der Produktentwicklung bei dynamischen Problemen ein positive Wirkung auslöst zum Vorteil bezüglich der Qualität und der Kosten neuer Produkte.

## 9 Literaturliste

- [BaB89] Ballreich, R. (Hrsg.), Baumann, W. (Hrsg.): Grundlagen der Biomechanik des Sports, Enke, 1988
- [BaK95] Balasubramanian, B. Katzenbach, A.: Simulation im Automobilbau - von der Idee bis zum Kundenfahrzeug, VDI-Berichte 1215, VDI, 1995
- [Bau89] Baumann, W.: Grundlagen der Biomechanik, Karl Hofmann, 1989
- [BeK95] Beitz, W. (Hrsg.), Küttner, K.-H. (Hrsg.): Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau, Springer, 1995
- [Bir77] Birkner, R.: Das typische Röntgenbild des Skeletts, Urban & Schwarzenberg, 1977
- [BrF93] Breiing, A. Flemming, M.: Theorie und Methoden des Konstruierens, Springer, 1993
- [BrP92] Bremer, H. Pfeiffer, F.: Elastische Mehrkörpersysteme, Teubner, 1992
- [Cak97] Cakmak, M.: Beitrag zur Modellreduzierung bei der Simulation von Seitencrashes, VDI-Berichte 1283, VDI, 1997
- [CKP95] Crandall, J. R., Kuhlmann, T. P., Pilkey, W. D.: Laboratory Sled Tests with Human Cadavers and the Hybrid III Dummy, The Journal Of Trauma No. 4, 1995
- [Dvo93] Dvorák, V.: Biomechanik der Halswirbelsäule, aus „Die Beschleunigungsverletzung der Halswirbelsäule“, Gustav Fischer, 1993
- [ECE99] ECE-R 44: Einheitliche Vorschriften für die Genehmigung der Rückhalteeinrichtungen für Kinder in Kraftfahrzeugen, Economic Commission for Europe, 1999
- [Fal88] Faller, A.: Der Körper des Menschen, Georg Thieme, 1988
- [FFR97] Fausel, J., Fischer, T., Rothfuß, C: Smart: Superkompakt und sicher, VDI-Berichte 1354, VDI, 1997
- [Fou94] Fountain, M.: Techniques for Modelling the Hybrid III Neck, RMIT (Australia), aus „Proceedings 5<sup>th</sup> International MADYMO User's Meeting“, 1994
- [FrL93] Fraterman, E., Lupker, H. A.: Evaluation of Belt Modelling Techniques, TNO, Delft, 1993
- [FrN94] Fredriksson, L. A., Nilsson, L.: An Advanced Finite Element Data Base of the Hybrid III Test Dummy: Phase I Model Generation and Sled Test Validation, Second International LS-DYNA3D Conference, 1994

- [Göt98] Götz, C.: Entwicklung eines Finite-Elemente Modells des menschlichen Schädels zur Simulation von Stößen, Fakultät für Physik der Eberhard-Karls-Universität zu Tübingen, 1998
- [GrM95] Grandel, J., Müller, C.-F.: Fahrzeugsicherheit und Crash-Tests, DEKRA Fachzeitschrift 49, 1995
- [Har95] Harder, K.: Simulationsbasierte Kostenabschätzung - ein strategischer Baustein für die Simulationseinführung, VDI-Berichte 1215, VDI, 1995
- [HaT94] Happee, R., Thunnissen J. G. M: Advances in human body modelling using MADYMO, TNO, Delft, 1994
- [HJV93] Huijskens, C. G., Janssen, E. G., Verschut, R.: The Influence of Asymmetrical Lower Belt Anchorage Locations on the Crash Performance of Child Restrained Systems, TNO Crash-Safety Research Centre, Delft (NL), 1993
- [HoR97] Hoffmann, H.-P., Rüter, G.: Einfluss fahrzeugseitiger Parameter auf die Schutzwirkung von Kindersicherungseinrichtungen beim Frontalaufprall, ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 99, 1997
- [HWT77] Harrison, G. H., Weiner, J. S., Tanner, J. M., u. a.: Human Biology, An Introduction to Human Evolution, Variation, Growth and Ecology, Oxford University Press, Oxford, 1977
- [JHV93] Janssen, E. G., Huijskens, C. G., Verschut, R., u. a.: Cervical Spine Loads Induced in Restrained Child Dummies II, TNO Crash-Safety Research Centre, Delft (NL), 1993
- [JNV91] Janssen, E. G., Nieboer, J. J., Verschut, R., u. a.: Cervical Spine Loads Induced in Restrained Child Dummies, TNO Crash-Safety Research Centre, Delft (NL), 1991
- [Kat95] Katzenbach, A.: Verkürzung der Entwicklungszeit durch digitale Produktfestlegung, VDI-Berichte 1215, VDI, 1995
- [KMP89] Kik, W., Möller, G., Rulka, W.: SIMPACK - ein Programm zur Simulation von Mehrkörpersystemen, VDI-Berichte 786, VDI, 1989
- [Kol85] Koller, R.: Konstruktionslehre für den Maschinenbau, Springer, 1985
- [LaH89] Langwieder, K., Hummel, T.: Kinder im PKW - Ihr Verletzungsrisiko und der Einfluss von Kinderschutzsystemen, HUK-Verband, München, 1989
- [Lav00] Lavante, E. von: Skript zur Vorlesung Ingenieurinformatik II / numerische Methoden, Universität Essen, 2000
- [LHF90] Langwieder, K., Hummel, T., Felsch, B., u. a.: Injury Risks of Children



- in Cars, HUK-Verband, München, 1990
- [Lip01] Lippeck, A.: Entwicklung und Anwendung einer Richtlinie zur Modellbildung und Simulation hybrider biomechanischer Mehrkörpersysteme, Dissertation Universität Essen 2001
- [LiS95] Lippeck, A., Schlacht, T.: Optimierung der Montagemöglichkeiten von Kinderrückhaltesystemen in serienmäßigen Personenkraftwagen, Diplomarbeit, Ruhr-Universität Bochum, 1995
- [MeD95] Mechanical Dynamics: The Very Real Benefits of Virtual Prototyping, Reprint von CiME (Computer Integrated Manufacture and Engineering), Dezember / Januar 1995
- [MeD96] Mechanical Dynamics: Vers la simulation du plus tot (Towards early simulation, Englische Version), Reprint von Harvest - Le journal des bureaux d'études No. 37, November / Dezember 1996
- [MüS89] Müller, G., Schuebbe, M.: Dynamische Berechnungen mit dem Finite-Elemente-Programm ANSYS, VDI-Berichte 786, VDI, 1989
- [Pau65] Pauwels, F.: Gesammelte Abhandlungen zur funktionellen Anatomie des Bewegungsapparates, Springer 1965
- [Pre99] Prescher, V. B.: Wirtschaftliche Methode zur technischen Auslegung von Frontal-Rückhaltesystemen in Personenkraftwagen – Verifikation am Beispiel eines Kleinstfahrzeuges, 1999
- [RaK87] Rauber (Hrsg.), Kopsch (Hrsg.): Anatomie des Menschen, Georg Thieme, 1987
- [Rom89] Rompe, K. (Hrsg.): Unfallschutz der Fahrzeuginsassen in Europa, TÜV-Rheinland, 1989
- [Sch00] Schewe, H.: Biomechanik, Thieme, 2000
- [Schm95] Schmidt, B.: Simulation - Brauchbares Werkzeug oder technologischer Traumtanz?, VDI-Berichte 1215, VDI, 1995
- [Sei92] Seifert, H.: Grundzüge des methodischen Vorgehens bei der Synthese von Maschinen des Stoff-, Energie- und Signalumsatzes, Kurzfassung der Vorlesung „Konstruktionslehre / CAD“, Ruhr-Universität Bochum, 1992
- [Stü81] Stürtz, G. (Hrsg.): Das Kind im Verkehrsunfall, VDI, 1981
- [Stra00] Stracke, H. J.: Skript zur Vorlesung Ingenieurinformatik / CAD, Universität Essen, 2000
- [TrN97] Treufeld, E., Noeske, V.: Zum Stand des Sicherheitspotentials von Rückhalteeinrichtungen für Kinder, VDI-Berichte 1354, VDI, 1997

- 
- [VDI98] VDI: Prozessketten für die virtuelle Produktentwicklung in verteilter Umgebung, VDI, 1998
- [WHH94] Wolf, C.-D., Hendel, K., Härtel, T.: Dynamik-Simulation von Kollisionsvorgängen zwischen einem PKW und einem Fahrradfahrer, VDI-Berichte 1153, VDI, 1994
- [WMD97] Walz, F., Muser, M., Dippel, C., u. a.: Sicherheits-Sitz für Leichtfahrzeuge – Verminderung von Halswirbelsäulenverletzungen bei Heckkollisionen, VDI-Berichte 1354, VDI, 1997
- [WoM96] Working Model: Vers. 1.0, Computer Software, Knowledge Revolution, San Francisco, CA, USA