



**Masterarbeit**  
**Reglerentwurf zur Crashpulsauslegung**

**vorgelegt von**  
**Georg Stettinger**

**in Zusammenarbeit mit**  
**Kompetenzzentrum - Das Virtuelle Fahrzeug**  
**Magna Steyr Fahrzeugtechnik (MSF)**

**Begutachter:**  
**Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Martin Horn**

**Betreuer:**  
**Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Martin Horn**

**Institut für Regelungs- und Automatisierungstechnik**  
**Technische Universität Graz**  
**Kopernikusgasse 24/II**  
**8010 Graz**

**Graz, im November 2010**

**EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

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

Graz, am .....

.....

(Unterschrift)

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich bei der Verfassung dieser Diplomarbeit unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn **Univ. Prof. Dr. techn. Dipl. Ing. Martin Horn**, Institut für Regelungs- und Automatisierungstechnik Graz, für die engagierte Betreuung und die stetige Bemühung, diese Diplomarbeit zu verwirklichen. Ich konnte mich immer mit Fragen und Problemen an ihn wenden und durch seine hilfreichen Ratschläge wurde mir die Verfassung dieser Arbeit erleichtert.

Mein weiterer Dank gilt den Herren **Dipl. Ing. Werner Leitgeb** und **Dipl. Ing. Dr. techn. Andreas Rieser**, Kompetenzzentrum - Das virtuelle Fahrzeug, für die freundliche Unterstützung und die Hilfestellung bei allen Fragen aus dem Bereich der Fahrzeugsicherheit und bei der Durchführung der zahlreichen Finiten Elementen Simulationen.

Weiters möchte ich mich noch speziell bei **Dipl. Ing. Werner Leitgeb** für das Korrekturlesen meiner Masterarbeit bedanken.

Der Dank gilt auch meinen Eltern, die mich in jeder Hinsicht unterstützt haben und mir das Studium in dieser unbeschwerten Form ermöglicht haben. Mein persönlicher Dank gilt nicht zuletzt Frau Dr. med. univ. Katharina Simon, die mir stets zur Seite steht und eine beständige Stütze in meinem Leben ist.

## Kurzfassung

Diese Masterarbeit beschäftigt sich mit dem Thema Fahrzeugsicherheit bei Frontalkollisionen. Ziel ist es, die Fahrzeugsicherheit bei Frontalkollisionen zu erhöhen.

Dazu wurde zunächst die Modellbildung des Schlittenversuchs durchgeführt, um ein mathematisches Modell der Strecke, die den Bewegungsvorgang des Insassen während des Fahrzeugcrashs ausreichend beschreibt, zu erhalten.

Mit diesem Modell wurde eine Regelung entworfen, die einen vorhandenen Crashpuls (Beschleunigungsverlauf des Fahrzeugs der durch den Crashvorgang hervorgerufen wird) derart verändert, dass die relevanten Dummybelastungswerte reduziert werden. Die entworfene Folgeregelung sorgt dafür, dass ein relevanter Dummybelastungswert reduziert wird (hier: der HIC-Wert). Durch die Reduktion des HIC-Wertes verringern sich die restlichen relevanten Dummybelastungswerte in den meisten Fällen ebenfalls. Weiters wurde darauf geachtet, dass man auf realistische Weise in den Puls eingreift, d.h. der Puls wird nur an jenen Stellen verändert, die auch in der Realität Änderungen erlauben. Dieser realistische Pulseingriff wurde durch die Wahl der Führungsgröße berücksichtigt. Durch die Wahl der Führungsgröße ergab sich bei allen Simulationen eine Reduktion des HIC-Wertes.

## Abstract

This master thesis deals with vehicle safety. The aim of this master thesis is to improve the vehicle safety during a frontal impact.

To realize this, a model of a sled test is created to get a mathematical model describing the driver's motion during the frontal impact of a car sufficiently detailed.

With this model of the frontal crash a controller is designed in order to modify the original crash pulse in such a way that especially one relevant injury criterion of the dummy gets positively influenced. The controller for tracking reduces the HIC-value (head injury criteria is the relevant injury criteria of the dummy chosen in this master thesis) so that the probability for head injuries is reduced. Typically all other relevant injury criteria of the dummy are also positively influenced when the HIC-value gets reduced. Furthermore it is important that the controller modifies the current crash pulse in a realistic way. This realistic modification of the original pulse is realized by the choice of the reference signal which the designed controller has to track. In all simulations the HIC-value gets reduced due to the choice of the reference signal.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b><i>Einleitung</i></b> .....	<b>1</b>
1.1	<b>Aufgabenstellung</b> .....	<b>1</b>
1.2	<b>Biomechanik</b> .....	<b>1</b>
1.2.1	Der Kopf .....	2
1.2.2	Schutzkriterien .....	2
1.2.3	Gesetzlich festgelegte Schutzkriterien für den Kopf.....	5
1.3	<b>Crash Test Dummies</b> .....	<b>6</b>
1.4	<b>Sicherheit im Straßenverkehr</b> .....	<b>7</b>
1.5	<b>Unfallforschung</b> .....	<b>9</b>
1.5.1	Unfallrekonstruktion.....	10
1.6	<b>Überprüfung und Bewertung der Sicherheit</b> .....	<b>12</b>
1.6.1	Gesetzgebung .....	12
1.6.2	Verbraucherschutztests .....	15
1.7	<b>Sicherheitsmaßnahmen</b> .....	<b>17</b>
1.7.1	Maßnahmen zum Selbstschutz .....	18
1.8	<b>Experimentelle Simulation</b> .....	<b>20</b>
1.8.1	Versuchsarten .....	21
1.9	<b>Der Crashpuls</b> .....	<b>24</b>
1.10	<b>Zusammenhang zwischen Crashpuls und Dummybelastung</b> .....	<b>27</b>
<b>2</b>	<b><i>Pulsauslegung</i></b> .....	<b>30</b>
2.1	<b>Stand der Technik</b> .....	<b>30</b>
2.2	<b>Komponenten zur Beeinflussung der Insassenbelastung</b> .....	<b>30</b>
2.3	<b>Zukunftsaussichten zum Thema Insassenschutz</b> .....	<b>36</b>
2.4	<b>Vorgangsweise und Ziele dieser Masterarbeit</b> .....	<b>38</b>
<b>3</b>	<b><i>Modellbildung</i></b> .....	<b>41</b>
3.1	<b>Physikalisches Modell</b> .....	<b>42</b>
3.2	<b>SimMechanics Modell</b> .....	<b>48</b>
3.3	<b>Ausgangsgröße der Strecke</b> .....	<b>54</b>
3.4	<b>Modellverifikation, Parameterbestimmung</b> .....	<b>54</b>
<b>4</b>	<b><i>Regelung</i></b> .....	<b>58</b>

<b>4.1</b>	<b>Regelkreisstruktur .....</b>	<b>58</b>
<b>4.2</b>	<b>Exakte Linearisierung .....</b>	<b>58</b>
4.2.1	Bestimmung des relativen Grades .....	59
4.2.2	Ermittlung der Kompensation .....	60
4.2.3	Modifikation der Kompensation .....	60
<b>4.3</b>	<b>Reglerentwurf .....</b>	<b>62</b>
<b>4.4</b>	<b>Generierung der Führungsgröße.....</b>	<b>63</b>
<b>5</b>	<b><i>Simulation</i> .....</b>	<b>64</b>
<b>5.1</b>	<b>FE-Modell .....</b>	<b>64</b>
<b>5.2</b>	<b>Konfiguration.....</b>	<b>64</b>
<b>5.3</b>	<b>Kopplung zwischen Matlab/Simulink und FE-Solver LS DYNA .....</b>	<b>66</b>
<b>5.4</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>66</b>
5.4.1	FE-Differenzgeschwindigkeit des unveränderten Pulses als Führungsgröße ohne Kopplung mit der FE-Simulation .....	66
5.4.2	Regelungslogik .....	69
5.4.3	Test der entworfenen Pulsregelung.....	71
5.4.4	Neudefinierter Verlauf der Differenzgeschwindigkeit als Führungsgröße mit Kopplung zur FE-Simulation .....	72
5.4.5	Beschränkung der originalen FE-Differenzgeschwindigkeit als Führungsgröße mit Kopplung zur FE-Simulation .....	79
<b>6</b>	<b><i>Schlussfolgerungen und Ausblick</i> .....</b>	<b>87</b>
<b>6.1</b>	<b>Fazit .....</b>	<b>87</b>
6.1.1	Regelung .....	87
6.1.2	Auswirkung auf den Dummy.....	87
<b>6.2</b>	<b>Ausblick.....</b>	<b>88</b>
<b>7</b>	<b><i>Verzeichnisse</i>.....</b>	<b>89</b>
<b>7.1</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>89</b>
<b>7.2</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>90</b>
<b>7.3</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>90</b>
<b>7.4</b>	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>92</b>
<b>8</b>	<b><i>Anhang</i> .....</b>	<b>93</b>

# 1 EINLEITUNG

## 1.1 Aufgabenstellung

Ziel dieser Masterarbeit ist es, die Fahrzeugsicherheit bei Frontalkollisionen zu erhöhen. Dies geschieht durch eine gezielte Veränderung des vorhandenen Crashpulses durch eine Regelung. Als Crashpuls wird jener Beschleunigungsverlauf des Fahrzeugs bezeichnet, der durch den Crashvorgang hervorgerufen wird. Der Regler verändert dabei den vorhandenen Puls so, dass vor allem der relevante Dummybelastungswert für die Kopfverletzungswahrscheinlichkeit (HIC-Wert) reduziert wird. Typischerweise werden durch die Reduktion des HIC-Wertes auch die restlichen relevanten Dummybelastungswerte reduziert. Daher wird bei dieser Vorgangsweise der Crashpuls auf die Dummybelastungswerte hin ausgelegt. Als Ausgangssituation wird der Frontalcrash nach US-NCAP verwendet.

## 1.2 Biomechanik

Die Biomechanik beschäftigt sich in der aktiven Fahrzeugsicherheit mit ergometrischen und dynamometrischen Aspekten und deren Einflussfaktoren. Das Ziel der Biomechanik im Zusammenhang mit der passiven Sicherheit ist es, die Verletzungsmechanik bei Unfallopfern zu analysieren und objektive Kriterien zur Unterscheidung von reversiblen und irreversiblen Verletzungen bereitzustellen. Die Mechanik ist deshalb von großer Bedeutung, weil sich die Entstehung und das Ausmaß von Verletzungen auf physikalische Belastungen zurückführen lassen, während die Antwort des Körpers auf die physikalische Belastung in der Biologie begründet ist. Somit ist die Entwicklung von Schutzkriterien, die den Grad der Beanspruchung des menschlichen Körpers festlegen, im eigentlichen Sinn Mechanik. Die Aufgabe von Sicherheitsingenieuren ist es nun, das Fahrzeug und dessen Einrichtungen so auszulegen, dass eine zulässige Beanspruchung nicht überschritten wird bzw. dass unzulässig hohe Belastungen vermieden werden [1].

### 1.2.1 Der Kopf

Der exponierteste und gefährdetste Körperteil bei Verkehrsunfällen ist der Kopf, wie in der folgenden Abbildung verdeutlicht ist [1].

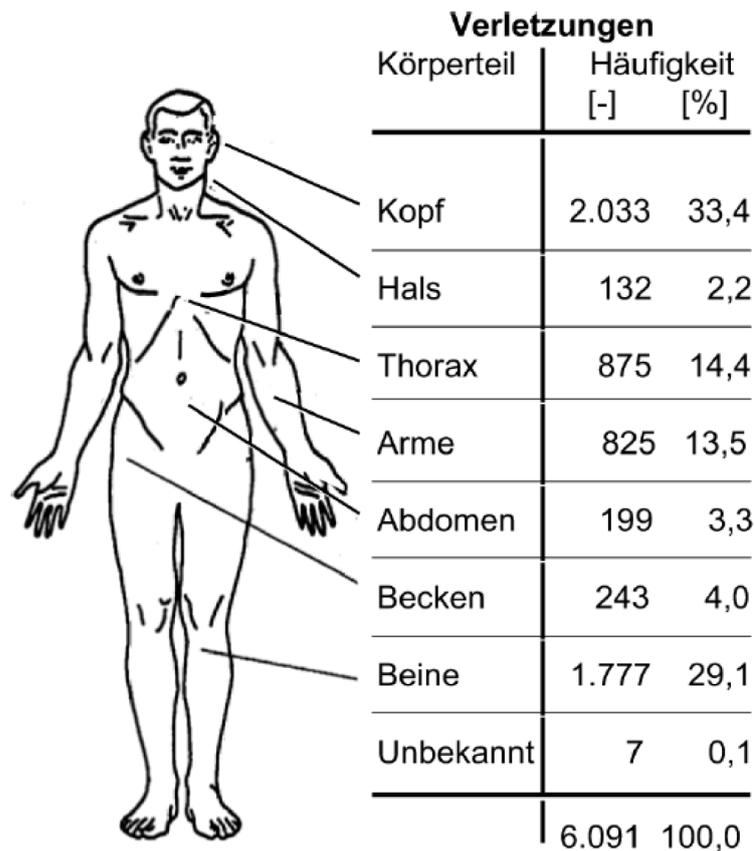


Abbildung 1: Körperteil-spezifische Verletzungen von PKW-Insassen bei Frontalkollisionen [1]

Da der Kopf bei Frontalkollisionen sehr gefährdet ist, ist man bestrebt, einen wirksamen Schutz vor Verletzungen zu entwickeln, da bis heute Verletzungen der Gehirnstruktur nicht ausheilbar sind [1].

### 1.2.2 Schutzkriterien

Biomechanische Untersuchungen versuchen jene Faktoren zu bestimmen, die für die Art und den Grad der Verletzung zuständig sind. Das Ziel ist es, einen funktionalen Zusammenhang zwischen der Verletzung und der mechanischen Einwirkung zu finden. Daher versucht man Schutzkriterien festzulegen, die sicherstellen, dass der Verletzungsgrad des Insassen einen gewissen Wert nicht übersteigt. Schutzkriterien

sind jene Belastungsgrößen, welche am Dummy selbst gemessen werden und mit den Verletzungskriterien des menschlichen Körpers in Beziehung gesetzt werden. Hierzu legt man Test-Grenzwerte für bestimmte Testsituationen fest. Diese Grenzwerte leiten sich aus dem Schutzbedürfnis und den technischen und konstruktiven Möglichkeiten ab. Als Beispiel ist hier das Head Injury Criterion (HIC) zu nennen mit einem Level von HIC=1000. Dieser Level ist in der europäischen Sicherheitsgesetzgebung angeführt. Anzumerken ist hier noch, dass der Test-Grenzwert deutlich unter dem Level liegt (bei ca. HIC=700 bis 750), damit auch bei einer ausgeprägten Versuchsstreuung der Schutzkriterien-Level nicht überschritten wird [1].

### 1.2.2.1 Schutzkriterien-Levels für den Kopf

Schutzkriterien-Levels für den Kopf werden aus den resultierenden, translatorischen Beschleunigungen, die im Kopfschwerpunkt des Dummies auftreten, gebildet. Dazu zählen das Kopfverletzungskriterium HIC (Head Injury Criterion), das Maximum des zeitlichen Beschleunigungsverlaufes  $a_{\max}$  und der Beschleunigungswert  $a_{3\text{ms}}$ , der über einen gemessenen Zeitverlauf von 3ms andauert. Somit ist das Head Injury Kriterium ein Maß für die Kopfverletzungen (Hirnverletzungen).

Die als Grenzwert anzusehende Schwelle des HIC liegt nach FMVSS 208 bei 390 bis 700 [1]. Die Formulierung des Ausdruckes

$$HIC = \max \left\{ \left[ \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} \cdot (t_2 - t_1) \right\}$$

mit den Einheiten  $a(t)$  in Vielfachen der Erdbeschleunigung  $g$  im  $[\text{m/s}^2]$  und  $t_1$  bzw.  $t_2$  in  $[\text{s}]$  entspricht der mathematischen Formulierung der WSU-Kurve. Die WSU-Kurve ist die Wayne State University Cerebral Concussion Tolerance Curve [1], die als Grenzkurve zwischen lebensgefährlichen und nicht lebensgefährlichen Hirnverletzungen ermittelt wurde. Bei der Verwendung des HIC sind folgende Randbedingungen einzuhalten [1]:

- Anprall des Kopfes im Stirnbereich auf Strukturen
- Filtercharakteristik und numerische Behandlung bei der rechnergestützten Datenverarbeitung des gemessenen Beschleunigungsverlaufes

Oft wird jedoch in der Praxis bei der Simulation die Randbedingung des Kopfaufpralls nicht berücksichtigt, weshalb in den gesetzlichen Anforderungen die Kriterien  $HIC_{15}$  und  $HIC_{36}$  eingeführt werden. Hier wird der HIC-Wert nur in einem Intervall von 15 bzw. 36ms betrachtet. Das 15ms Zeitintervall steht für den steifen, harten Aufprall und das 36ms Zeitintervall für den weicheren Kopfaufprall. Die beiden Kriterien-Levels  $HIC_{15}=700$  und  $HIC_{36}=1000$  stehen direkt zueinander in Beziehung. Weiters ist noch anzumerken, dass der HIC-Wert bei sonst gleichbleibenden Bedingungen stark von der Charakteristik des Beschleunigungsverlaufes abhängig ist. In der nachfolgenden Abbildung sind die WSU-Kurve und der  $a_{3ms}$ -Wert nach FMVSS 208 graphisch dargestellt [1]:

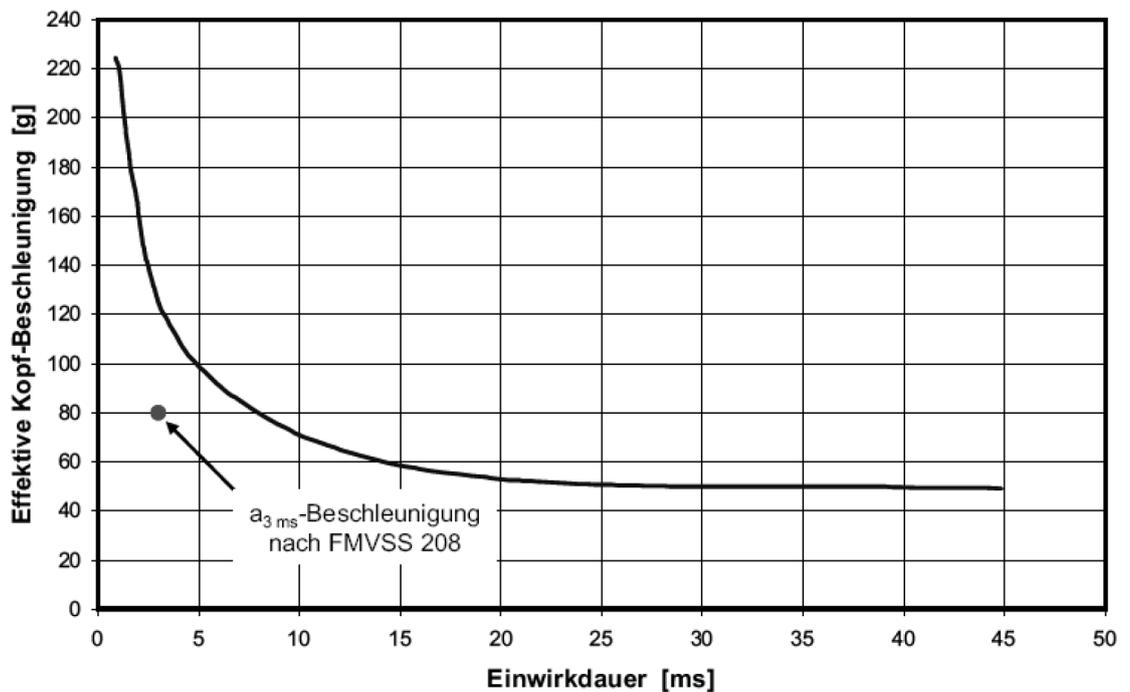


Abbildung 2: WSU-Kurve und  $a_{3ms}$ -Wert nach FMVSS 208 [1]

In der nachfolgenden Abbildung sind die Schutzkriterien und Schutzkriterien-Levels nach FMVSS 208 in Abhängigkeit von der Dummy-Größe und der Testkonstellation dargestellt [1]:

Sicherheitsstandard	FMVSS 208 alt	FMVSS 208 – Final rule					
Dummy-Größe	HIII 50 %	HIII 50 %	HIII 5 %		6-jährig	3-jährig	12-monatig
Test-Konstellation		in Position dynamisch	in Position dynamisch	OoP statisch	OoP statisch	OoP statisch	OoP statisch
Schutzkriterien	Schutzkriterien-Level						
Kopf HIC	1.000 <sub>(36)</sub>	700 <sub>(15)</sub>	700 <sub>(15)</sub>	700 <sub>(15)</sub>	700 <sub>(15)</sub>	570 <sub>(15)</sub>	390 <sub>(15)</sub>
Genick-Kriterium $N_{ij}$	---	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Genick $F_{z \text{ krit}}$ [N] Zugbelastung	---	6.806	4.287	3.880	2.800	2.120	1.460
Genick $F_{z \text{ krit}}$ [N] Druckbelastung	---	6.160	3.880	3.880	2.800	2.120	1.460
Genick $M_{y \text{ krit}}$ [Nm] Beugung	---	310	155	155	93	68	43
Genick $M_{y \text{ krit}}$ [Nm] Streckung	---	135	67	61	37	27	17
Genick $F_{z \text{ max}}$ [N] Zugbelastung	---	4.170	2.620	2.070	1.490	1.130	780
Genick $F_{z \text{ max}}$ [N] Druckbelastung	---	4.000	2.520	2.520	1.820	1.380	960
Brust $a_{3 \text{ ms}}$ - Beschleunigung [g]	60	60	60	60	60	55	50
Brust-Eindrückung [mm]	76	63	52	52	40	34	keine Angabe
Oberschenkel- Längskraft [kN]	10,0	10,0	6,8	6,8	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe

Abbildung 3: Schutzkriterien und -kriterien-Levels nach FMVSS 208 [1]

### 1.2.3 Gesetzlich festgelegte Schutzkriterien für den Kopf

Die in der internationalen Sicherheitsgesetzgebung festgelegten Schutzkriterien-Levels gewährleisten nur ein Mindestmaß an passiver Sicherheit, da sie nicht den aktuellen Stand der Technik widerspiegeln. Sie sind vielmehr ein Konsens zwischen Forschung, Entwicklung und gesellschaftlichem Anspruch aus der Zeit der Verabschiedung. Die heute geltenden Vorschriften und Regelungen stammen fast ausschließlich aus den von der US-amerikanischen Verkehrsbehörde (Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration) erlassenen Vorschriften (FMVSS = Federal Motor Vehicle Safety Standard). Diese beziehen sich unter anderem auf die Insassen

bei Frontalkollisionen [1]. In dieser Masterarbeit werden die Vorschriften des FMVSS 208 für den Frontalcrash herangezogen.

### 1.3 Crash Test Dummies

Zur experimentellen Simulation verwendet man heute fast ausschließlich anthropometrische Messpuppen (ATD = Anthropomorphic Test Device), die sogenannten Dummies. Diese besitzen im Kopf, in der Brust, in der Hüfte und in den Oberschenkeln Beschleunigungs-, Weg-, Kraft- und Drehmomentsensoren. Heutzutage verwendet man bereits die fünfte Generation für die Unfallsimulation. Das größte Problem dieser Dummies besteht in der Herstellung der Puppe. Die Puppe soll einerseits dem Menschen möglichst ähnlich und damit äußerst komplex sein, aber gleichzeitig reproduzierbare Ergebnisse liefern, was nur dann möglich ist, wenn sie möglichst einfach aufgebaut ist. Die Dummies werden so konstruiert, dass Größe, Form, Massenverteilung, Kinematik und Gelenkmomente möglichst ähnlich jenen des Menschen sind. Sie bestehen normalerweise aus einem Skelett aus Metall oder Kunststoff und die Körperteile sind gelenkig miteinander verbunden. Muskeln und Weichteile werden durch Kunststoffschaum nachgebildet. Die Körperoberfläche besteht aus einer abnehmbaren Kunststoffhaut. Bei der Konstruktion des Dummies ist es besonders wichtig, dass die Messergebnisse bei gleichen Versuchsbedingungen reproduzierbar sind. Beim Crashtest werden die gemessenen Belastungen mit den Schutzkriterien-Levels verglichen und je nach Erfüllung bzw. Nichterfüllung auf die Überlebenswahrscheinlichkeit geschlossen. Die Dummybelastungswerte während des Crashvorganges entscheiden über die KFZ-Zulassung.

Zur experimentellen Überprüfung von Kraftfahrzeugen benötigt man hochentwickelte Dummies. Heutzutage wird weltweit der von General Motors entwickelte HYBRID III als Dummy für den Frontalaufprall gegen eine starre Barriere nach FMVSS 208 und bei Forschungsaktivitäten in diesem Bereich verwendet. Beim HYBRID III können bis zu 60 Messkanäle ausgelesen werden. In den Versuchen zur Überprüfung der Fahrzeugsicherheit kommt unter anderem der 50% Percentile-Dummy zum Einsatz d.h.: 50% der männlichen Population sind kleiner als der 50%-Wert, der den

Durchschnittswert der Häufigkeitsverteilung einer anthropometrischen Reihenuntersuchung repräsentiert [1].

In der nächsten Abbildung ist der HYBRID III Dummy mit den Messstellen dargestellt:

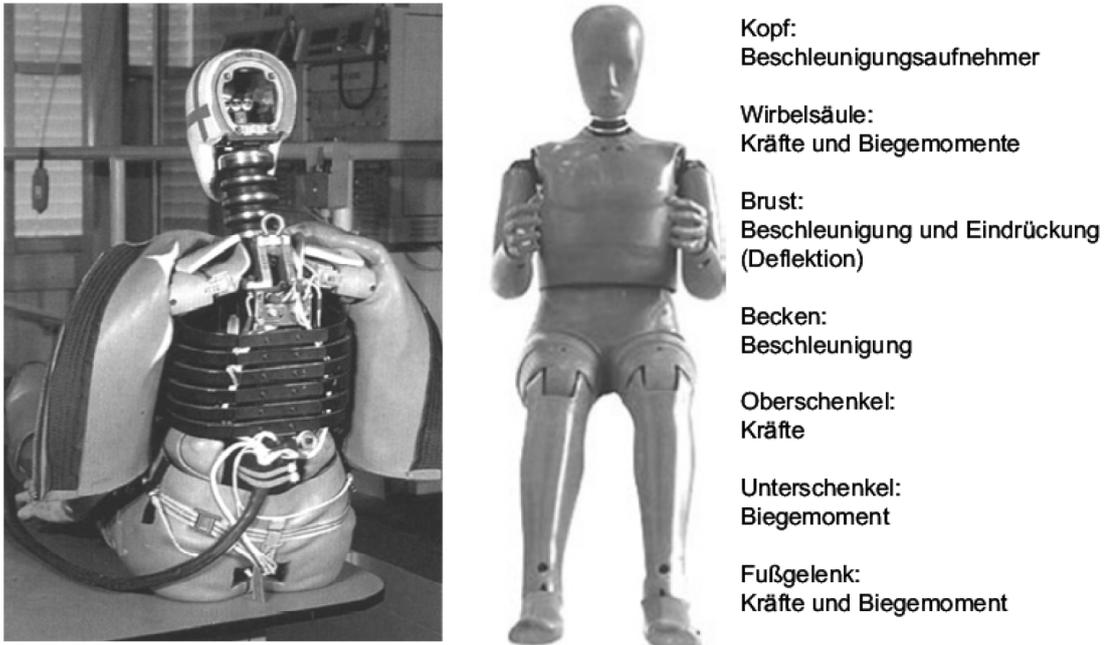


Abbildung 4: HYBRID III Dummy - Struktur und Messstellen [1]

## 1.4 Sicherheit im Straßenverkehr

Die Straßenverkehrssicherheit zielt auf den Menschen, auf das Kraftfahrzeug und auf die Umwelt ab. Man unterscheidet nach unfallvermeidenden Maßnahmen die sogenannte „aktive Sicherheit“ und nach unfallfolgenmindernden Maßnahmen die sogenannte „passive Sicherheit“. Die Sicherheitsmaßnahmen lassen sich in Maßnahmen unterteilen, die den Menschen, das Fahrzeug und die Umwelt hinsichtlich der Unfallprävention bzw. Unfallfolgenminderung beeinflussen, wie in nachfolgender Abbildung graphisch verdeutlicht wird [1]:



Abbildung 5: Teilbereiche der Straßenverkehrssicherheit und Beispiele für Sicherheitsmaßnahmen [1]

Im Bereich der passiven Sicherheit werden die Handlungsprioritäten in erster Linie aus der Unfallforschung abgeleitet. Die Unfallforschung selbst besteht aus der Unfalldatenerhebung, der Unfallstatistik, der Unfallrekonstruktion und der Unfallanalyse. Mit Hilfe der Kenntnisse aus der Biomechanik werden die Sicherheitsmaßnahmen entwickelt, ausgelegt und im Versuch erprobt. Die rechnerische Simulation besitzt einen sehr hohen Stellenwert. Nahezu die gesamte Fahrzeugauslegung wird mit Hilfe der rechnerischen Simulation durchgeführt. Die Realfahrzeugversuche dienen zur Validierung/ Überprüfung der Simulation [1].

In der nachfolgenden Abbildung sind die Wirkungsbereiche der passiven Sicherheit graphisch verdeutlicht [1]:

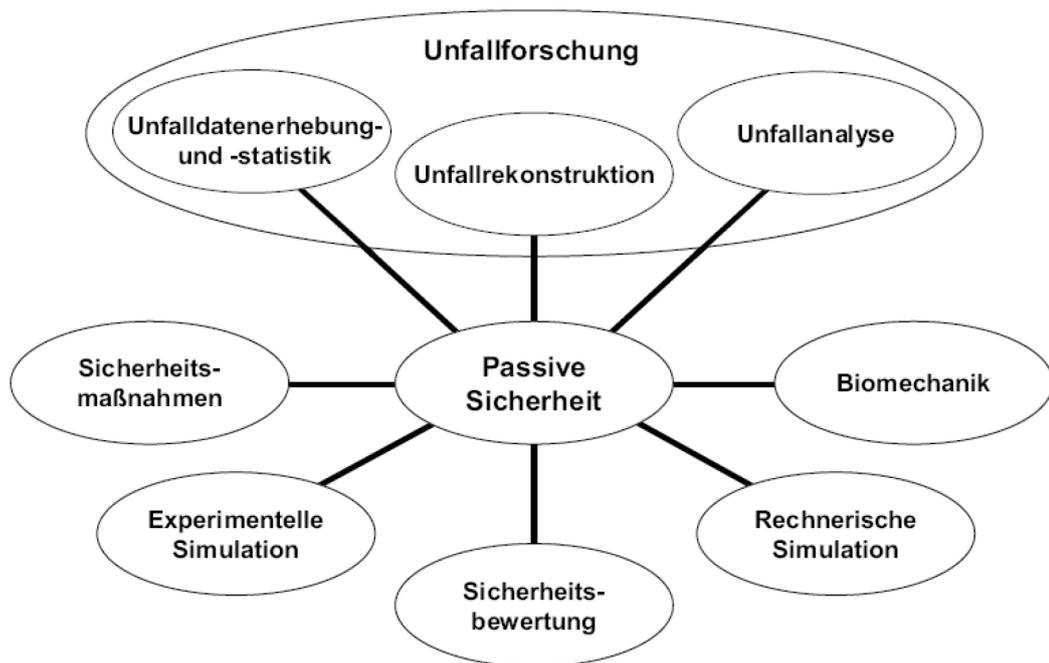


Abbildung 6: Die passive Sicherheit von KFZ und ihre Wirkungsbereiche [1]

## 1.5 Unfallforschung

Die Unfallforschung lässt sich in drei Teilbereiche unterteilen:

- Unfalldatenerhebung und -statistik
- Unfallrekonstruktion
- Unfallanalyse

Die Unfallforschung hat zur Aufgabe, die Unfallursachen aufzuklären. Die Umsetzung der erlangten Erkenntnisse durch die Technik, Medizin und Psychologie führen dann zu einer Verbesserung der Sicherheit im Straßenverkehr. Im technischen Bereich der Unfallforschung werden Simulationen durchgeführt, um charakteristische Größen zu erhalten, die das Verhalten von Mensch, Fahrzeug und Umwelt während des Unfallvorgangs beschreiben. Die Insassen werden entweder experimentell mit Dummies, Leichen oder Freiwilligen simuliert und/oder durch mathematische Modelle nachgebildet. Aus diesen Größen kann auf den Grad der Verletzung des Menschen und auf die Beschädigung am und im Fahrzeug geschlossen werden. Aus ihnen kann eine

Sicherheitsauslegung festgelegt werden, die zur Verbesserung der Straßenverkehrssicherheit führt [1].

In der folgenden Abbildung ist die Unfallforschung mit der Umsetzung der Erkenntnisse in den diversen Disziplinen dargestellt [1]:

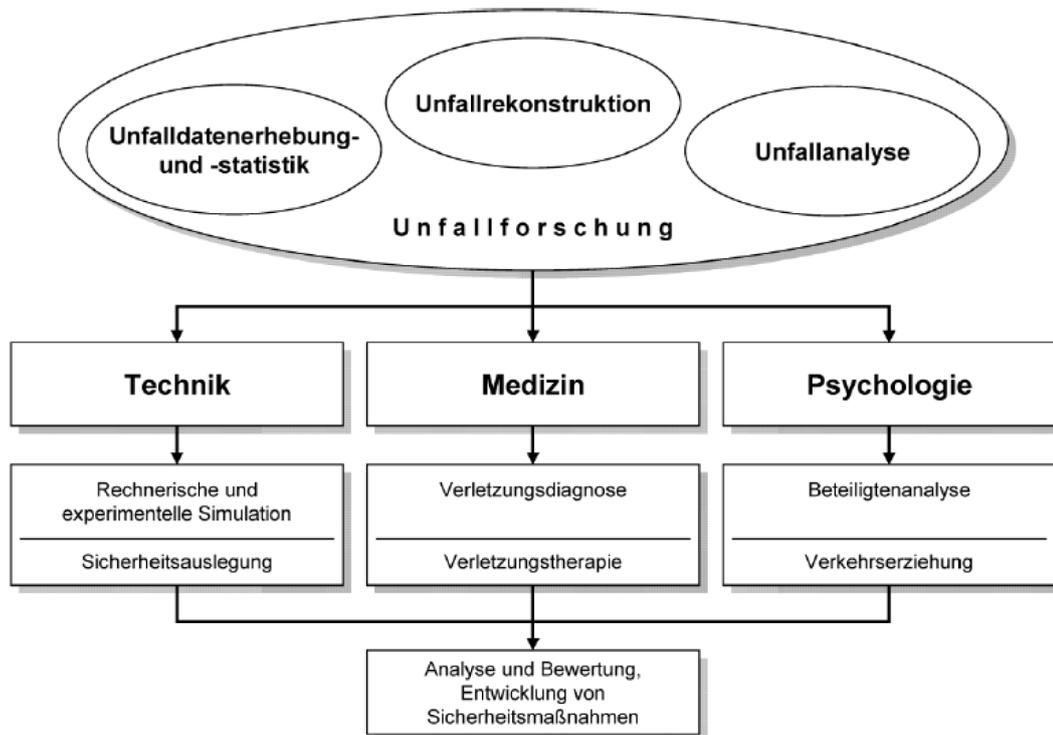


Abbildung 7: Unfallforschung und Umsetzung der Erkenntnisse in verschiedenen Disziplinen [1]

### 1.5.1 Unfallrekonstruktion

Bei der Unfallrekonstruktion unterscheidet man zwischen zwei Methoden:

- Rechnerische Simulation
- Experimentelle Simulation

Bei der rechnerischen Simulation kommen drei unterschiedliche Verfahren zur Anwendung:

- Kinematische Analyse
- Stoßrechnung
- Kraftrechnung

### **Kinematische Analyse:**

Kinematische Betrachtungen können in sehr einfachen Fällen oft schon ausreichend sein, wenn es nicht auf den Stoßvorgang ankommt.

### **Stoßrechnung:**

Der Stoßrechnung liegen drei Erhaltungssätze zugrunde: der Energie-, der Impuls- und der Drehimpulserhaltungssatz. Dabei werden folgende zwei Annahmen getroffen: Die Energie und der Impuls sind vor und nach der Crashphase gleich und die Stoßdauer ist unendlich kurz. Anhand des Kollisionspunktes, der Auslaufbewegung (über Spurenzeichnung), der Endlagen sowie der Deformationen der Fahrzeuge werden Auslaufimpuls und Deformationsenergie bestimmt. Hieraus können dann unter bestimmten Annahmen die Einlaufimpulse und damit die Kollisionsgeschwindigkeiten der Beteiligten errechnet werden. Da von der Auslaufbewegung auf die Einlaufgeschwindigkeit geschlossen wird, nennt man diese Vorgehensweise die **Rückwärtsrechnung**.

### **Kraftrechnung:**

**Hier wird die Einlaufgeschwindigkeit** der Fahrzeuge im Bereich der wahrscheinlichen Lösung angenommen. Über Bewegungsgleichungen werden alle auftretenden Kräfte berechnet. Aus diesen wird die Bewegung der Fahrzeuge bestimmt. Man benötigt für die Vorgehensweise eine möglichst genaue Kenntnis des Deformationsverhaltens der beteiligten Fahrzeuge. Da hierbei von der Einlaufgeschwindigkeit ausgehend der Bewegungsablauf der Fahrzeuge errechnet wird, bezeichnet man diese Vorgehensweise als **Vorwärtsrechnung**. Dieses Verfahren gewann mit der Rechneranwendung erheblich an Bedeutung [1]. Die Rechnung lässt sich mit veränderten Anfangsbedingungen so lange wiederholen, bis die errechneten Ergebnisse mit den bei der Unfalldatenerhebung festgestellten Endlagen, Spurenverläufen sowie den Beschädigungsbildern an den Fahrzeugen ausreichend genau übereinstimmen [1]. Das Prinzip der Kraftrechnung wird zur Modellbildung des physikalischen und des SimMechanics Modells herangezogen.

## 1.6 Überprüfung und Bewertung der Sicherheit

Mit der starken Zunahme der Verkehrsunfälle, bedingt durch die Zunahme des Straßenverkehrs, gab es frühzeitig das Bestreben der Legislative, die Verkehrssicherheit zu verbessern. Daher wurden Vorschriften für die Kraftfahrzeuge erlassen, die zur Verbesserung der Verkehrssicherheit beitragen, ohne jedoch die Mobilität und das Verkehrsgeschehen zu beeinflussen. Die Überprüfung der Sicherheit erfolgt einerseits durch eine Funktionsuntersuchung und andererseits durch Überprüfung einzelner Sicherheitskomponenten auf die Erfüllung der Wirkvorschrift hin. Die Bewertung hingegen versucht nicht nur die passive Sicherheit über ein Ja/Nein-Kriterium festzulegen, sondern erfasst auch den unter- und überkritischen Bereich quantitativ so, dass die Belastungswerte selbst das Gütekriterium darstellen und die Höhe des Wertes direkt mit der Wahrscheinlichkeit der Verletzung zusammenhängt. Dadurch werden dem Konsumenten Informationen zur Verfügung gestellt, mit denen er das Unfallverhalten eines bestimmten Fahrzeuges mit anderen Fahrzeugen derselben Fahrzeugklasse vergleichen kann [1].

### 1.6.1 Gesetzgebung

Die Gesetzgebung reagiert weltweit auf die steigenden Unfallzahlen aufgrund des wachsenden Verkehrsaufkommens recht unterschiedlich. Diese Unterschiede sind in den erlassenen Gesetzen und Standards zur Erhöhung der Straßenverkehrssicherheit deutlich erkennbar. Man kann vier verschiedene Ansätze finden, die die Fahrzeugsicherheit verbessern sollen:

- Entwicklung und Bau möglichst sicherer Fahrzeuge durch Bau- und Wirkvorschriften
- Erhalt des verkehrssicheren Zustandes von Fahrzeugen durch das Vorschreiben von Überwachungsintervallen
- Abbau von Handelshemmnissen durch gleiche Anforderungen bezüglich Beschaffung, Prüfung und Genehmigung im Geltungsbereich von Mitgliedsstaaten

- Harmonisierung durch die Aufgabe nationaler Bestimmungen zugunsten internationaler Verordnungen und Richtlinien mit dem Ziel, vereinheitlichte Testvorschriften zu erzielen.

Die gesetzlich festgelegten Vorschriften und Kriterien der Sicherheitsgesetzgebung beziehen sich auf den Alltagsbetrieb und auf das Unfallverhalten der Fahrzeuge. Dabei wurden genau spezifizierte Regelungen für das Gesamtfahrzeug und für bestimmte Fahrzeugteile festgelegt [1].

#### **1.6.1.1 Gesetzliche Vorschriften**

Im Gegensatz zur USA wird dem Fahrzeuglenker in Europa ein hohes Maß an Verantwortung auferlegt, so dass sich die Gesetzgebung zunächst ganz auf die Vermeidung von Unfällen konzentrierte. Hingegen wurde in den USA die Meinung vertreten, dass der Fahrzeuglenker nur in einem geringen Ausmaß erzogen werden kann und man konzentrierte sich deshalb auf den Schutz der Insassen durch eine geeignete Bauweise des Fahrzeugs. Erst an zweiter Stelle folgten die Maßnahmen zur Unfallprävention.

Im Automobilsicherheitsgesetz (Motor Vehicle Safety Act) sind detaillierte Prüfvorschriften hinsichtlich des Verhaltens des Fahrzeuges im Alltag und in Unfallsituationen festgehalten. Diese Prüfvorschriften sind detailliert in den Federal Motor Vehicle Safety Standards (FMVSS) beschrieben und beinhalten Anforderung und Bewertungskriterien. Die Erfüllung dieser Vorschriften ist keine Grundvoraussetzung für die Fahrzeugzulassung. In den USA wird das Prinzip der Selbsteinschätzung durch die Automobilhersteller angewandt, d.h. die Hersteller überprüfen die Einhaltung der Standards eigenverantwortlich und die Fahrzeuge gelangen anders als in Europa ohne Zulassungsverfahren in den Verkehr. Um andererseits zu überprüfen, ob die Vorschriften eingehalten werden, werden in bestimmten Intervallen gezielt Fahrzeuge durch nachgeordnete Regierungsbehörden gekauft und auf Basis der Sicherheitsstandards überprüft.

In der nachfolgenden Abbildung sind die gesetzlichen Vorschriften und Standards zur inneren Sicherheit dargestellt (speziell die Sicherheitsmaßnahmen am und im Gesamtfahrzeug) [1]:

Land	Vorschrift	Anforderungen und Merkmale zur inneren Sicherheit
<b>Sicherheitsmaßnahmen am und im Gesamtfahrzeug</b>		
Deutshl. Europa	StVZO 30 ECE-R 94  ECE-R 95	Allgemeine Anforderungen an Insassenschutz.  Frontalaufprall auf deformierbare 0°-Barriere mit 40-%iger Überdeckung auf der Fahrerseite bei 56 km/h; Messung an zwei Dummies HYBRID III fahrer- und beifahrerseitig, Kriterien für Kopf, Hals, Thorax, Oberschenkel und Knie; Lenkrad-Verschiebung und Drehung der Lenksäule.  Seitenaufprall mit beweglicher, deformierbarer Barriere (Höhe 300 mm), bei 50 km/h; Messung an einem Dummy EuroSID (SID: Side impact dummy) fahrerseitig, Kriterien für Kopf, Brust (VC-Kriterium und Eindrückung) und Abdomen (innere, äußere und Symphyse-Kraft).
USA/CDN	FMVSS 208	Frontalaufprall gegen starre Barriere $0 \pm 30^\circ$ bei 30 mph ( $\approx 48 \dots 53$ km/h); Messungen an zwei Dummies HYBRID III fahrer- und beifahrerseitig, Kriterien für Kopf, Brust (Beschleunigung und Eindrückung) und an Oberschenkeln.  Heckaufprall mit beweglicher, starrer Barriere bei 48... 53 km/h; Messung wie beim Frontalaufprall.
USA/CDN	FMVSS 214	Seitenaufprall mit beweglicher, deformierbarer Barriere, bewegt im Krebsgang unter $27^\circ$ , bei 54 km/h gegen Fahrertür des stehenden Fahrzeugs; Messungen mit zwei Dummies (US-SID) auf Fahrersitz und im Fond stoßseitig, Kriterien für Brust (TTI, unterschiedlich für 2- und 4-türige Fahrzeuge) und Becken (Querbeschleunigung).

Abbildung 8: Gesetzliche Vorschriften und Standards zur inneren Sicherheit in verschiedenen Ländern

[1]

Bei den Crashversuchen zur Frontalkollision nach dem FMVSS 208 prallt der PKW entweder mit einer Geschwindigkeit von 30mph (48 bis 53km/h) gegen eine starre Barriere unter einem Aufprallwinkel von  $0^\circ$  oder die Barriere wird in einem Winkel von  $\pm 30^\circ$  schräg zur Fahrtrichtung aufgestellt. Die Belastungsgrößen werden an je einem fahrer- und beifahrerseitig eingesetzten HYBRID III-Dummy gemessen. Messungen werden dabei am Kopf ( $HIC \leq 1000$ ), an der Brust (3ms-Beschleunigung  $a \leq 60g$ , Eindrückung  $s \leq 50.8$  bzw.  $76.2$ mm) und an den Oberschenkeln (Längskraft  $F \leq 10kN$ ) durchgeführt [1].

## 1.6.2 Verbraucherschutztests

Zusätzlich zu den gesetzlichen Anforderungen gibt es in der Automobilindustrie auch firmenspezifische Prüfvorschriften, die von der Versuchsanordnung her zahlreicher und von den Prüfkriterien her umfangreicher sind als die sicherheitsgesetzlich vorgeschriebenen Prüfverfahren. Die durch staatliche Institutionen (z.B.: NHTSA mit dem US-NCAP) und Verbraucherschutzorganisationen (z.B.: EuroNCAP) sowie Versicherungsgesellschaften (z.B.: IIHS) durchgeführten Versuchsprogramme haben Eingang in die Lastenhefte der Fahrzeughersteller gefunden [1]. Diese Versuchsprogramme basieren auf den gesetzlichen Vorschriften und sind heute die Hauptauslegungskriterien für Kraftfahrzeuge, da sie wesentlich anspruchsvoller und somit die neue Basis für die Hersteller geworden sind. Jeder KFZ-Hersteller ist bestrebt, bei diesen Versuchsprogrammen möglichst gut abzuschneiden, da der Kunde sehr einfach Fahrzeuge derselben Klasse untereinander vergleichen kann und somit zum sicheren Fahrzeug tendieren könnte.

### 1.6.2.1 New Car Assessment Program (NCAP)

In den letzten Jahrzehnten haben sich weltweit zahlreiche Versuchsprogramme etabliert, mit denen die passive Sicherheit von Fahrzeugen untersucht und veröffentlicht wird, um so den Konsumenten beim Kauf eines Neuwagens zu unterstützen. Diese Testverfahren werden als New Car Assessment Program (NCAP) bezeichnet, die alle eines gemeinsam haben: nämlich die jeweils geltenden gesetzlichen Anforderungen sind als Mindestanforderungen zu erfüllen, um eine gute Bewertung zu erhalten. Das heißt, um eine gute Bewertung zu erhalten, müssen die Fahrzeuge deutlich höhere und teilweise weit darüber hinaus gehende zusätzliche Anforderungen erfüllen. Diese Programme werden in den USA vom Forschungsinstitut der NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) als US-NCAP bezeichnet. Das US-NCAP ist das älteste Bewertungsverfahren [1]. In der folgenden Abbildung ist eine Übersicht der existierenden NCAP-Tests gegeben:

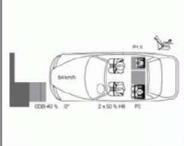
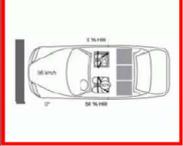
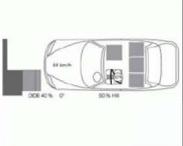
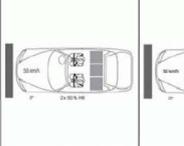
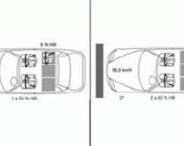
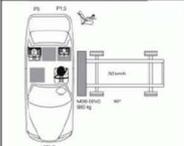
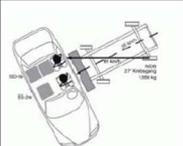
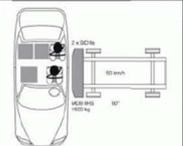
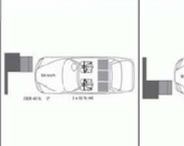
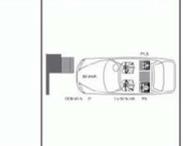
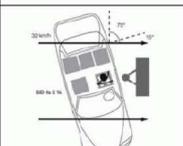
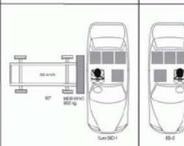
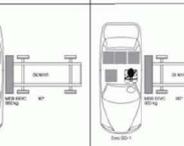
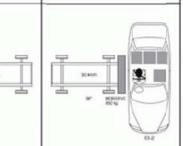
Euro NCAP	US NCAP	USA IIHS	JNCAP	C-NCAP	KNCAP	Australien
						
						
						
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schlitten Tests für Heckaufprall mit Bewertung des Sitzes (siehe Seite 59)</li> <li>• Dynamische Tests mit Kindersitzsystemen und Bewertung der Handhabung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Static Stability Factor und Fishhook Manöver (siehe Seite 66)</li> <li>• Ease of use Rating für Kindersitze</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reparaturtest für Stoßfänger</li> <li>• Bewertung des Sitzes und der Kopfstütze beim Heckaufprall</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fußgängerschutz</li> <li>• Dynamische Tests mit Kindersitzsystemen und Bewertung der Handhabung</li> <li>• Bewertung der Bremsen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fußgängerschutz</li> <li>• Bewertung der Kopfstütze</li> <li>• Static Stability Factor und Fishhook Manöver</li> <li>• Bewertung der Bremsen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fußgängerschutz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fußgängerschutz</li> </ul>

Abbildung 9: Übersicht der NCAP-Tests [7], [10]

In dieser Masterarbeit wird der Frontalaufprall des US-NCAP weiter betrachtet.

### 1.6.2.2 US-NCAP

Das Ziel dieses Bewertungsverfahrens ist es, das Sicherheitsniveau über das Käuferinteresse und die Nachfragesituation zu stellen. Dieser Test soll den Konsumenten beim Kauf eines Neuwagens unterstützen. Der Frontalaufprallversuch wird senkrecht auf eine starre, nicht deformierbare Barriere mit einer Aufprallgeschwindigkeit von 35mph (~ 56km/h) durchgeführt. Anderes als beim Frontalaufprallversuch nach FMVSS 208, bei dem die Insassen nur durch passive Rückhaltesysteme geschützt werden, sind hier auch aktive Rückhaltesysteme zugelassen. In diesem Verfahren dienen die Schutzkriterien der geltenden US-amerikanischen Sicherheitsstandards (FMVSS 208) mit dem 30mph Aufpralltest als Mindestanforderungen. Anfangs wurde lediglich die Einhaltung bzw. Nicht-Einhaltung der Schutzkriterien-Level dargestellt. Heute wird eine ausführliche, auf der Verletzungswahrscheinlichkeit basierende Bewertung der Testergebnisse im unter- und überkritischen Bereich in Form eines Punktesystems durchgeführt. Dabei werden

ein bis fünf Sterne (für „sehr sicher“) als Endergebnis vergeben. Die resultierende Anzahl der Sterne wird durch das sogenannte Relative Risk festgelegt. Dieses wiederum ergibt sich aus den erzielten relevanten Dummybelastungswerten und den damit verbundenen Verletzungswahrscheinlichkeiten. In der nachfolgenden Abbildung ist der Zusammenhang zwischen dem Relative Risk (RR) und den erzielten Sternen zu sehen:

Tabelle 1: Zusammenhang zwischen Relative Risk (RR) und den erzielten Sternen nach [2]

Erzielte Sterne	Relative Risk (RR)
*****	$RR < 0.67$
****	$0.67 \leq RR < 1$
***	$1 \leq RR < 1.33$
**	$1.33 \leq RR < 2.67$
*	$RR \geq 2.67$

Die Konsumenten können somit anhand der erzielten Sterne Fahrzeuge derselben Fahrzeugklasse miteinander vergleichen [1].

## 1.7 Sicherheitsmaßnahmen

Unter Sicherheitsmaßnahmen versteht man all diejenigen Maßnahmen, die zur Vermeidung von Unfällen und Minimierung der Unfallfolgen dienen. Die Maßnahmen zur Verbesserung der aktiven Fahrzeugsicherheit lassen sich zeitlich der sogenannten PreCrash-Phase zuordnen. Die PreCrash-Phase entspricht jener Zeitspanne vor der Kollision. Die Maßnahmen zur Verbesserung der passiven Sicherheit greifen in der InCrash- und PostCrash-Phase [1].

In der folgenden Abbildung wird der zeitliche Ablauf des Unfallvorgangs graphisch verdeutlicht [1]:

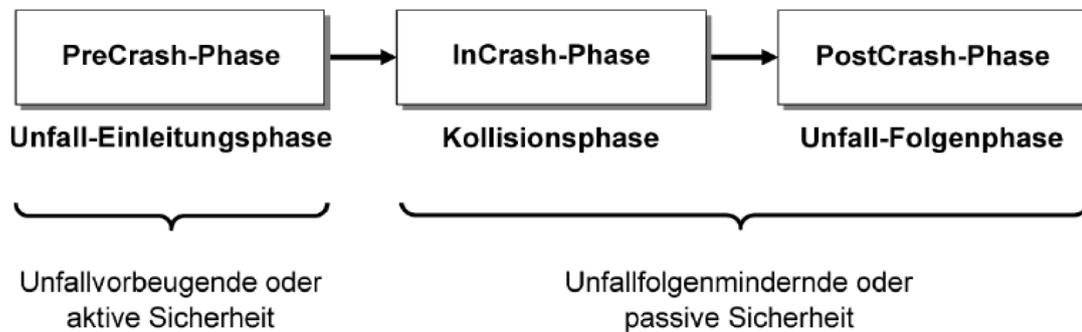


Abbildung 10: zeitlicher Ablauf des Unfallereignisses und Sicherheitsbereiche [1]

### 1.7.1 Maßnahmen zum Selbstschutz

Die Selbstschutzmaßnahmen umfassen die Deformationsstruktur (d.h.: die Kontaktbereiche der Karosserie, die bei der Kollision beansprucht werden) und die klassischen Rückhaltesysteme wie Gurt und Airbag [1].

#### 1.7.1.1 Karosserie und Deformationsstruktur

Die Karosserie hat zwei entscheidende Aufgaben zu erfüllen: Sie muss einerseits im Bereich der Fahrgastzelle eine ausreichend hohe Steifigkeit aufweisen, um bei Unfällen den Überlebensraum für die Insassen zu gewährleisten und andererseits müssen die Deformationszonen nachgiebig ausgebildet sein, um bei Kollisionen die kinetische Energie in Deformationsenergie umwandeln zu können und gleichzeitig eine insassenverträgliche Beschleunigungscharakteristik aufweisen.

Als Beispiel sind in der nachfolgenden Abbildung die tragenden Teile einer modernen Karosserie dargestellt [1]:



Abbildung 11: tragende Bauteile der Fahrgastzelle am Beispiel des Space Frame von AUDI [1]

Die Deformationsstrukturen am Fahrzeug sind für die Energieaufnahme bei Unfällen zuständig, d.h. für die Umwandlung von kinetischer Energie in Deformationsenergie. Daraus resultiert ein Kraft- bzw. Beschleunigungsverlauf, der die Auslegung der Insassenschutzsysteme mitbestimmt. Die vordere Deformationszone kann in drei Abschnitte unterteilt werden.

Die **Fußgängerschutz-Zone** dient dem Schutz von äußeren ungeschützten Verkehrsteilnehmern. Ein Fahrzeug benötigt jedoch für den Selbstschutz Strukturen, die früh wirksam werden und ein hohes Kraftniveau aufweisen müssen, daher gibt es hier kaum freien Gestaltungsspielraum. Die Deformationskräfte werden dabei gezielt in eine Prallstoßfänger- bzw. Stülprohrkonstruktion eingeleitet. Die Pralldämpfer federn kleine Anstöße bis 4km/h vollständig ab, ohne dabei beschädigt zu werden. Bei Kollisionsgeschwindigkeiten bis ca. 15km/h absorbieren die auswechselbaren Stülprohre (die sogenannten Crashboxen) die Aufprallenergie. Die Fußgängerschutz-Zone sollte ein möglichst niedriges Kraftniveau beim Kontakt mit äußeren Verkehrsteilnehmern aufweisen und gleichzeitig auch eine Mindestfestigkeit zum Schutz vor leichten Kollisionen besitzen. Das Ende dieser Schutzzone ist die Vorderkante der vorderen Rahmenlängsträger.

Die nächste Schutzzone ist die **Kompatibilitäts-Zone**, die sowohl dem Selbstschutz als auch dem Kontrahentenschutz zugeordnet ist. Diese Zone soll bei der Kollision zweier Fahrzeuge den bestmöglichen Insassenschutz für beide Fahrzeuge gewährleisten. Die Kompatibilitätszone endet im Bereich der Radaufhängung.

Die dritte Schutzzone ist die **Selbstschutz-Zone**. Diese soll sich bei einem Frontalunfall in der Nähe der Fahrgastzelle nur wenig verformen und muss deshalb eine dementsprechend höhere Steifigkeit aufweisen, um die Fahrgastzelle stabil zu halten.

In der folgenden Abbildung sind die einzelnen Schutzzonen und Kraftniveaus an der PKW-Vorbastruktur graphisch dargestellt [1]:

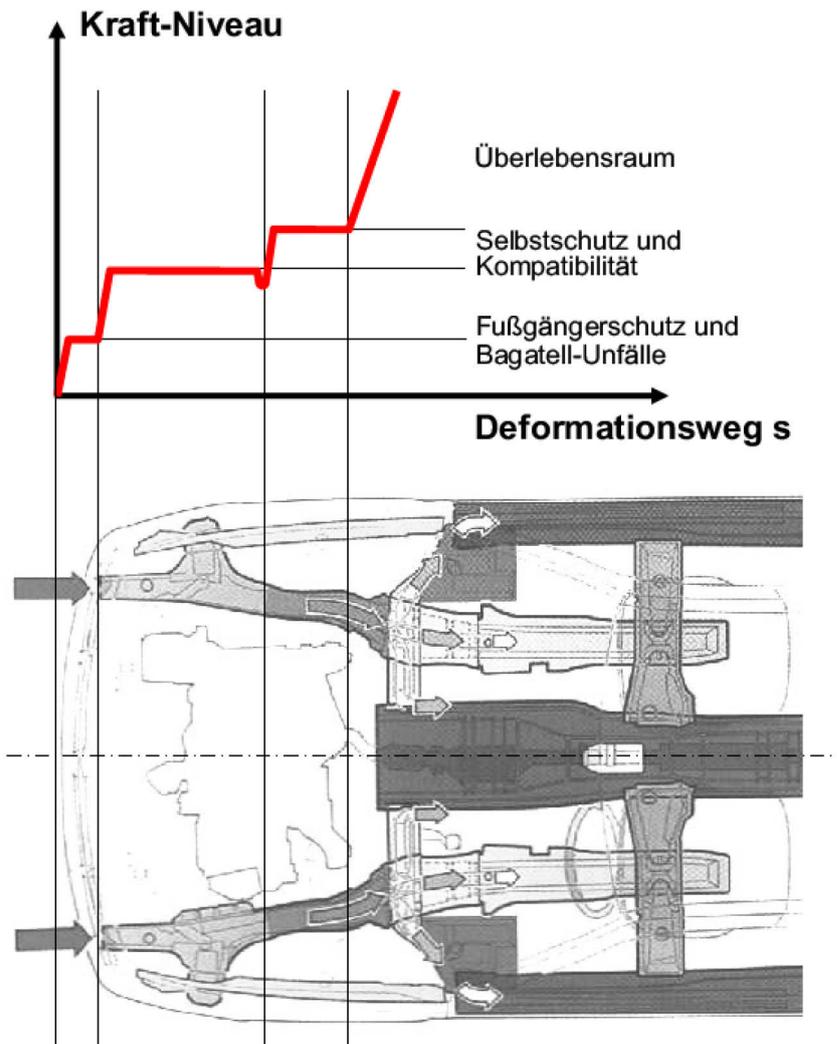


Abbildung 12: Deformationszonen und Kraftniveaus an der PKW-Vorbastruktur [1]

## 1.8 Experimentelle Simulation

Das Ziel der experimentellen Simulation im Rahmen der passiven Sicherheit ist es, Sicherheitsmaßnahmen unter möglichst realistischen Bedingungen nachzubilden und deren Verhalten zu bestimmen. Die im Labor ermittelten Versuchsergebnisse sollen

eine Aussage über die Wirksamkeit der Sicherheitsmaßnahmen ermöglichen. Hierbei werden die Deformationen an der Fahrzeugkarosserie und die Beschädigung der Sicherheitssysteme untersucht. Weiters wird die Schwere der zu erwartenden Verletzung über die einwirkenden Kräfte und Beschleunigungen auf die Testpuppe ermittelt. Die experimentelle Crashmechanik-Simulation versucht das Strukturdeformationsverhalten und die Insassenbelastung im Falle einer Kollision möglichst genau nachzubilden. Dies erfolgt mit Hilfe der Crash-Anlage und den dazugehörigen peripheren Einrichtungen zur Messung der einzelnen physikalischen Größen [1].

### **1.8.1 Versuchsarten**

Das Unfallgeschehen ist zu vielfällig, um in seiner Gesamtheit simuliert werden zu können. Daher werden verschiedene Versuchsarten unterschieden. Jede Versuchsart repräsentiert einen bestimmten Ausschnitt der Unfallwelt. Das Ziel der experimentellen Simulation ist es, die Wirksamkeit und die Funktionsfähigkeit der Schutzsysteme zu überprüfen [1].

#### **1.8.1.1 Gesamtfahrzeugversuche**

Die höchste Simulationsgüte hinsichtlich des Deformations- und Bewegungsverhaltens erreicht man bei Versuchen mit dem vollständigen Fahrzeug. Bei den Fahrzeugversuchen werden Dummies als Insassen verwendet, mit denen die Bewegungs- und Belastungssimulationen durchgeführt werden. Beim Frontalcrashversuch nach FMVSS 208 werden die Fahrzeuge auf der Crash-Bahn mittels Beschleunigungseinrichtungen aus dem Stand auf die gewünschte Geschwindigkeit (48 bis 53km/h) gebracht und prallen unter 0° Auftreffwinkel gegen eine starre Barriere mit 100% Überdeckung. Dieser Test dient im Wesentlichen zur Überprüfung der Deformations- und der Zellenstruktur sowie der Insassenschutzsysteme. Beurteilungen werden auf Basis der Dummybelastungswerte getroffen [1].

### 1.8.1.2 Ersatzversuche

#### 1.8.1.2.1 Schlittenversuche

Schlittenversuche dienen in erster Linie zur Auslegung der Rückhaltesysteme. Der entscheidende Vorteil von Schlittenversuchen ist, dass die Wirkung von Rückhaltesystemen ohne Zerstörung des Fahrzeuges überprüft werden kann. Zur Aufnahme des Insassenschutzsystems wird der Schlitten oft mit einer stark versteiften Teilkarosserie versehen, damit sich die Karosserie auch nach mehreren Versuchen nicht deformiert. Zur Simulation von Frontalkollisionen kommen zwei unterschiedliche Prinzipien zum Einsatz: der Beschleunigungs- und der Verzögerungsschlitten [1].

Der **Beschleunigungsschlitten** wird aus der Ruhelage gegen die Fahrtrichtung beschleunigt, wobei der aufgebrachte Beschleunigungsverlauf der Verzögerung beim Frontalcrash (Crashpuls) entspricht. Danach wird der Schlitten mit einer Bremse wieder abgebremst [1].

In der folgenden Abbildung ist ein Beschleunigungsschlitten (Katapultschlitten) graphisch dargestellt:

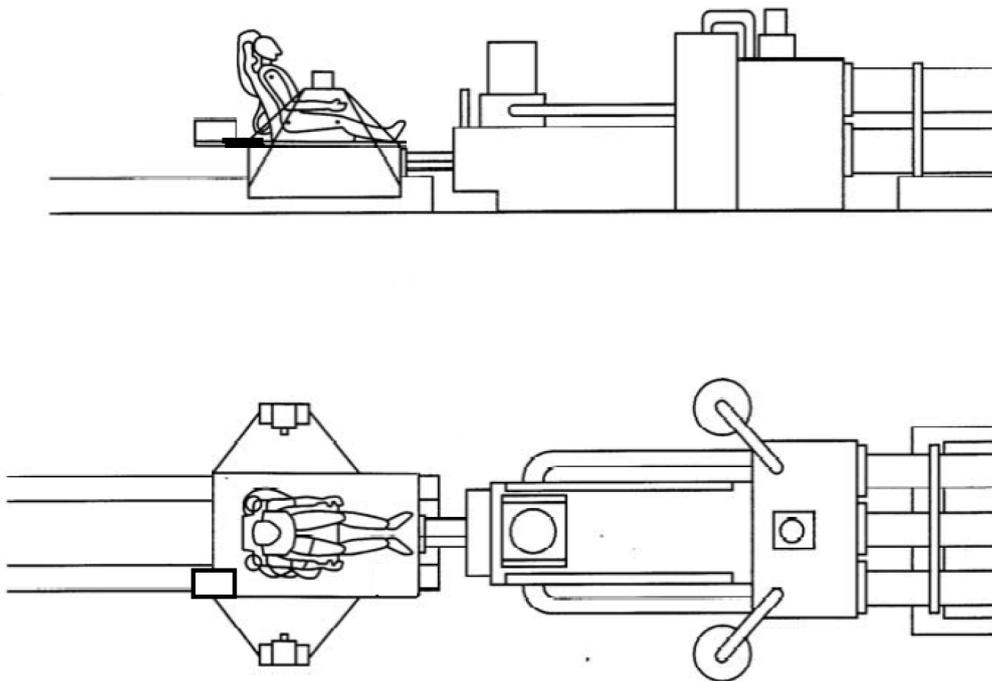


Abbildung 13: Beschleunigungsschlitten mit hydraulischem Antrieb [1]

Der **Verzögerungsschlitten** wird aus der Ruhelage mit Hilfe eines Zugseils in Fahrtrichtung auf die gewünschte Testgeschwindigkeit beschleunigt. Sobald der Schlitten die Testgeschwindigkeit erreicht hat, wird er vom Seil getrennt. Damit bewegt sich der Schlitten mit konstanter Geschwindigkeit. Die Verzögerung erfolgt mit einer stationären Verzögerungseinrichtung entsprechend des gemessenen Crashpulses, bei der die Bewegungsenergie in Formänderungsarbeit oder Strömungsenergie umgewandelt wird [1].

In der nachfolgenden Abbildung ist ein Verzögerungsschlitten inklusive Verzögerungseinheit graphisch dargestellt:

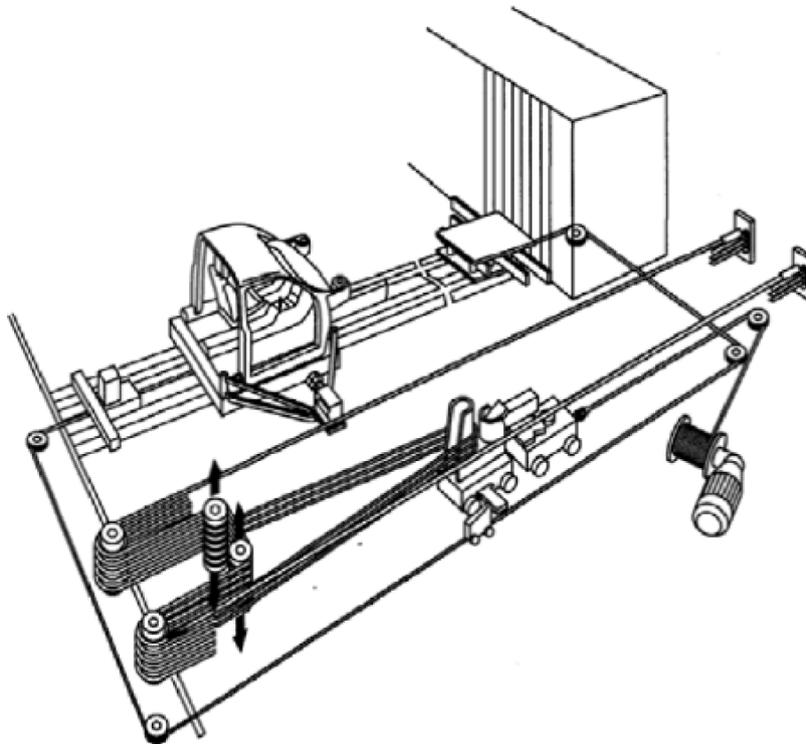


Abbildung 14: Verzögerungsschlitten mit Verzögerungseinrichtung [1]

Als weiterer Vorteil von Schlittenversuchen ist die Reproduzierbarkeit der Versuche zu nennen [1].

#### 1.8.1.2.2 Komponententests

Komponententests dienen der Funktionsuntersuchung von Subsystemen der passiven Sicherheit. Diese Tests können einerseits auf das Deformations- und Intrusionsverhalten der Strukturen abzielen, sie können aber auch lediglich die Überprüfung der Funktionsweise bzw. Wirkungsweise einzelner Komponenten zum Ziel haben. Viele dieser Komponententests sind nach Art und Kriterien in gesetzlichen Vorschriften verankert.

## 1.9 Der Crashpuls

Als Crashpuls wird jener charakteristische, zeitlich veränderliche Beschleunigungsverlauf des Fahrzeugs bezeichnet, der beim Crashvorgang

aufgenommen wird. Der Crashpuls wird sowohl für die Simulation als auch für die Schlittentests benötigt, d.h. alle Ersatzversuche können nur mit Hilfe des vorher aufgenommenen Crashpulses durchgeführt werden. In der folgenden Abbildung sind beispielhaft einige Crashpulse von verschiedenen Fahrzeugen aus den unterschiedlichsten Fahrzeugklassen zu sehen:

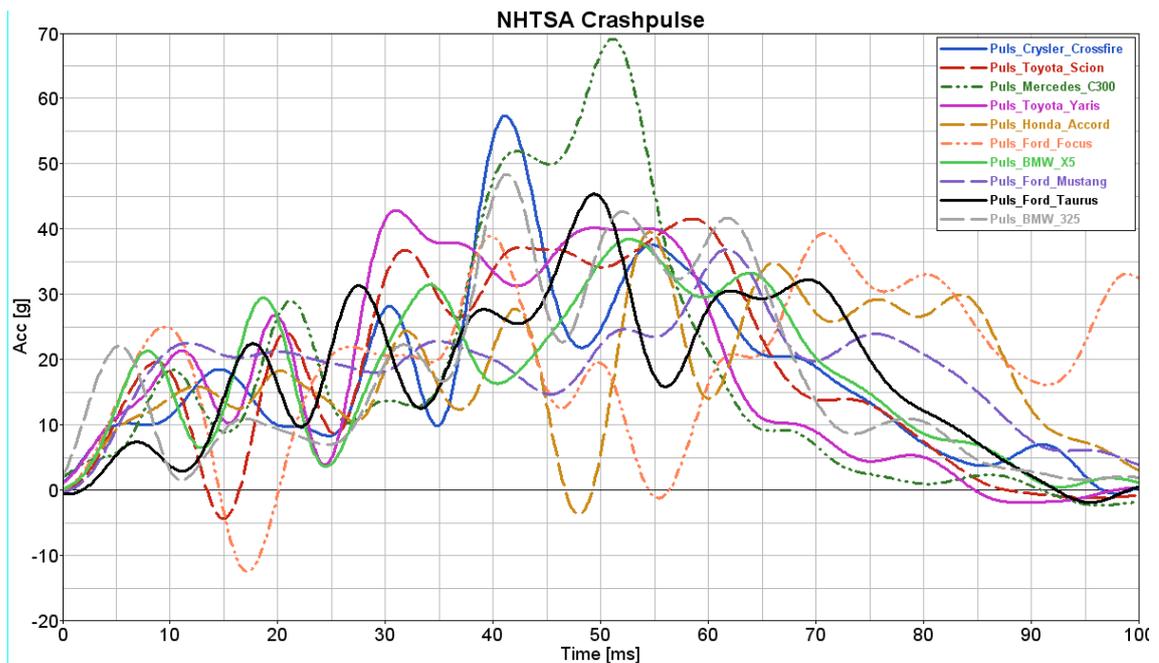


Abbildung 15: Crashpulse von verschiedenen Fahrzeugen aus diversen Fahrzeugklassen

Wie aus der obigen Abbildung ersichtlich ist, sind alle Crashpulse durch diverse Schwingungen charakterisiert, die jedoch sehr unterschiedlich ausgeprägt sein können. Die Schwingungen entstehen durch das Wegknicken diverser Trägerelemente.

Gemessen werden zwei Beschleunigungsverläufe, die in der Regel anschließend gemittelt werden, um den Crashpuls zu erhalten. Die Beschleunigungssensoren befinden sich beide auf dem hinteren Querträger. Ein Sensor ist auf der linken Seite und einer auf der rechten Seite des hinteren Querträgers angebracht (Left Rear Cross-Member, Right Rear Cross-Member). Die Position der beiden Beschleunigungssensoren (markiert durch die Zahl 1 und 2) ist in der nachfolgenden Abbildung zu sehen:

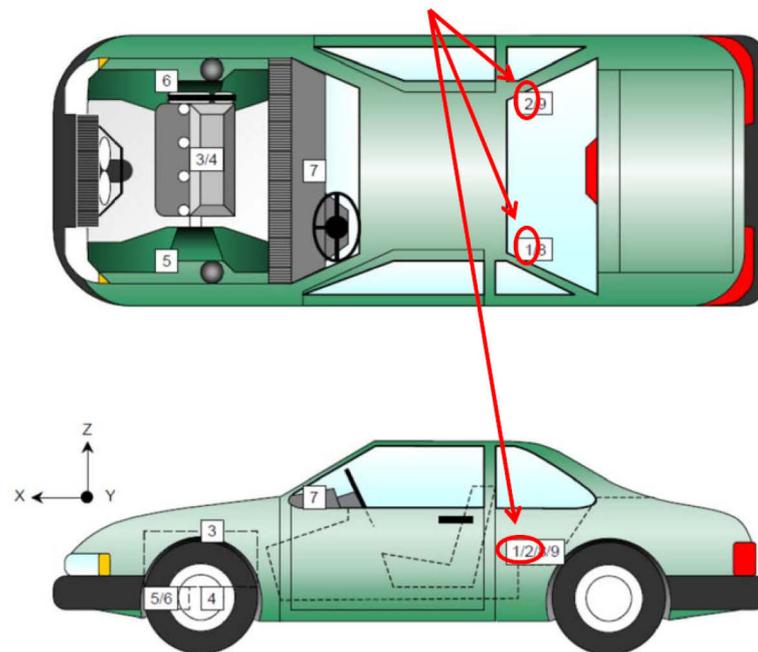


Abbildung 16: Position der beiden Beschleunigungssensoren zur Erfassung des Crashpulses [5]

Für den Frontcrash ist die oben angeführte Position der Beschleunigungssensoren deshalb sehr vorteilhaft, weil dieser Bereich beim Frontcrash unverformt bleibt.

Als Beispiel sind in der folgenden Abbildung die beiden Beschleunigungsverläufe des Left Rear Cross-Member-Beschleunigungs- und des Right Rear Cross-Member-Beschleunigungssensors beim Frontalcrash eines Mercedes C300 angeführt.

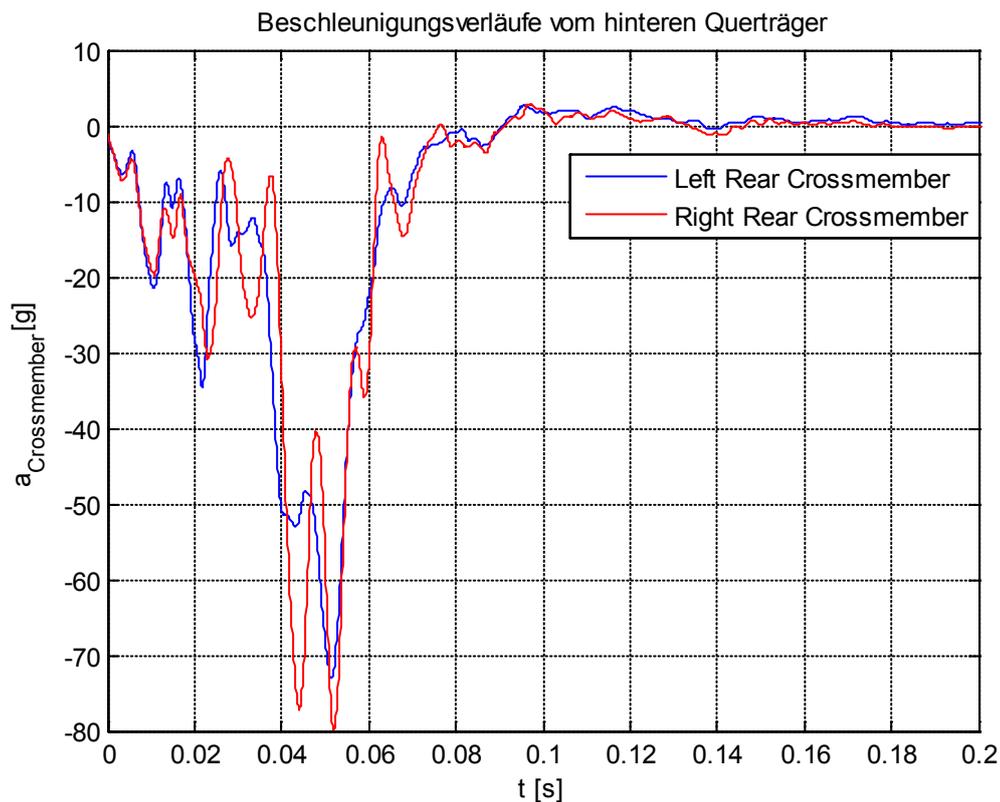


Abbildung 17: Beschleunigungsverläufe des Left Rear Cross-Member-Beschleunigungs- und des Right Rear Cross-Member-Beschleunigungssensors

## 1.10 Zusammenhang zwischen Crashpuls und Dummybelastung

In der folgenden Abbildung ist der Zusammenhang zwischen dem Crashpuls (roter Verlauf) und der Dummybelastungsgröße (HIC  $\rightarrow$  grüner Verlauf) sehr gut ersichtlich. Der Zusammenhang zeichnet sich dadurch aus, dass der Puls bereits im Abklingen ist, während der HIC erst zu steigen beginnt, d.h. die maximale Dummybelastung tritt mit einer gewissen Verzögerung zum Crashpuls auf.

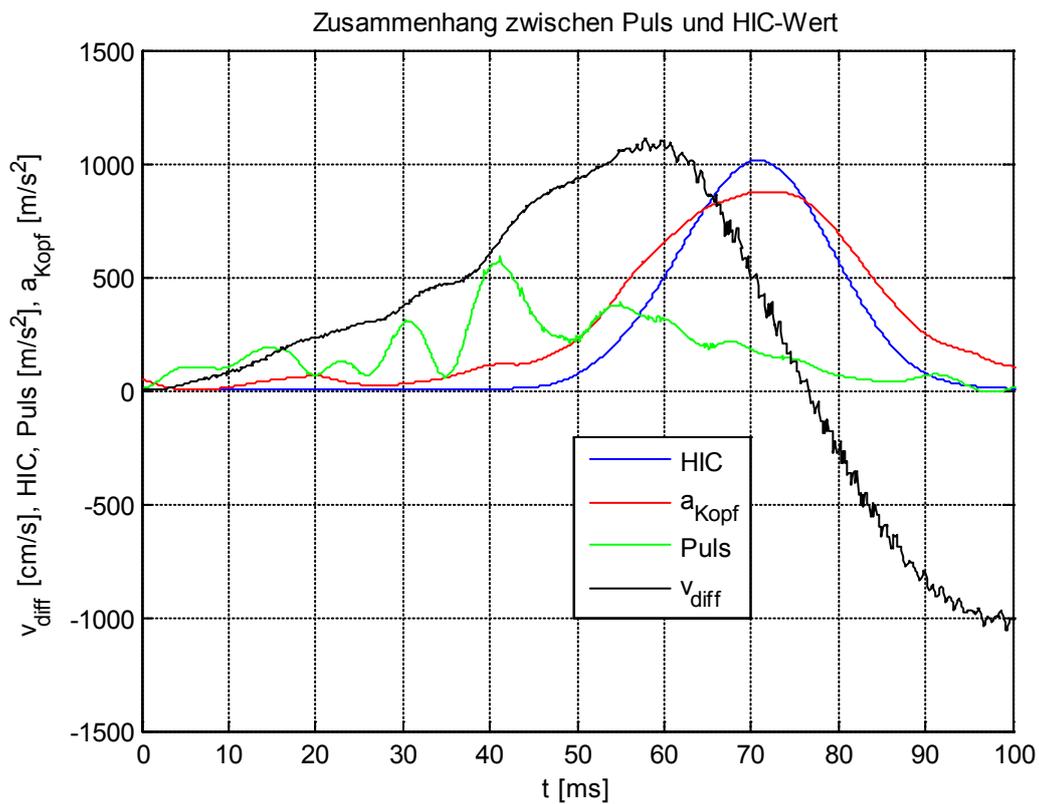


Abbildung 18: Zusammenhang zwischen Crashpuls und HIC-Wert

Um diesen Zusammenhang noch deutlicher zu demonstrieren, wurde in der nachfolgenden Abbildung der Crashpuls gemeinsam mit der Dummybewegung dargestellt. Dazu wurde an einigen Zeitpunkten des Pulses ein Bild der aktuellen Dummybewegung angefügt.

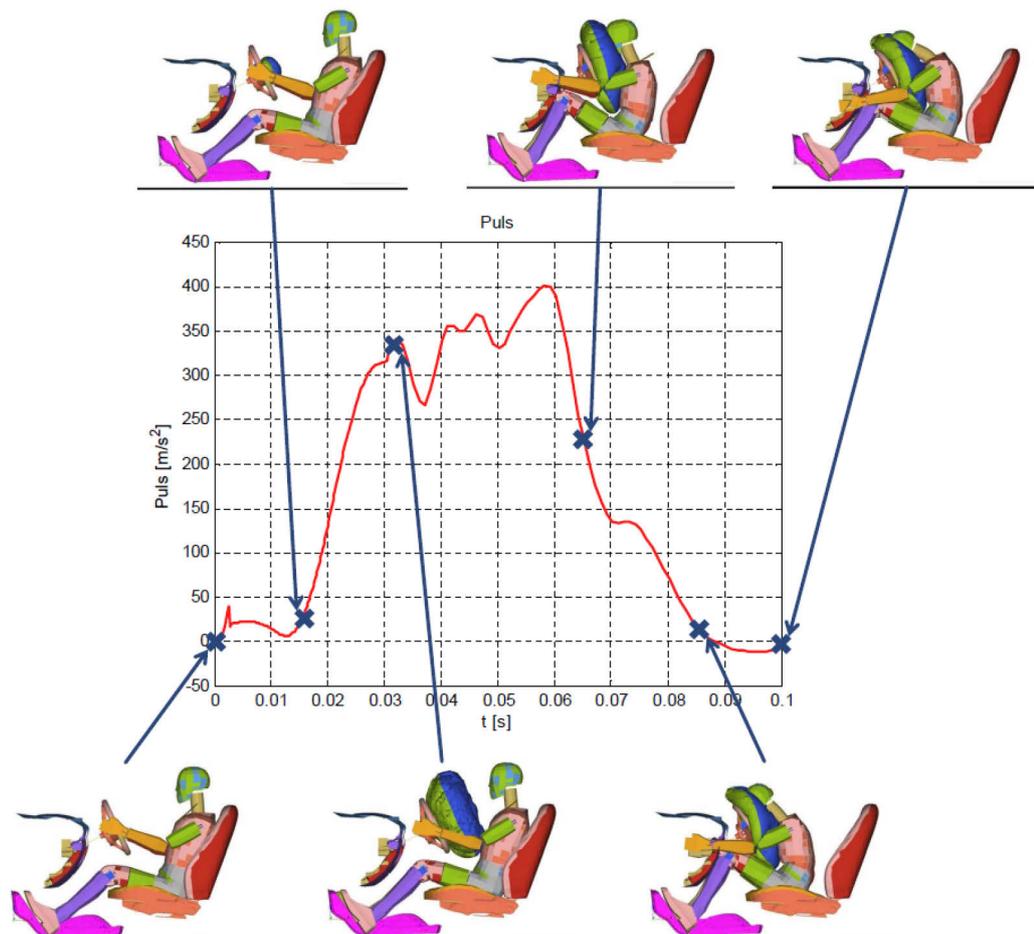


Abbildung 19: Zusammenhang der Dummybewegung mit dem Puls

Die obige Abbildung zeigt beispielhaft an einem Puls, dass sich der Dummy ab ca. 25ms vom Sitz löst und nach vorne bewegt. Zu diesem Zeitpunkt ist der Airbag bereits voll aufgegangen. Bei ca. 65ms ist der Dummy schon deutlich aus der ursprünglichen Sitzposition herausgerutscht und der Kopf fällt bereits in den Airbag. Bei ca. 80ms befindet sich der Dummy bereits in der Rückwärtsbewegung, was verdeutlicht, dass ein Pulseingriff ab diesem Zeitpunkt sinnlos wäre, da hier der Dummybelastung nicht mehr entgegengewirkt werden kann.

## **2 PULSAUSLEGUNG**

### **2.1 Stand der Technik**

Bis jetzt wird kaum eine Pulsauslegung auf die relevanten Dummybelastungswerte vorgenommen. Hingegen wird bis jetzt lediglich das Fahrzeug an gewissen Stellen härter bzw. weicher konfiguriert, d.h. es werden zusätzliche Verstrebungen (Trägerelemente) eingefügt, um das Fahrzeug härter zu machen bzw. Verstrebungen (Trägerelemente) entfernt, um das Fahrzeug weicher zu gestalten. Weiters können die Verstrebungen selbst mit einer höheren bzw. niedrigeren Festigkeit ausgelegt werden. Die Dummybelastung wird über diverse Rückhaltesysteme (Sicherheitsgurt, Airbag) beeinflusst [1].

### **2.2 Komponenten zur Beeinflussung der Insassenbelastung**

Der Sicherheitsgurt zählt zu den ältesten und wichtigsten Rückhaltesystemen und beeinflusst die Dummybelastung entscheidend. Heute wird typischerweise ein 3-Punkt Gurtsystem im Fahrzeug verwendet, das in nachfolgender Abbildung dargestellt ist [1], [12], [4]:

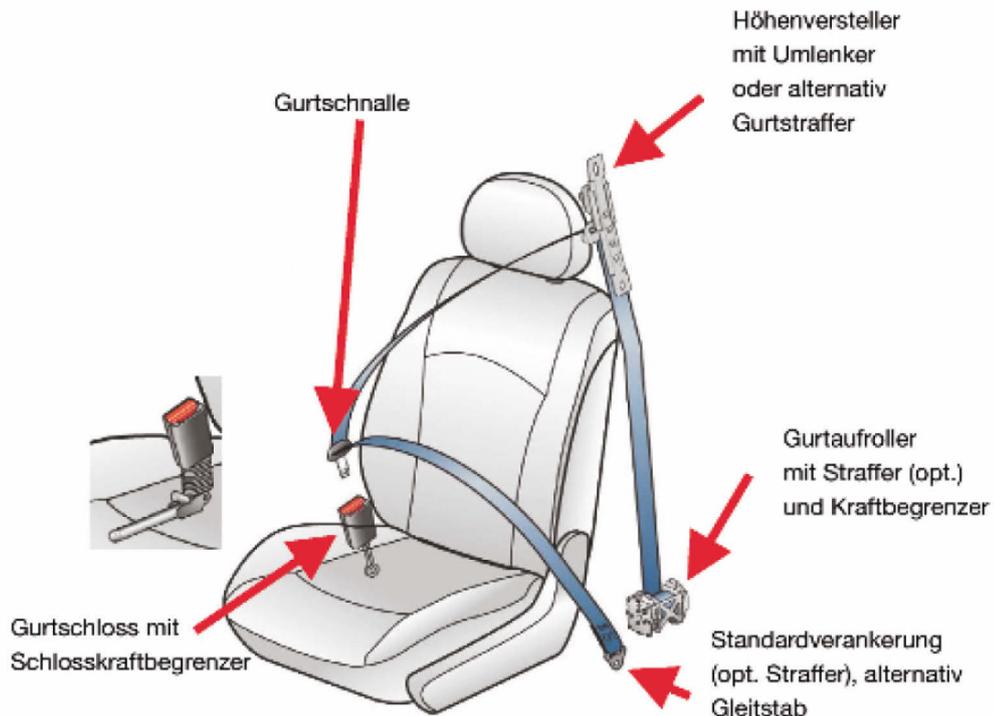


Abbildung 20: 3-Punkt Gurtsystem mit Gurtschlosskraftbegrenzer, Gurtkraftbegrenzer und Gurtstraffer [4]

Weiters gibt es noch Zusatzfunktionen wie Gurtstraffung, Gurtschlosskraftbegrenzer und Gurtkraftbegrenzer, die ebenfalls zur Reduktion der Dummybelastungswerte beitragen [4]. Airbags gewährleisten dem Insassen bei Frontalkollisionen als Zusatzmaßnahme zum Sicherheitsgurt den größtmöglichen zusätzlichen Schutz. Die zahlreichen Airbags in den heutigen Fahrzeugen schützen insbesondere den Kopf und den oberen Torso vor dem Aufprall auf harte Innenraumteile [4]. In der nachfolgenden Abbildung ist beispielsweise eine Airbagausstattung eines modernen PKWs zu sehen [1], [12], [4]:

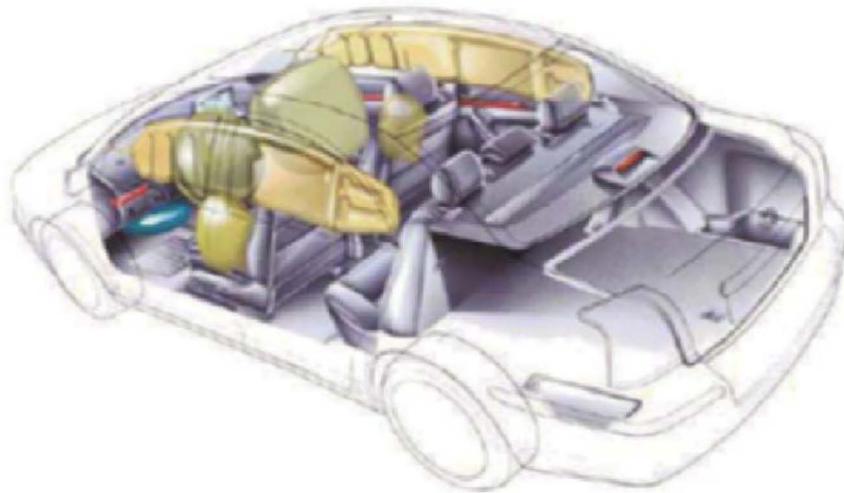


Abbildung 21: Heutige Airbagausrüstung am Beispiel eines Toyotas (Fahrer- und Beifahrer-Airbag, Knie-Airbags, Seiten-Airbags in den vorderen Sitzen sowie durchgehende Kopf-Airbags) [4]

Zusätzlich zu den Rückhaltesystemen können die Dummybelastungswerte auch über den Sitz, das Cockpit oder die Lenksäule beeinflusst werden. Beim Cockpit wird, im speziellen der Kniefänger, so ausgelegt, dass die Dummybelastungswerte minimal werden. Der Kniefänger befindet sich unterhalb der Instrumententafel und dient zum Schutz der unteren Extremitäten bei einer Frontalkollision. Die eingeleitete Energie wird durch die Verformung des Kniefängers absorbiert und verteilt [1]. Die Auslegung des Kniefängers geschieht über die Dicke der Kunststoffplatte des Kniefängers, über die Wahl des Schaumpolsters hinter der Kunststoffplatte und über die Befestigung des Cockpits an der Stirnwand des Fahrzeuges. In der folgenden Abbildung ist die Funktionsweise des Kniefängers und des Airbags zu sehen [1], [12], [4]:

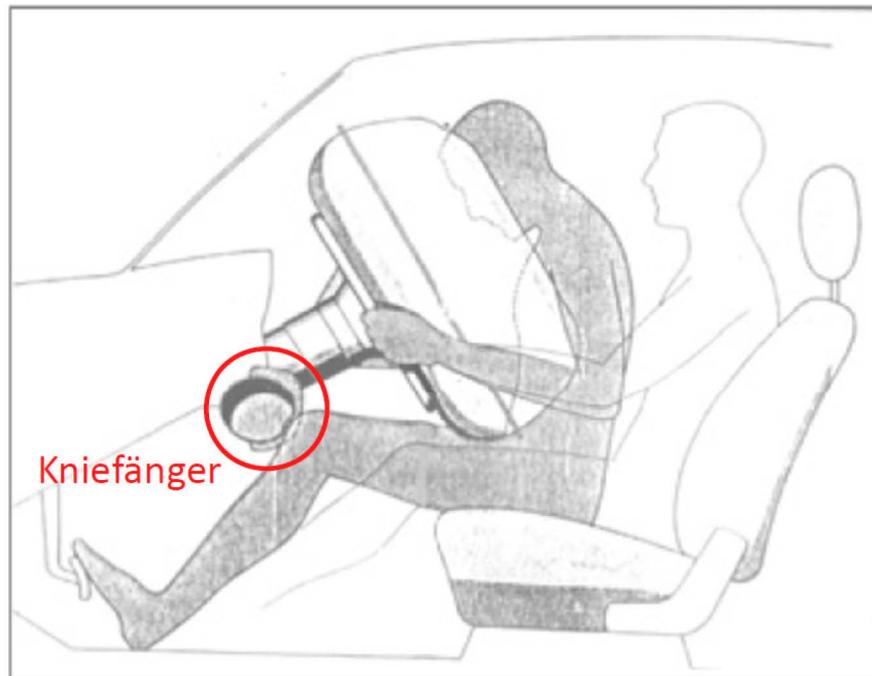


Abbildung 22: Funktionsweise des Kniefängers und des Kopf-Airbags bei einer Frontalkollision nach [1]

Die Lenksäule trägt ebenfalls zu den Dummybelastungswerten bei, wenn sie verschiebbar ausgeführt ist, d.h. wenn der Kopf auf das Lenkrad prallt, bricht oder verformt sich eine Feder, die das Lenkrad in Position hält und dadurch kann es sich bis zu 100mm nach vorne verschieben (typischerweise 80 bis 100mm). Die Lenksäule wirkt somit als Aufpralldämpfer. Um Energie bei einem Unfall abzubauen, ist es vorteilhaft, wenn dem Insassen möglichst viel Weg im Innenraum zur Verfügung steht. Durch dieses energieabsorbierende Element (Feder) in der Lenksäule steht dem Fahrer bis 100mm mehr Vorverlagerungsweg zur Verfügung. In der nachfolgenden Abbildung ist das Prinzip der verschiebbaren Lenksäule dargestellt [3], [4]:

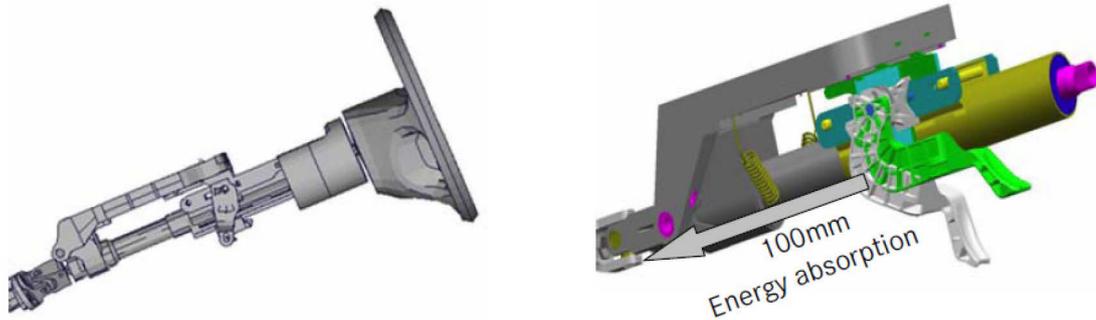


Abbildung 23: Prinzip der verschiebbaren Lenksäule [3]

Weiters kann man die Dummybelastungswerte über den Sitz beeinflussen. Beim Sitz ist das Anti-Submarining-Device in Form und Struktur auf die Dummybelastung auslegbar. Das Anti-Submarining-Device, das meistens als Kunststoffplatte ausgeführt ist, soll das Durchrutschen des Dummys unter das Lenkrad während des Crashvorganges verhindern. In der folgenden Abbildung ist beispielsweise eine Sitzrampe als Submarining-Stütze dargestellt, die das Hinausrutschen des Dummys aus dem Sitz verhindern soll [1]:

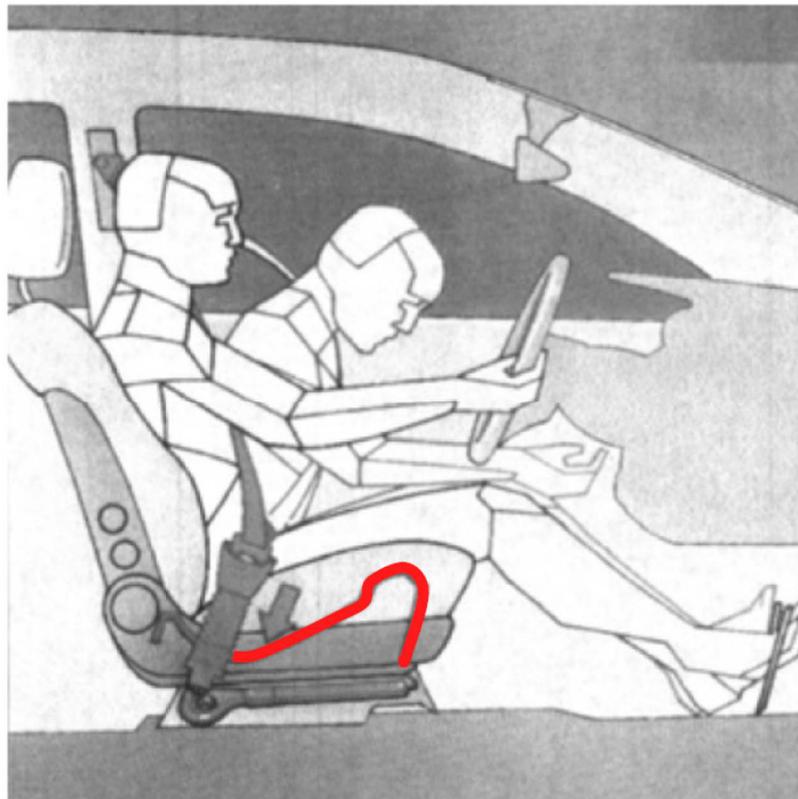


Abbildung 24: Sitzrampe als Submarining-Stütze nach OPEL nach [1]

Der Sitzpolster bzw. die Sitzkonstruktion beeinflussen die Dummybelastungswerte ebenfalls. All diese Maßnahmen zur Beeinflussung der Dummybelastungswerte werden jedoch sehr spät in der Entwicklung des Fahrzeuges getroffen, wenn die gesamte Struktur des Fahrzeuges bereits festliegt und man kaum mehr in diese eingreifen kann. Weiters sind späte Änderungen in der Fahrzeugentwicklung unmittelbar mit sehr hohen Kosten verbunden, da man teure Rückhaltesysteme benötigt, um die gewünschten Dummybelastungswerte zu erreichen. Weiters gibt es beim verfügbaren Platz zur Befestigung des Sitzes bzw. zur Platzierung des Cockpits ebenfalls nur sehr geringen Spielraum, da die Fahrzeugstruktur schon feststeht [1].

Zusammenfassend kann man festhalten, dass die Beeinflussung der Dummybelastungswerte bei gegebener Struktur zwar möglich, aber aufgrund der teuren Rückhaltesysteme mit hohen Kosten verbunden ist [1].

In der nachfolgenden Abbildung sind die Möglichkeiten zur Beeinflussung der Dummybelastungen zusammenfassend dargestellt:

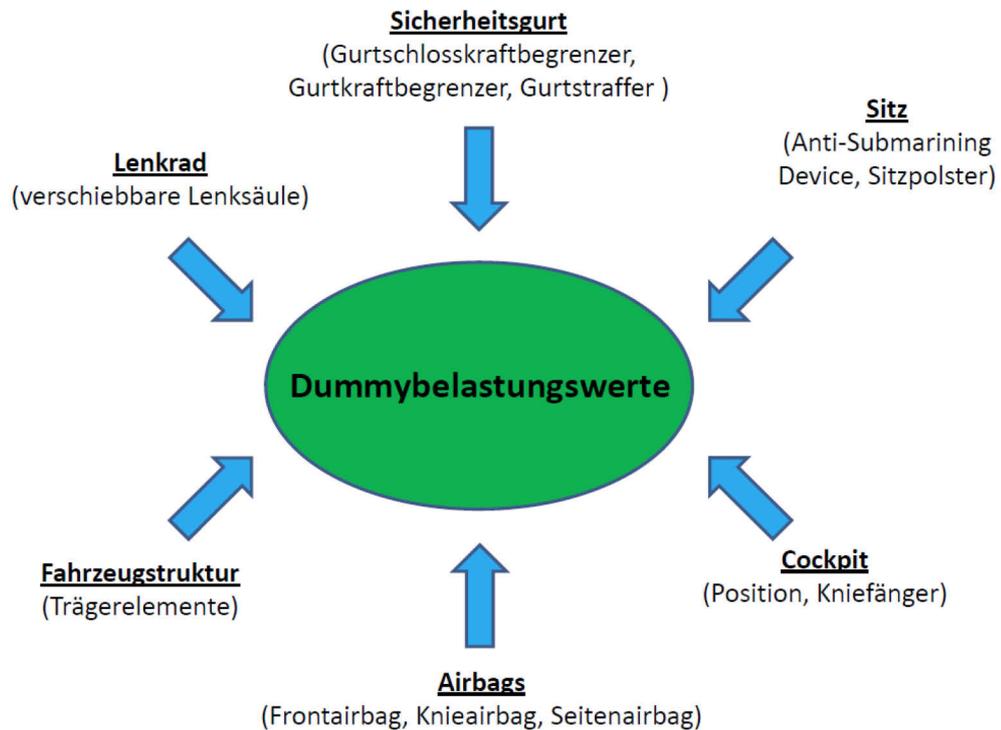


Abbildung 25: Einfluss auf die Dummybelastungswerte

### 2.3 Zukunftsaussichten zum Thema Insassenschutz

Für die Zukunft lassen sich einige Trends zur Verknüpfung der aktiven und passiven Sicherheit ableiten. Diese Trends sind in der folgenden Abbildung verdeutlicht [11]:

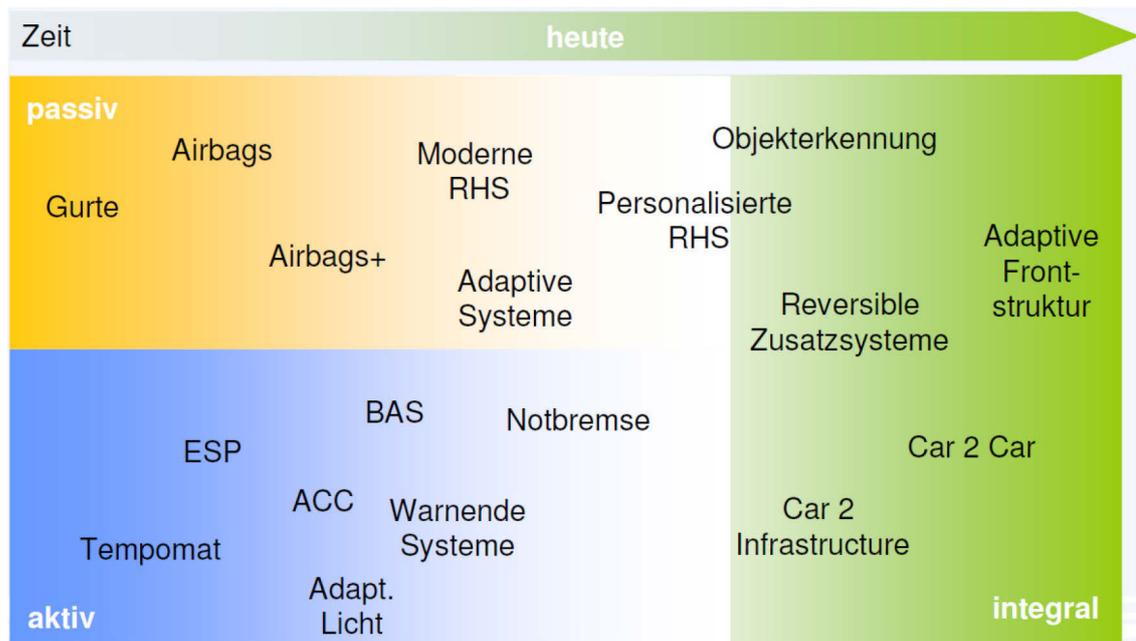


Abbildung 26: Trends zur Verknüpfung der aktiven und passiven Sicherheit [11]

Denkbar wäre bei der Verknüpfung von Fahrerassistenzsystemen mit der passiven Sicherheit beispielsweise eine Objekterkennung durch eine Kamera bzw. ein Radar-System. Die Objekterkennung könnte den Fahrer durch ein Warnsignal, durch einen Lenkeingriff oder auch durch Aktivierung der Bremse unterstützen, einem herannahenden Hindernis auszuweichen. Wenn der Unfall nicht mehr vermeidbar ist, kann ebenfalls unterstützend eingegriffen werden. Die Informationen über das herannahende Objekt können an das Steuergerät weitergeleitet werden, welches wiederum bestimmte Rückhaltekomponenten entsprechend der prognostizierten Unfallschwere aktiviert bzw. deaktiviert [11].

Weiters ist in Zukunft angedacht, eine adaptive Frontstruktur auf den Markt zu bringen. Diese aktive Crashbox ändert in Abhängigkeit der Aufprallrichtung, des Aufprallwinkels, der Geschwindigkeit und Masse die Vorderwagensteifigkeit in Längs- und Querrichtung, so dass der Insassenpuls möglichst schonend für die Personen im Fahrzeug ausfällt. Das heißt durch die Steifigkeit der adaptiven Crashbox wird der Puls möglichst schonend für den Insassen angepasst. Grundlage für diese adaptive Crashbox ist wiederum die Objekterkennung durch eine Kamera bzw. ein Radar-System. In der kommenden Abbildung ist das Prinzip der aktiven Crashbox dargestellt [11]:



Abbildung 27: aktive Crashbox [11]

Das in der obigen Abbildung dargestellte Crashrohr ändert seine Steifigkeit (hohes bzw. niedriges Kraftniveau) abhängig von der Unfallsituation [11].

Weitere Ansätze sind beispielsweise der vorbeschleunigte Insasse. Dabei fährt der Sitz während des Crashvorganges (in der Pre-Crash Phase) nach vor und anschließend wieder zurück. Dadurch wurden deutlich verbesserte Werte bei der Brusteingdrückung festgestellt. Ein weiterer adaptiver Ansatz wäre die aktive Sitzrampe. Diese bewegt sich nach der Unfallerkennung zurück, so dass sich der Insasse während des Crashvorganges möglichst wenig mit dem Becken nach vorne bewegt. Diese Ankoppelung des Fahrers an den Sitz bringt unter anderen Verbesserungen im  $HIC_{15}$  und im  $a_{3ms}$  Wert [11].

### **Fazit:**

Die Objekterkennung und die adaptiven Sicherheitsmaßnahmen zeigen große ungenutzte Potentiale, die in Zukunft sicher aufgegriffen werden müssen, um den ständig steigenden Anforderungen der Verbraucherschutztests weiterhin gerecht zu werden. Weiters wird auch die Pulsauslegung auf die Insassenbelastung dazu beitragen, dass die Fahrzeuge die Verbraucherschutztests möglichst gut erfüllen [11].

## **2.4 Vorgangsweise und Ziele dieser Masterarbeit**

In dieser Masterarbeit wird der Crashpuls derart angepasst, dass die Dummybelastungswerte möglichst gering sind. Das heißt, das Crashpulstuning

reduziert die ursprünglichen Dummybelastungswerte. Um die Auswirkungen des neuen Crashpuls zu festzustellen, ist eine Kopplung zwischen Matlab/Simulink und der FE-Simulation notwendig. Die vom *Kompetenzzentrum – Das virtuelle Fahrzeug* entwickelte Kopplung zwischen der FE-Simulation und Matlab/Simulink wurde für diese Masterarbeit zur Verfügung gestellt. Durch diese Kopplung ist es möglich, einen vorhandenen Puls eines Fahrzeuges durch eine Regelung derart zu verändern, dass die Dummybelastungen reduziert werden. Diese Pulsveränderung gibt Aufschluss darüber, wo man in die Fahrzeugstruktur eingreifen muss, ohne aufwändige und teure Rückhaltesysteme zu installieren. Das heißt, Fahrzeuge, welche einen für die Insassenbelastung nicht zufriedenstellenden Puls besitzen, können durch den aus der Regelung resultierenden Puls derart verbessert werden, dass sich die Dummybelastungswerte reduzieren. Der große Vorteil dieser Vorgangsweise ist, dass bereits in der Konzeptphase, wo die Struktur noch nicht festgelegt ist, erkennbar ist, wo man im Puls eingreifen muss. Somit ist es möglich, die Struktur auf den veränderten Puls hin auszulegen. Zur Erzeugung des veränderten Pulses ist lediglich ein FE-Modell des Fahrzeuges nötig, welches bereits vor dem ersten Prototyp des Fahrzeuges verfügbar ist, d.h. man weiß aus der FE-Simulation schon, wo man in den vorhandenen Puls eingreifen muss. Diese Informationen können dann direkt ins Fahrzeugkonzept aufgenommen werden. In der nachfolgenden Abbildung ist dieser entscheidende Vorteil noch einmal graphisch verdeutlicht:

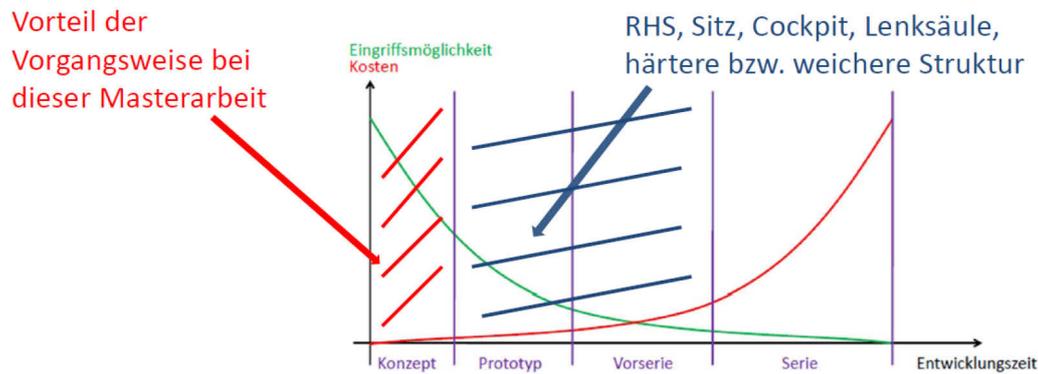


Abbildung 28: Entwicklungskosten und Eingriffsmöglichkeiten während der KFZ-Entwicklung

Wie aus der obigen Abbildung ersichtlich ist, können durch den hier eingeschlagenen Weg sowohl Entwicklungskosten als auch Kosten für teure Rückhaltesysteme gespart werden, da in der Konzeptphase noch eine hohe Eingriffsmöglichkeit in die Struktur des Fahrzeuges gegeben ist. Je später man Änderungen vornehmen muss, desto teurer und schwieriger realisierbar werden diese.

### 3 MODELLBILDUNG

Eine Modellbildung des Crashvorganges ist deshalb zwingend nötig, da das vorhandene FE-Modell, welches den Crashvorgang nachbildet, zu komplex ist und zu viele Freiheitsgrade besitzt. Aufgrund der Detailliertheit des FE-Modells, welches den Gurt, den Airbag, das Lenkrad, Teile des Cockpits (z. Bsp.: den Kniefänger) und den Sitz genau nachbildet, ist es nicht möglich eine schnelle und einigermaßen echtzeitfähige Regelung aufgrund der Simulationsdauer zu realisieren. Für die Regelung ist ein mathematisches Modell, das den Bewegungsvorgang des Dummys in groben Zügen beschreibt, notwendig, da aus dem FE-Modell kein mathematisches Modell abgeleitet werden kann, welches jedoch als Grundvoraussetzung für eine Regelung anzusehen ist, d.h. die Modellbildung ist unumgänglich und zwingend notwendig. Zur Modellierung des Crashvorganges wurden zwei Modelle erstellt, die sich in ihrer Detailliertheit bei der Erfassung des Bewegungsvorganges während des Crashvorgangs unterscheiden. Beide Modelle sollen einen Schlittenversuch nachbilden. Es wurden deshalb zwei Modelle aufgestellt, da für den Reglerentwurf ein mathematisches Modell der Strecke notwendig ist. Dieses Modell soll jedoch möglichst einfach sein und wird daher den Bewegungsvorgang nur prinzipiell beschreiben können. Da der Regler, der mit dem einfachen Modell entworfen wird, auch an einer detaillierten FE-Simulation des Crashvorganges laufen soll, wurde noch ein zweites Modell als Zwischenstufe zwischen dem einfachen physikalischen Modell und der detaillierten FE-Simulation eingeführt. Dieses komplexere Modell des Crashvorganges wurde mit dem Mehrkörpersimulationsprogramm SimMechanics in Simulink erstellt, welches den Bewegungsvorgang wesentlich exakter erfasst als das physikalische Modell. Als Nachteil des SimMechanics-Modells ist das Fehlen eines mathematischen Modells zu nennen, d.h. aus dem SimMechanics-Koppelplan kann das mathematische Modell nicht extrahiert werden. Dafür kann man mit dem SimMechanics Modell sehr einfach eine graphische Visualisierung des Crashvorganges generieren. Diese Visualisierung ist sehr hilfreich bei der Überprüfung, ob sich das Modell durch den veränderten Puls des Reglers noch realistisch verhält.

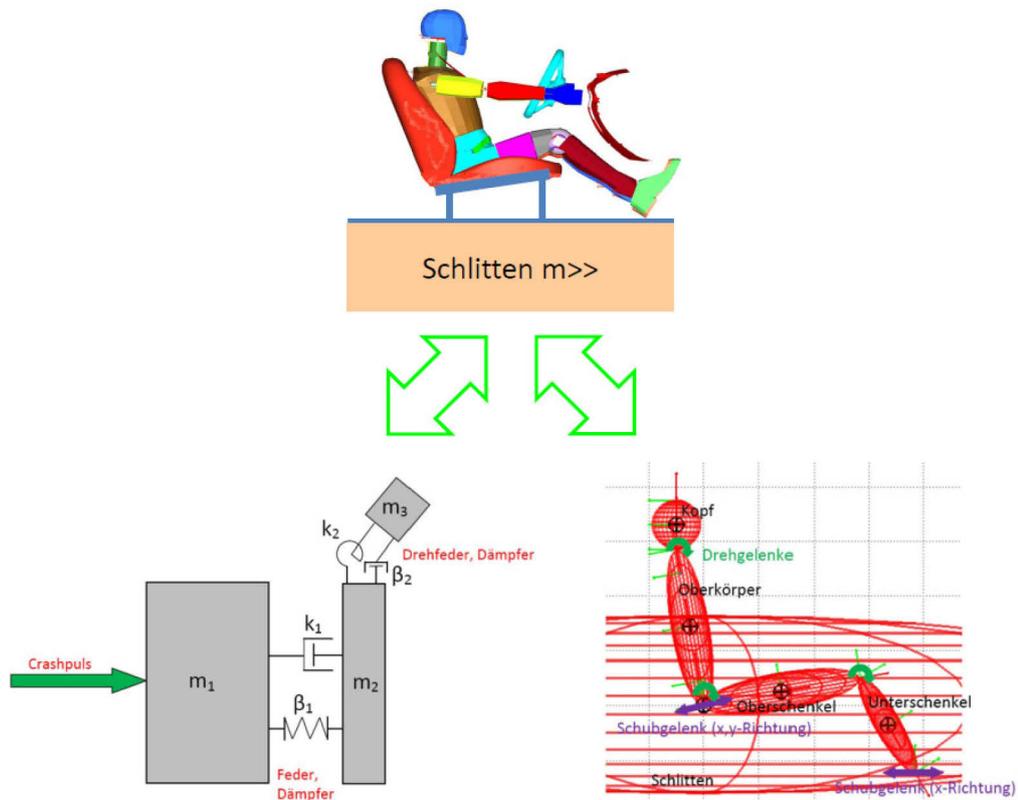


Abbildung 29: Modellierung des Schlittenversuches durch zwei unterschiedliche Modelle

### 3.1 Physikalisches Modell

Das physikalische Modell besteht aus drei Massen, die über Feder-Dämpfer-Elemente miteinander gekoppelt sind. Die erste Masse ( $m_1$ ) repräsentiert den Schlitten, die zweite Masse ( $m_2$ ) modelliert den Körper des Dummies ohne Kopf und die dritte Masse ( $m_3$ ) stellt den Kopf des Dummies dar<sup>1</sup>. Das erste Feder-Dämpfer-Element (das Feder-Dämpfer-Element wird durch die Federkonstante  $k_1$  und die Dämpferkonstante  $\beta_1$  beschrieben) zwischen der Schlittenmasse und dem Körper des Dummies soll den Sicherheitsgurt und das Hinausrutschen des Dummies aus dem Sitz während des Crashvorganges modellieren. Das zweite Feder-Dämpfer-Element (das Feder-Dämpfer-

<sup>1</sup> Die Modellierung erfolgt mit Punktmassen, d.h. die quaderförmigen Massen in der Abbildung 25 dienen nur der besseren graphischen Darstellung.

Element wird durch die Federkonstante  $k_2$  und die Dämpferkonstante  $\beta_2$  beschrieben) zwischen dem Körper und dem Kopf des Dummys modelliert die gedämpfte Drehbewegung des Kopfes beim Crashvorgang. Der Crashpuls, der die Eingangsgröße des physikalischen Modells darstellt, wird direkt auf die Schlittenmasse aufgebracht. Der Schlitten bewegt sich mit einer Anfangsgeschwindigkeit ( $v_0$ ) von 56km/h in x-Richtung, bevor der Crashpuls aufgebracht wird. Mit diesem Crashpuls wird der Crashvorgang nachgebildet.

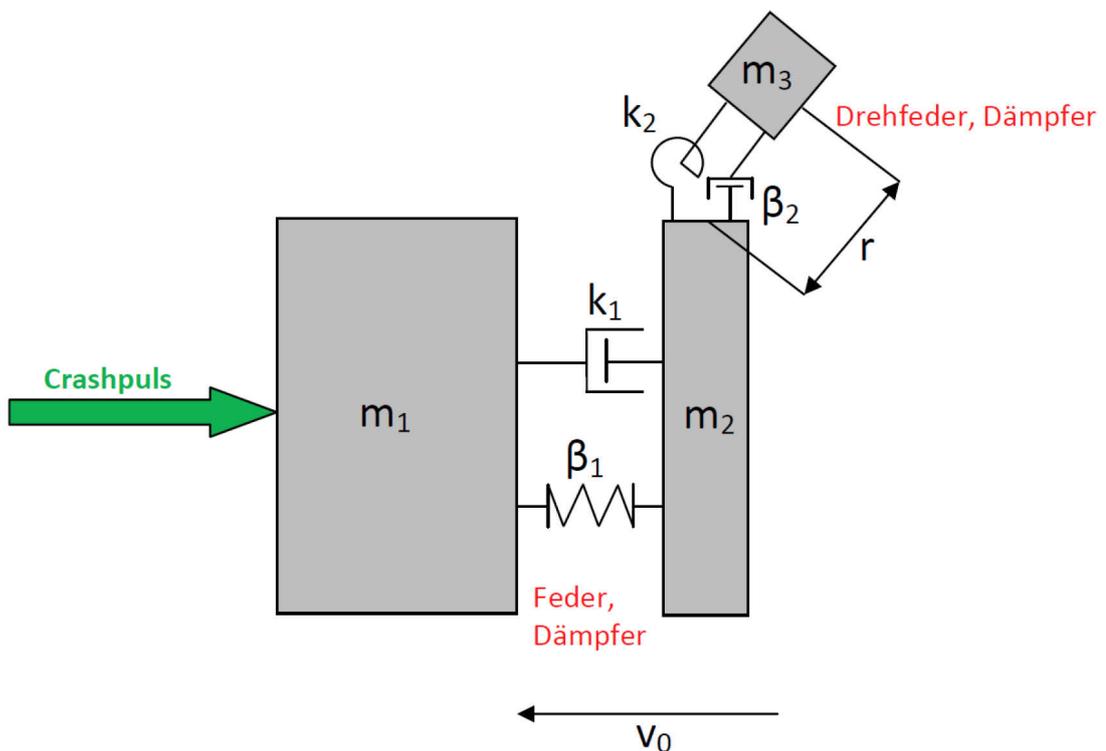


Abbildung 30: Struktur des physikalischen Modells

Das physikalische Modell ist durch folgende 7 Parameter charakterisiert:

- Schlittenmasse  $m_1$
- Masse der Dummys ohne Kopf  $m_2$
- Masse des Dummykopfs  $m_3$
- Federkonstante  $k_1$
- Dämpferkonstante  $\beta_1$
- Federkonstante  $k_2$
- Dämpferkonstante  $\beta_2$

- Der Abstand  $r$  zwischen der Masse  $m_2$  und der Masse  $m_3$

Die Massen  $m_2$  und  $m_3$  wurden aus dem Datenblatt des Frontcrashdummys Hybrid III 50th Percentile Male Datenblatt der Firma DENTON ATD, INC abgeleitet [6]. Für die Schlittenmasse wurde eine sehr große Masse von 100.000kg angenommen. Der Abstand  $r$  wurde mit 16cm angenommen. Somit bleiben die beiden Federkonstanten und die beiden Dämpfungskonstanten als zu bestimmende Parameter übrig.

Die Modellbildung, d.h. das Aufstellen der Bewegungsgleichungen wurde mit dem Formalismus von Lagrange durchgeführt. Hierzu müssen die Lagrange'schen Gleichungen 2. Art aufgestellt werden [13]:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} = Q_j - \frac{\partial P}{\partial \dot{q}_j}$$

In den Lagrange'schen Gleichungen 2.Art steht  $L$  für die Lagrangefunktion,  $P$  für die Dissipationsfunktion,  $q_j$  für die generalisierten Koordinaten und  $Q_j$  für die generalisierten Kräfte [13].

Um die Lagrange'schen Gleichungen 2.Art aufstellen zu können, müssen als erstes die generalisierten Koordinaten eingeführt werden. Bei der Wahl der generalisierten Koordinaten ist darauf zu achten, dass alle Ortsvektoren eindeutig durch die generalisierten Koordinaten bestimmt sind und alle Zwangsbedingungen für beliebige Werte der generalisierten Koordinaten erfüllt sind. In diesem Fall wurden folgende generalisierte Koordinaten gewählt [13]:

- Position des Schwerpunktes der Schlittenmasse  $q_1=x_1$
- Position des Schwerpunktes der Dummymasse ohne Kopf  $q_2=x_2$
- Winkel, der die Verdrehung des Kopfes gegenüber des Körpers beschreibt  $q_3=\phi$

Weiters wurde noch eine Abmessung definiert, nämlich der Abstand des Kopfes von der zweiten Masse. Da der Kopf eine kreisförmige Bewegung durchführt, kann dieser Abstand als Radius ( $r$ ) interpretiert werden.

Die eingeführten generalisierten Koordinaten werden in nachfolgender Abbildung graphisch dargestellt:

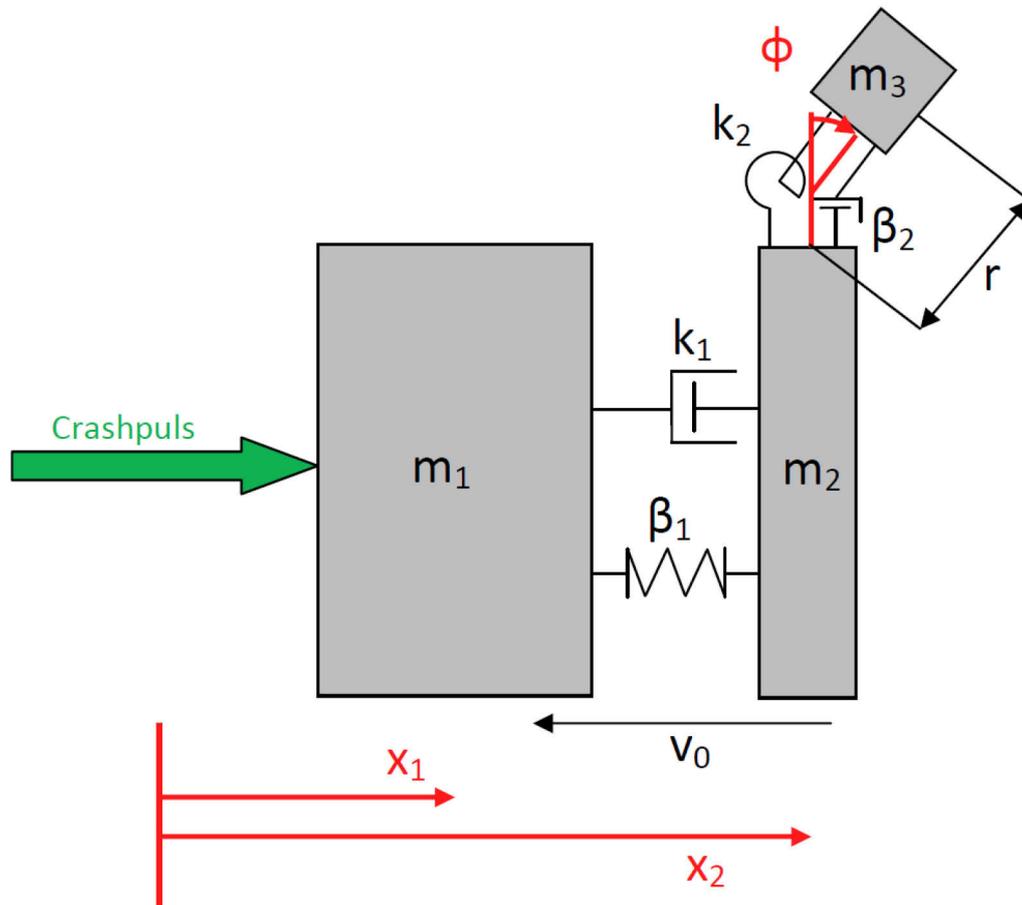


Abbildung 31: generalisierte Koordinaten des physikalischen Modells

Mit Hilfe der soeben eingeführten generalisierten Koordinaten und des Radius ( $r$ ) ist es nun möglich, die Ortsvektoren ( $\underline{r}_1, \underline{r}_2, \underline{r}_3$ ) der drei Massen aufzustellen [13]:

- Ortsvektor der ersten Masse:  $\underline{r}_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ 0 \end{bmatrix}$
- Ortsvektor der zweiten Masse:  $\underline{r}_2 = \begin{bmatrix} x_2 \\ 0 \end{bmatrix}$
- Ortsvektor der dritten Masse:  $\underline{r}_3 = \begin{bmatrix} x_2 + r \cdot \sin(\varphi) \\ r \cdot \cos(\varphi) \end{bmatrix}$

Mit den soeben aufgestellten Ortsvektoren kann nun die kinetische Energie (T) berechnet werden [13]:

$$T = \frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot \underline{\dot{r}}_1^2 + \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot \underline{\dot{r}}_2^2 + \frac{1}{2} \cdot m_3 \cdot \underline{\dot{r}}_3^2$$

Das Potential (V) ergibt sich zu [13]:

$$V = \frac{1}{2} \cdot k_1 \cdot (x_2 - x_1)^2 + \frac{1}{2} \cdot k_2 \cdot \varphi^2$$

Da nun das Potential (V) und die kinetische Energie (T) bekannt sind, kann die sogenannte Lagrange-Funktion (L) berechnet werden [13]:

$$L = T - V$$

Die Dissipationsfunktion (P) ergibt sich zu [13]:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \beta_1 \cdot \left( \underline{\dot{r}}_2 - \underline{\dot{r}}_1 \right)^2 + \frac{1}{2} \cdot \beta_2 \cdot \left( \underline{\dot{r}}_3 \right)^2$$

Die generalisierten Kräfte (Q<sub>j</sub>) ergeben sich schließlich zu [13]:

$$Q_j = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Somit sind alle Größen bekannt, um die Lagrange'schen Gleichungen 2. Art aufzustellen [13]:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} = Q_j - \frac{\partial P}{\partial \dot{q}_j} \quad \text{für } j = 1, 2, 3$$

Zu einfacheren Handhabung werden die Lagrange'schen Gleichungen 2. Art in Matrixschreibweise eingeführt [13]:

$$\underline{M} \cdot \underline{\ddot{q}} + \underline{D} \cdot \underline{\dot{q}} + \underline{r} = \underline{\tau}$$

In der Matrixschreibweise steht  $\underline{M}$  für die Massenmatrix,  $\underline{D}$  für die Dämpfungsmatrix und  $\underline{r}$  für den Rest. Der Vektor  $\underline{\tau}$  auf der rechten Seite beinhaltet lediglich die generalisierten Kräfte [13]:

$$\underline{\tau} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix}$$

Die Massenmatrix, die Dämpfungsmatrix und der Vektor  $\underline{r}$  ergeben sich zu [13]:

$$\underline{M} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 T}{\dot{q}_1^2} & \frac{\partial^2 T}{\dot{q}_1 \dot{q}_2} & \frac{\partial^2 T}{\dot{q}_1 \dot{q}_3} \\ \frac{\partial^2 T}{\dot{q}_2 \dot{q}_1} & \frac{\partial^2 T}{\dot{q}_2^2} & \frac{\partial^2 T}{\dot{q}_2 \dot{q}_3} \\ \frac{\partial^2 T}{\dot{q}_3 \dot{q}_1} & \frac{\partial^2 T}{\dot{q}_3 \dot{q}_2} & \frac{\partial^2 T}{\dot{q}_3^2} \end{bmatrix}, \underline{D} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 T}{\dot{q}_1 \partial q_1} & \frac{\partial^2 T}{\dot{q}_1 \partial q_2} & \frac{\partial^2 T}{\dot{q}_1 \partial q_3} \\ \frac{\partial^2 T}{\dot{q}_2 \partial q_1} & \frac{\partial^2 T}{\dot{q}_2 \partial q_2} & \frac{\partial^2 T}{\dot{q}_2 \partial q_3} \\ \frac{\partial^2 T}{\dot{q}_3 \partial q_1} & \frac{\partial^2 T}{\dot{q}_3 \partial q_2} & \frac{\partial^2 T}{\dot{q}_3 \partial q_3} \end{bmatrix}, \underline{r} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 T}{\dot{q}_1 \partial t} - \frac{\partial T}{\partial q_1} \\ \frac{\partial^2 T}{\dot{q}_2 \partial t} - \frac{\partial T}{\partial q_2} \\ \frac{\partial^2 T}{\dot{q}_3 \partial t} - \frac{\partial T}{\partial q_3} \end{bmatrix}$$

Für die Simulation ist ein System von Differentialgleichungen 1.Ordnung sehr vorteilhaft. Die vorliegenden Differentialgleichungen sind jedoch 2.Ordnung, daher wird dieses System in ein System von Differentialgleichungen 1.Ordnung umgeformt [13]:

Man definiert dazu einen neuen Zustandsvektor  $\underline{z}$ , der den zeitlichen Ableitungen der generalisierten Koordinaten entspricht [13]:

$$\underline{z} = \dot{\underline{q}}$$

Mit diesem neuen Zustandsvektor ergeben sich die Lagrange'schen Gleichungen 2.Art zu [13]:

$$\underline{M} \cdot \dot{\underline{z}} + \underline{D} \cdot \underline{z} + \underline{r} = \underline{\tau}$$

Das Ziel ist es, ein Zustandsraummodell der Form  $\dot{\underline{x}} = f(\underline{x}, t)$  zu erhalten. Dies ist durch Umformung der Lagrange'schen Gleichung 2.Art und mit der Einführung des endgültigen Zustandsvektors  $\underline{x}$  möglich [13]:

Die Umformung der Lagrange'schen Gleichungen 2.Art nach der zeitlichen Ableitung der Zustandsgrößen  $\underline{z}$  ergibt sich zu [13]:

$$\dot{\underline{z}} = -\underline{M}^{-1} \cdot \underline{D} \cdot \underline{z} - \underline{M}^{-1} \cdot \underline{r} + \underline{M}^{-1} \cdot \underline{\tau}$$

Zusammen mit  $\dot{\underline{q}} = \underline{z}$  und  $\underline{x} = \begin{bmatrix} \underline{q} \\ \underline{z} \end{bmatrix}$  ergibt sich das Zustandsraummodell zu [13]:

$$\dot{\underline{x}} = \begin{bmatrix} \underline{0} & \underline{E} \\ \underline{0} & -\underline{M}^{-1} \cdot \underline{D} \end{bmatrix} \cdot \underline{x} + \begin{bmatrix} \underline{0} \\ -\underline{M}^{-1} \cdot \underline{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{0} \\ \underline{M}^{-1} \cdot \underline{\tau} \end{bmatrix}$$

Dieses Zustandsraummodell entspricht einem nichtlinearen System 6.Ordnung [13].

### 3.2 SimMechanics Modell

Das zweite Modell wurde mit der Mehrkörpersimulationstoolbox SimMechanics erstellt. Dieses Modell besteht aus 5 Körpern, die über diverse Gelenke miteinander verbunden sind. Der Dummy selbst besteht aus 4 Körpern:

- dem Kopf,
- dem Oberkörper, der beide Arme und den Oberkörper selbst repräsentiert,
- dem Oberschenkel, der wiederum beide Oberschenkel repräsentiert,
- und dem Unterschenkel, der beide Unterschenkel und beide Füße repräsentiert.

Die Modellierung des Dummys wurde in Anlehnung an [8] durchgeführt. Der Schlitten selbst ist der 5. Körper im SimMechanics-Modell. Alle 5 Körper wurden über den Trägheitstensor in der SimMechanics-Toolbox als Ellipsoide festgelegt. Weiters wurden die einzelnen Massen in der Toolbox definiert.

Der Schlitten ist über zwei Schubgelenke mit dem Dummy verbunden. Das erste Schubgelenk (x-Richtung) befindet sich am unteren Ende des Unterschenkels. Das zweite Schubgelenk (x,y-Richtung) befindet sich zwischen dem Oberkörper und dem Oberschenkel des Dummys. Beide Schubgelenke dienen der Beschreibung des Herausrutschens des Dummys aus dem Sitz während dem Crashvorgang. Alle Körper des Dummys sind durch Drehgelenke miteinander verbunden, die zur Modellierung

der Bewegung des Dummies dienen. Allen Gelenken im SimMechanics-Modell sind zusätzlich Feder- und Dämpferkonstanten zugeordnet, die die Elastizität und Dämpfung der einzelnen Gelenke modellieren. Der Crashpuls, der den Crashvorgang repräsentiert, wird wie auch beim physikalischen Modell direkt auf den Schlitten aufgebracht. Dieser hat wiederum eine Anfangsgeschwindigkeit von 56km/h und kann sich nur in x-Richtung bewegen.

In der nachfolgenden Abbildung ist das SimMechanics-Modell graphisch dargestellt:

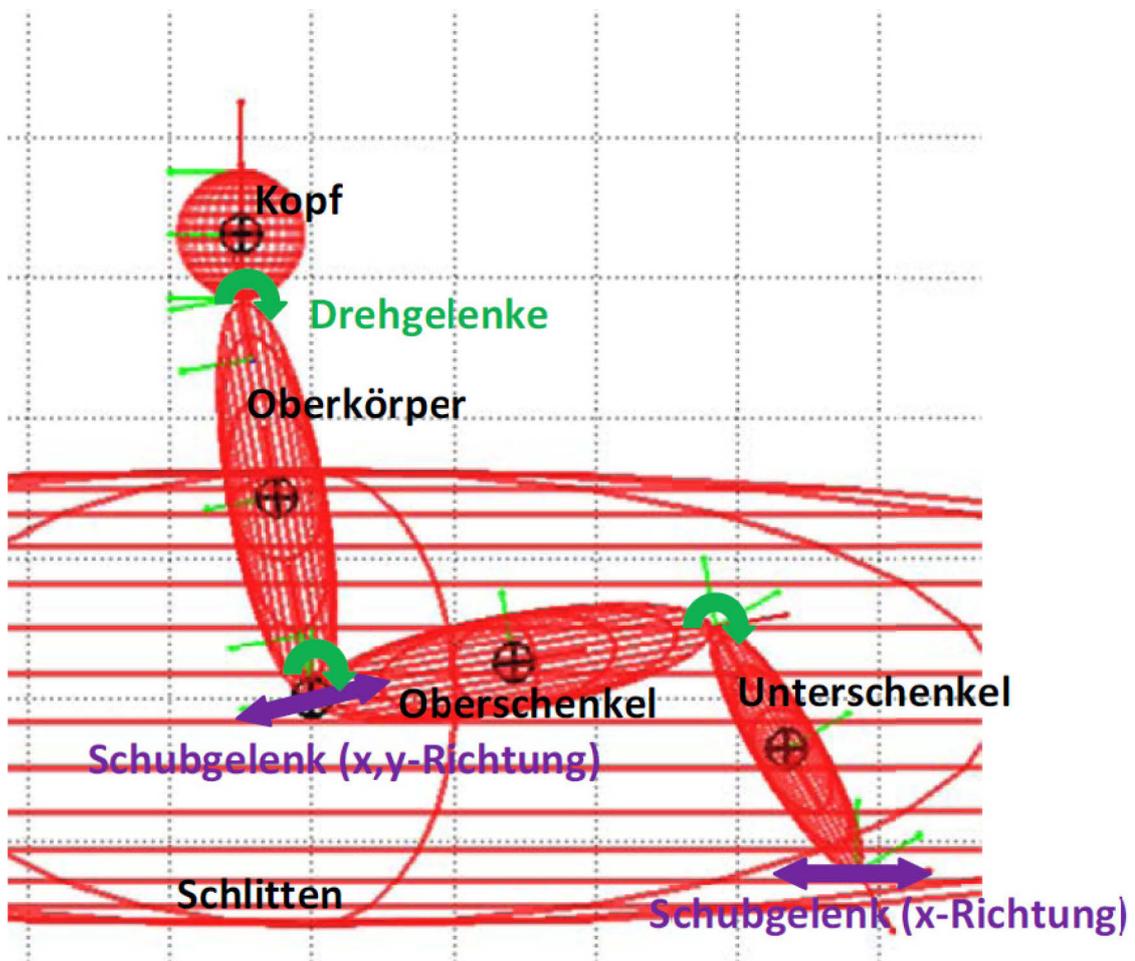


Abbildung 32: SimMechanics-Modell

Zusätzlich ist im SimMechanics-Modell noch ein einfaches Sicherheitsgurtmodell integriert. Der Sicherheitsgurt wirkt an zwei Angriffspunkten am Dummy, einerseits ca. 9cm unter dem Drehgelenk zwischen Kopf und Oberkörper, das den Schulterangriffspunkt des Gurtes modellieren soll und andererseits ca. 9cm oberhalb des Drehgelenkes zwischen Oberkörper und Oberschenkel, welches den

Beckenangriffspunkt des Gurtes modellieren soll. Der Sicherheitsgurt wird sowohl für den Schulterangriffspunkt als auch für den Beckenangriffspunkt durch eine Look-Up-Tabelle modelliert. Die Look-Up-Tabelle bestimmt die Gurtkraft, die abhängig von der Relativbewegung zwischen Dummy und Sitz auf den Dummy wirkt. Die beiden Look-Up-Tabellen sind in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt, wobei auf der x-Achse die relative Bewegung von Dummy und Sitz und auf der y-Achse die Gurtkraft aufgetragen ist. Weiters ist noch anzumerken, dass sowohl die Schultergurtkraft als auch die Beckengurtkraft nur in x-Richtung wirken.

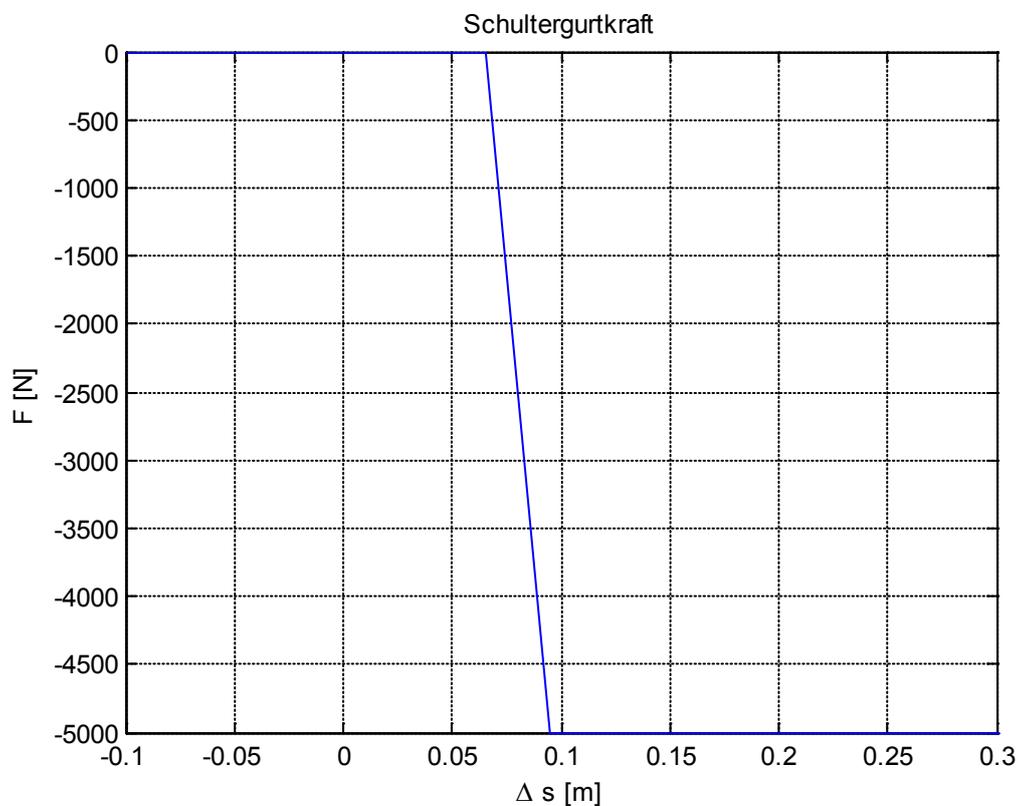


Abbildung 33: Look-Up-Tabelle für die Schultergurtkraft

Die Relativbewegung zwischen Dummy und Schlitten, währenddessen noch keine Gurtkraft auf den Dummy wirkt, stellt die Gurtlose des Dummies dar, welche standardmäßig ca. 65mm beträgt. Während der Gurtlose, das ist jener Weg, bei dem der Dummy noch nicht über den Gurt an das Fahrzeug angekoppelt ist, bewegt sich der Insasse, ohne dass er vom Gurt zurückgehalten wird, nach vorne. Weiters ist anzumerken, dass die Schultergurtkraft auf 5kN begrenzt ist.

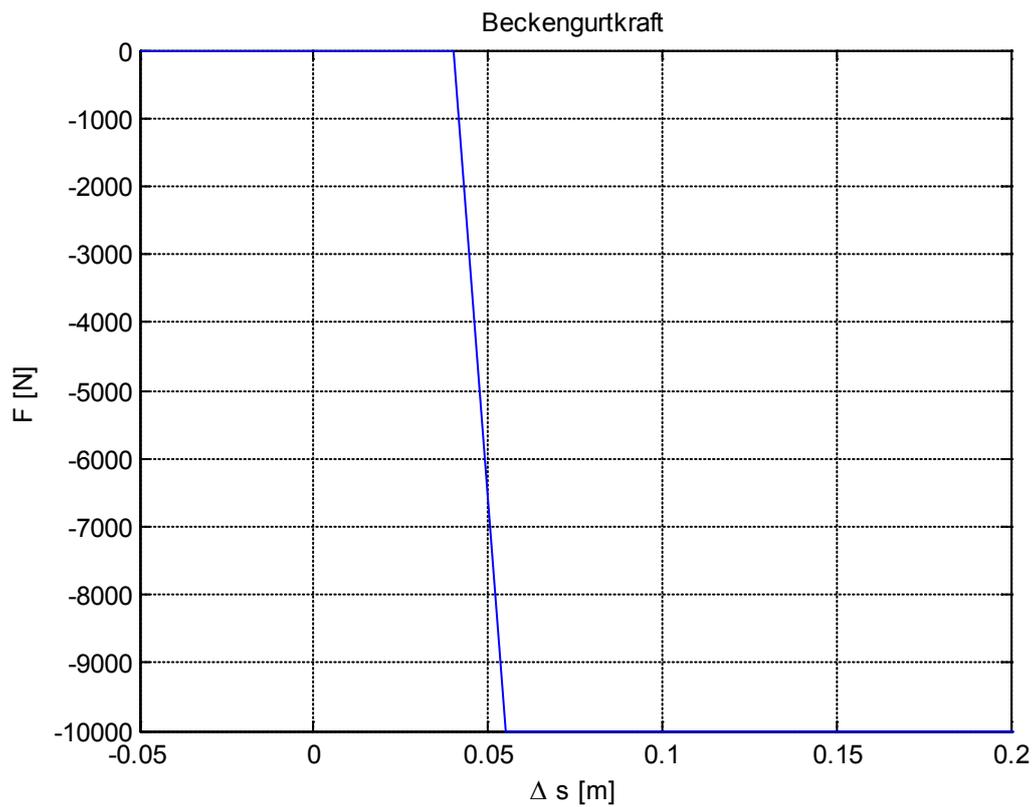


Abbildung 34: Look-Up-Tabelle für die Beckengurtkraft

Die Gurtlose des Dummys muss auch für die Beckengurtkraft berücksichtigt werden, diese ist jedoch mit ca. 40mm etwas geringer als beim Schultergurt, wo sie noch 65mm betrug. Die Beckengurtkraft wird hier auf 10kN begrenzt. Die Werte für die beiden Gurtlose sind aus der FE-Simulation abgeleitet.

In der nachfolgenden Abbildung sind die Angriffspunkte des Sicherheitsgurtes im SimMechanics- Modell graphisch dargestellt:

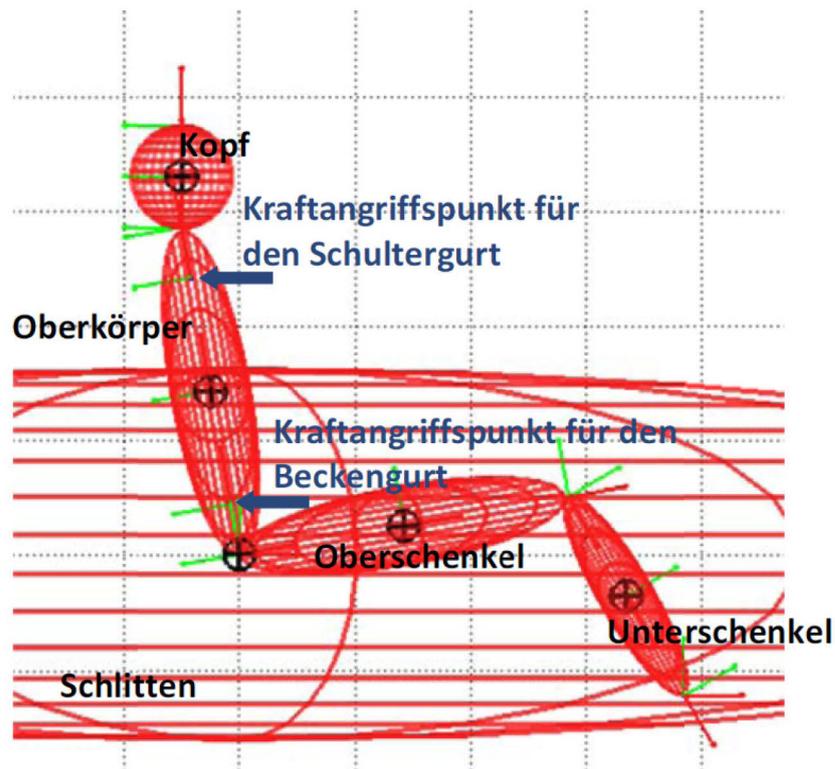


Abbildung 35: Angriffspunkte des Sicherheitsgurtes am Dummy

Das SimMechanics-Modell ist durch folgende Parameter charakterisiert:

- Parameter des Kopfes: Masse und Abmessungen
- Parameter des Drehgelenkes zwischen Kopf und Oberkörper: Feder- und Dämpferkonstante
- Parameter des Oberkörpers: Masse und Abmessungen
- Parameter des Drehgelenkes zwischen Oberkörper und Oberschenkel: Feder- und Dämpferkonstante
- Parameter des Oberschenkels: Masse und Abmessungen
- Parameter des Drehgelenkes zwischen Oberschenkel und Unterschenkel: Feder- und Dämpferkonstante
- Parameter des Unterschenkels: Masse und Abmessungen
- Parameter des Schubgelenkes (x,y-Achse) zwischen Schlitten und Dummy: Feder- und Dämpferkonstante
- Parameter des Schlittens: Masse und Abmessungen

Das Schubgelenk (x-Achse) zwischen Schlitten und Unterseite des Unterschenkels wurde als ideal angenommen. Somit ist die Feder- und Dämpferkonstante dieses Gelenks gleich 0. Die Parameter des Kopfes, des Oberkörpers, des Oberschenkels und des Unterschenkels wurden wie schon beim physikalischen Modell aus dem Datenblatt des Hybrid III 50th Percentile Male Dummies der Firma DENTON ATD, INC abgeleitet [6]. Jene Abmessungen, die nicht im Datenblatt auffindbar waren, wurden nachträglich geschätzt. Die Parameter des Schlittens wurden wieder angenommen. Die Schlittenmasse wurde erneut mit 100.000kg sehr groß gewählt. Da die Abmessungen nicht entscheidend für die Bewegung während des Crashvorganges sind, wurden diese so gewählt, dass sie ca. den Abmessungen eines typischen Schlittens entsprechen. Die einzelnen Körper des Dummies wurden als Ellipsoide modelliert, wobei der Kopf eine Kugel darstellt und somit ein Sonderfall eines Ellipsoids ist. Der Schlitten wird ebenfalls als Ellipsoid modelliert. Um dies in SimMechanics festzulegen, müssen für jeden einzelnen Körper der entsprechende Trägheitstensor und die dazugehörige Masse angegeben werden. Der Trägheitstensor für Ellipsoide bzw. Kugeln lässt sich einfach aus den Abmessungen berechnen:

Trägheitstensor für ein Ellipsoid mit den Halbachsen a, b, c und der Masse m:

$$\underline{I}_{\text{Ellipsoid}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{5} \cdot m \cdot (b^2 + c^2) & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{5} \cdot m \cdot (a^2 + c^2) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{5} \cdot m \cdot (a^2 + b^2) \end{bmatrix}$$

Trägheitstensor für eine Kugel mit der Masse m und dem Radius r:

$$\underline{I}_{\text{Kugel}} = \begin{bmatrix} \frac{2}{5} \cdot m \cdot r^2 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2}{5} \cdot m \cdot r^2 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2}{5} \cdot m \cdot r^2 \end{bmatrix}$$

Da alle Abmessungen bekannt sind, können alle Trägheitstensoren der einzelnen Körper in das SimMechanics-Modell eingetragen werden.

Somit bleiben auch hier die Feder- und Dämpfungskonstanten der einzelnen Gelenke als zu bestimmende Parameter übrig.

### 3.3 Ausgangsgröße der Strecke

Das entscheidende Kriterium bei der Wahl der Ausgangsgröße ist, dass durch die Beschränkung dieser Ausgangsgröße eine relevante Dummybelastung (hier: HIC) positiv beeinflusst wird. Die Beschränkung der Ausgangsgröße wird durch eine Folgeregelung realisiert. Als Ausgangsgröße wurde der Betrag der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Kopf und Schlitten gewählt, d.h. die Ausgangsgröße kann als Betrag der Differenz der zeitlichen Ableitungen der Ortsvektoren angeschrieben werden:

$$y = \left| \dot{\underline{r}}_3 - \dot{\underline{r}}_1 \right| = \left| \begin{array}{c} \dot{x}_2 + r \cdot \cos(x_3) \cdot \dot{x}_3 - \dot{x}_1 \\ - r \cdot \sin(x_3) \cdot \dot{x}_3 \end{array} \right| =$$

$$= \sqrt{x_5^2 + 2 \cdot x_5 \cdot r \cdot \cos(x_3) \cdot x_6 - 2 \cdot x_5 \cdot x_4 - 2 \cdot r \cdot \cos(x_3) \cdot x_6 \cdot x_4 + x_4^2 + r^2 \cdot x_6^2}$$

Die FE-Simulation bestätigte die Wahl dieser Ausgangsgröße, da dieser gewählte relevante Dummybelastungswert durch die Beschränkung dieser Ausgangsgröße herabgesetzt wurde. Durch die Herabsetzung des HIC-Wertes wurden auch die meisten restlichen Dummybelastungswerte reduziert, d.h. durch die Reduktion des HIC-Wertes gehen die restlichen Dummybelastungswerte tendenziell ebenfalls zurück. Daher ist die Wahl der Ausgangsgröße als sinnvoll anzusehen.

### 3.4 Modellverifikation, Parameterbestimmung

Die Parameter des physikalischen und des SimMechanics – Modells wurden so bestimmt, dass die Ausgangsgröße der Modelle mit der Ausgangsgröße der FE-Simulation möglichst gut übereinstimmt. Dabei wurden beide Modelle mit dem unveränderten Puls angeregt. Als erstes wurde versucht, die Parameter mit den von MATLAB/Simulink zur Verfügung gestellten nichtlinearen Optimierungsmethoden zu bestimmen. Dies führte jedoch ausschließlich zu unbrauchbaren Ergebnissen, da diese

Modelle nicht den komplexen Bewegungsvorgang während eines Frontalcrashes ausreichend genau beschreiben können. Deshalb wurde versucht, die Parameter des physikalischen und des SimMechanics Modells zumindest in dem interessanten Zeitraum des Frontalcrashes näherungsweise zu bestimmen. Der interessante Zeitraum ist hier von 0 bis ca. 70ms, da in diesem Zeitraum der HIC-Wert stetig ansteigt und bei ca. 70ms sein Maximum erreicht. Da die Dummybelastungswerte ab ca. 70ms typischerweise wieder abnehmen, ist dieser Zeitraum ausreichend für die Modellierung des Crashvorgangs, da ein Pulseingriff nach der maximalen Dummybelastung nicht mehr sinnvoll ist. Für die Parameterwerte

- $k_1=135000$  N/m
- $k_2=300$  N/m
- $\beta_1=140$  Ns/m
- $\beta_2=1$  Ns/m

des physikalischen Modells sowie für die Parameterwerte

- des Drehgelenkes zwischen Kopf und Oberkörper:  
Federkonstante=180 N/m und Dämpferkonstante=0.1 Ns/m
- des Drehgelenkes zwischen Oberkörper und Oberschenkel:  
Federkonstante=800 N/m und Dämpferkonstante=1 Ns/m
- des Drehgelenkes zwischen Oberschenkel und Unterschenkel:  
Federkonstante=250 N/m und Dämpferkonstante=50 Ns/m
- des Schubgelenkes (x,y-Achse) zwischen Schlitten und Dummy:  
Federkonstante=150000 N/m und Dämpferkonstante=10 Ns/m

des SimMechanics Modells ergibt sich eine zufriedenstellende Übereinstimmung der einzelnen Ausgangsgrößen. Das Ergebnis der Parameterbestimmung ist in der nachfolgenden Abbildung ersichtlich:

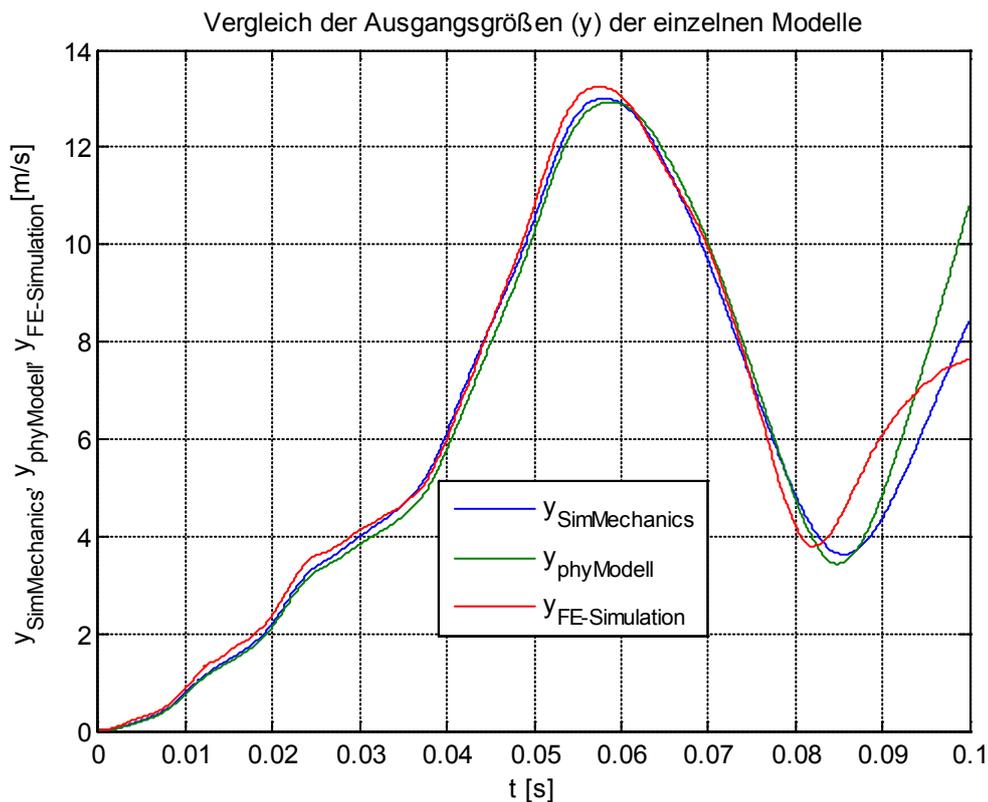


Abbildung 36: Vergleich der Ausgangsgrößen der einzelnen Modelle auf Basis der Daten des Mercedes C300

Wie aus der obigen Abbildung ersichtlich ist, stimmen die Ausgangsgrößen der einzelnen Modelle bis ca. 80ms sehr gut überein. Sowohl das relativ einfache physikalische Modell als auch das SimMechanics Modell können die Ausgangsgröße sehr gut abbilden. Gegen Ende der Simulationszeit (ab ca. 80ms) treten dann jedoch stärkere Differenzen in den einzelnen Ausgangsgrößen auf. Der letzte Anstieg der Ausgangsgröße kann weder mit dem physikalischen noch mit dem SimMechanics-Modell nachgebildet werden. Dies ist jedoch nicht dramatisch, da sich hier der Kopf bereits im Rebound befindet und ein Pulseingriff hier nicht mehr nötig ist. Der Rebound (d.h. das Rückfedern des Dummys nach dem Einschlag in den Airbag) ist ein äußerst komplexer Bewegungsvorgang, der mit diesen beiden einfachen Modellen nicht abgebildet werden kann. Um das Rückfedern besser nachzubilden, würde man eine bessere Nachbildung der Wirbelsäule benötigen. Die Parameterbestimmung wurde auf Basis der Daten des Mercedes C300 durchgeführt. Um zu zeigen, dass die soeben bestimmten Parameter nicht nur das Verhalten des Mercedes C300

beschreiben, ist in der folgenden Abbildung das Ergebnis für die Daten des Toyota Scion zu sehen:

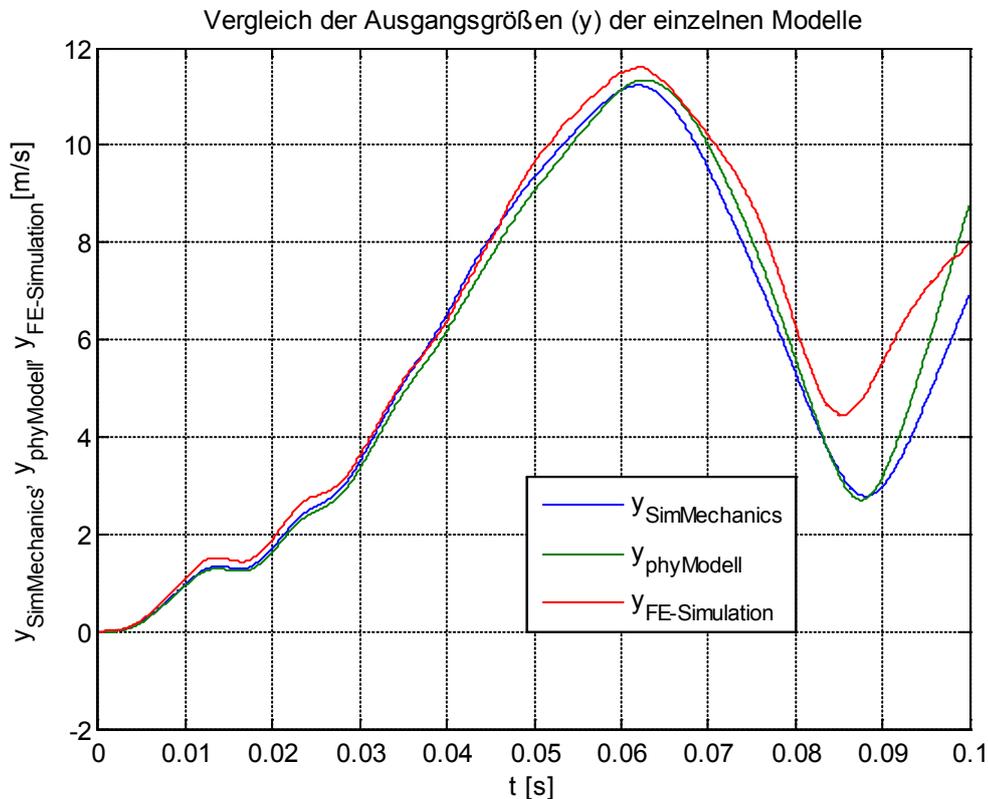


Abbildung 37: Vergleich der Ausgangsgrößen der einzelnen Modelle auf Basis der Daten des Toyota Scion

Auch beim Vergleich der Ausgangsgrößen des Toyota Scion stimmen die einzelnen Modelle bis ca. 80ms sehr gut überein. Danach sind wieder Differenzen in der Ausgangsgröße zu erkennen, die jedoch nicht so sehr ausschlaggebend sind, da sich der Kopf wie bereits erwähnt schon in der Rückwärtsbewegung befindet.

Da das prinzipielle Verhalten der Ausgangsgröße bei allen Fahrzeugen zufriedenstellend abgebildet wird, werden diese Parameter für die Modelle übernommen.

## 4 REGELUNG

Das Ziel der Regelung besteht darin, den vorhandenen Crashpuls derart durch den Regler zu verändern, dass die Dummybelastungswerte die gewünschten Grenzwerte nicht überschreiten. Dies wird durch die Reduktion des HIC-Wertes gewährleistet, da durch diese Reduktion die restlichen relevanten Dummybelastungswerte in den meisten Fällen ebenfalls reduziert werden.

### 4.1 Regelkreisstruktur

Als Ausgangspunkt wird der Standard-Regelkreis verwendet. In diesem wirkt der vorhandene Crashpuls direkt auf die nichtlineare Strecke 6.Ordnung. Der Regler sorgt nun durch seine Ausgangsgröße  $v$  dafür, dass der vorhandene Crashpuls verändert wird, damit die Ausgangsgröße  $y$  der Führungsgröße  $r$  folgen kann. Der verwendete Regelkreis ist in der folgenden Abbildung graphisch dargestellt in dem  $e$  als Regelfehler und  $u$  als Eingangsgröße der Strecke zu verstehen ist.

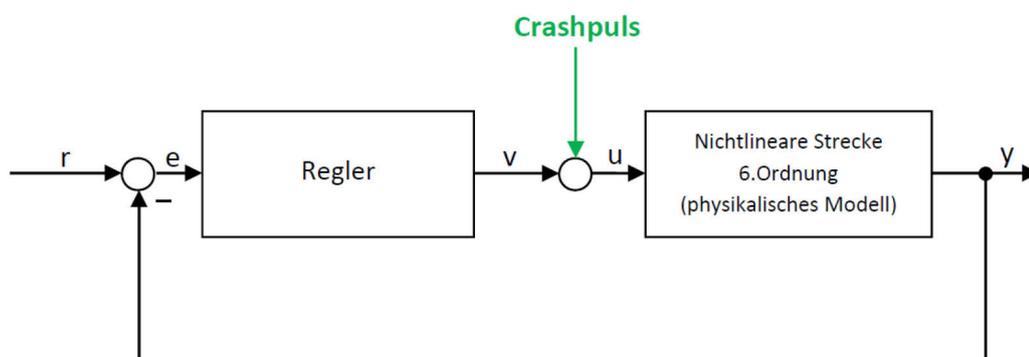


Abbildung 38: Standard-Regelkreis

### 4.2 Exakte Linearisierung

Da es sich bei der Strecke um ein nichtlineares System 6.Ordnung handelt und die Regelung dieser Strecke nur schwer möglich ist, wurde eine Eingangs-Ausgangslinearisierung vorgenommen. Bei der Eingangs-Ausgangslinearisierung wird

die gesamte Nichtlinearität der Strecke kompensiert, so dass ein lineares Eingangs-Ausgangsverhalten resultiert. Das lineare Eingangs-Ausgangsverhalten entspricht einer Integriererkette, wobei die Anzahl der hintereinandergeschalteten Integrierer vom relativen Grad abhängig ist. Der relative Grad ist die Anzahl der Differentiationen der Ausgangsgröße, die nötig sind, damit die Eingangsgröße in der Ausgangsgröße explizit vorkommt. Ist der relative Grad kleiner als die Systemordnung, existiert eine interne Dynamik der Ordnung  $n-\delta$ , wobei  $n$  die Systemordnung und  $\delta$  der relative Grad sind. Da die Zustandsvariablen der internen Dynamik keinen Einfluss auf die Ausgangsgröße haben, sind diese nicht beobachtbar. Die interne Dynamik beeinflusst die lineare Dynamik der geregelten Ausgangsgröße  $y$  nicht. Sie ist jedoch entscheidend für die Dynamik des Gesamtsystems. Daher muss die interne Dynamik stabil sein, damit das Gesamtsystem stabil ist. Sollte dies nicht der Fall sein, ist die Methode der exakten Linearisierung nicht anwendbar, da ein instabiles Verhalten der internen Dynamik eine Regelung aufgrund der Instabilität des Gesamtsystems unmöglich macht [9].

#### 4.2.1 Bestimmung des relativen Grades

Als Ausgangsgröße der nichtlinearen Strecke wurde der Betrag der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Kopf und Schlitten gewählt:

$$y = \sqrt{x_5^2 + 2 \cdot x_5 \cdot r \cdot \cos(x_3) \cdot x_6 - 2 \cdot x_5 \cdot x_4 - 2 \cdot r \cdot \cos(x_3) \cdot x_6 \cdot x_4 + x_4^2 + r^2 \cdot x_6^2}$$

Da die erste Ableitung der Ausgangsgröße  $y$  bereits eine Funktion der Eingangsgröße  $u$  ist, ist der relative Grad in unserem Fall 1:

$$\frac{dy}{dt} = \dot{y} = g(\underline{x}, u_1) \rightarrow \underline{\delta = 1}$$

Das heißt aber gleichzeitig auch, dass eine interne Dynamik von der Systemordnung 5 (Ordnung der internen Dynamic:  $n-\delta$ ) existiert, welche nicht beobachtbar ist. Diese interne Dynamik muss ein stabiles Verhalten aufweisen, da sonst die Methode der Eingangs-Ausgangslinearisierung nicht funktioniert (siehe 4.2). Die interne Dynamik wurde hier auf Grund der komplexen Berechnung nicht explizit berechnet, d.h. der Stabilitätsbeweis der internen Dynamik bzw. der Nulldynamik wurde nicht

mathematisch durchgeführt. Eine Vielzahl von durchgeführten numerischen Simulationen lässt darauf schließen, dass die interne Dynamik stabil ist.

#### 4.2.2 Ermittlung der Kompensation

Zur Ermittlung der Kompensation wird die  $\delta$ -Ableitung gleich einer neuen Eingangsgröße  $v$  gesetzt.

$$\delta \dot{y} = \dot{y} = g(\underline{x}, u_1) = v$$

Aus dieser Gleichung wird nun  $u_1$  ausgerechnet. Somit ergibt sich die Kompensation zu:

$$u_1 = h(\underline{x}, v)$$

Mit der soeben berechneten Kompensation ergibt sich der Standard-Regelkreis mit der Eingangs-Ausgangs-Linearisierung zu:

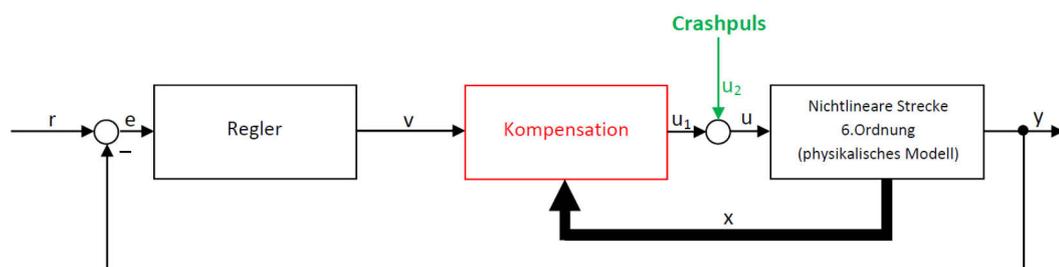


Abbildung 39: Standard-Regelkreis mit Eingangs-Ausgangslinearisierung

Mit der Eingangs-Ausgangslinearisierung erreicht man ein lineares System zwischen dem Eingang  $v$  und dem Ausgang  $y$ . Dieses lineare System ist in unserem Fall ein Integrator, da der relative Grad der Strecke 1 ist.

#### 4.2.3 Modifikation der Kompensation

Nach genauer Analyse der Kompensation wurde festgestellt, dass durch die Anfangsbedingung, die durch die Anfangsgeschwindigkeit von 56km/h bei US-NCAP Frontalcrash resultiert,

$$\underline{x}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{56}{3.6} \\ \frac{56}{3.6} \\ 0 \end{bmatrix}$$

eine Division durch 0 im Nenner entsteht. Daher wurde im Nenner eine Konstante von  $1 \cdot 10^{-5}$  hinzugegeben, um dieses Problem zu lösen. Da sich der Kompensationsterm in der Größenordnung von  $10^7$  bewegt, ist diese Konstante irrelevant für die Genauigkeit der Lösung. Als letztes wurde noch die Änderungsgeschwindigkeit des Kompensationsterms durch einen Rate-Limiter in Simulink begrenzt. Dieser sorgt dafür, dass die steigende und fallende Flanke der Kompensation mit  $10^{12}$  begrenzt ist. Die modifizierte Kompensation und der Rate-Limiter sind in der folgenden Abbildung zu sehen:

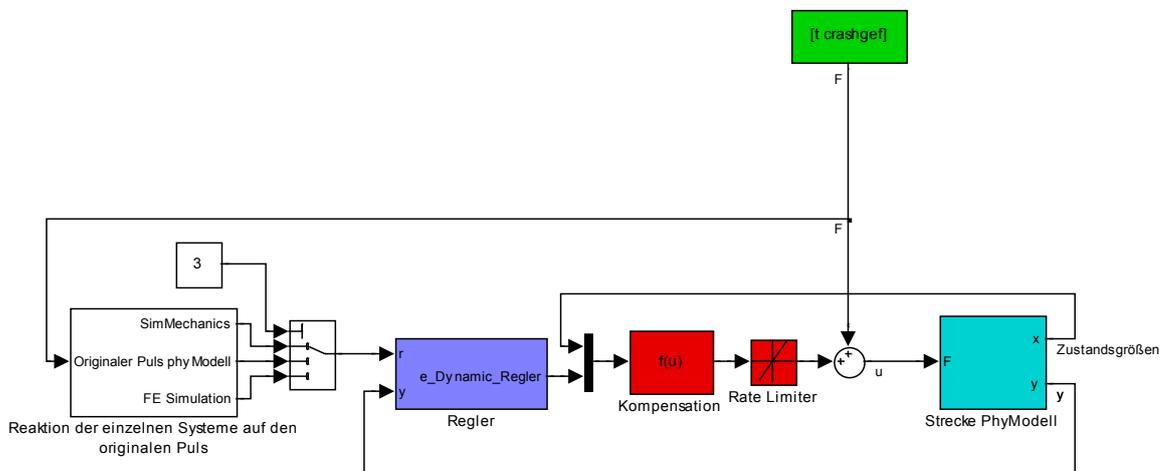


Abbildung 40: Modifizierte Kompensation mit Rate Limiter

All diese Maßnahmen tragen zu einem robusteren Verhalten der Kompensation bei und führen dazu, dass die Kompensation keine unerwünscht hohen Stellgrößen produziert, die die Strecke zu einem instabilen Verhalten zwingen.

### 4.3 Reglerentwurf

Der Reglerentwurf kann aufgrund der Eingangs-Ausgangslinearisation für das lineare System durchgeführt werden, d.h. die Strecke ist in diesem Fall der Integrator und nicht das nichtlineare System 6. Ordnung. Somit ergibt sich folgender Standard-Regelkreis für den Reglerentwurf:

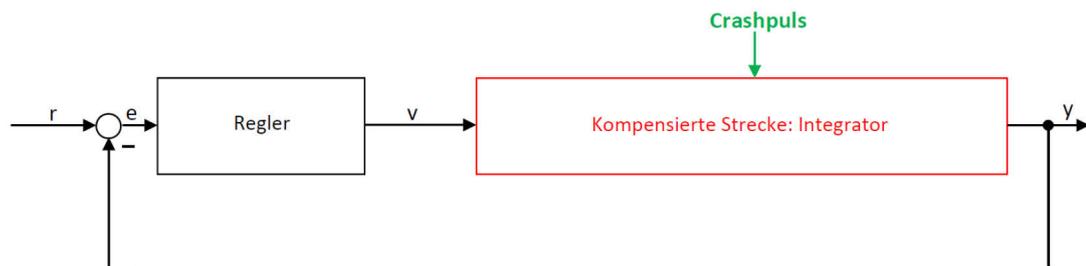


Abbildung 41: Standard-Regelkreis für den Reglerentwurf

Die Folgeregelung wird durch einen Regler, der auf der Fehlerdynamik basiert, gewährleistet. Der Regelfehler ergibt sich dabei zu:

$$e = r - y$$

Die zeitliche Ableitung des Regelfehlers ergibt sich zu:

$$\dot{e} = \dot{r} - \dot{y}$$

Die zeitliche Ableitung von  $y$  ist jedoch die neue Eingangsgröße  $v$ . Somit resultiert die neue Eingangsgröße  $v$  zu:

$$\dot{e} = \dot{r} - \dot{y} = \dot{r} - v \rightarrow v = \dot{r} - \dot{e}$$

Anschließend wird die Fehlerdynamik festgelegt:

$$\dot{e} + \alpha \cdot e = 0$$

Aus dieser Fehlerdynamik resultiert folgendes charakteristisches Polynom für den Fehler:

$$\Delta_e(s) = s + \alpha$$

Der Parameter  $\alpha$  ist dabei so zu wählen, dass das charakteristische Polynom des Fehlers ein Hurwitz-Polynom ist, d.h.  $\alpha$  muss größer 0 gewählt werden.

Setzt man nun die Fehlerdynamik in die Gleichung für die neue Eingangsgröße  $v$  ein, resultiert folgendes Regelgesetz:

$$\begin{aligned} \dot{e} + \alpha \cdot e = 0 &\rightarrow \dot{e} = -\alpha \cdot e \\ \underline{\underline{y}} = \dot{r} - \dot{e} = \dot{r} - \alpha \cdot e = \underline{\underline{\dot{r} - \alpha \cdot r - \alpha \cdot y}} \end{aligned}$$

Dieser Regler sorgt nun dafür, dass der Regelfehler asymptotisch gemäß dem angesetzten charakteristischen Polynom gegen 0 geht.

#### 4.4 Generierung der Führungsgröße

Ziel ist es, die Führungsgröße so festzulegen, dass möglichst alle relevanten Dummybelastungswerte reduziert werden insbesondere der HIC-Wert. Gleichzeitig muss aber darauf geachtet werden, dass nur an realistischen Stellen in den vorhandenen Crashpuls eingegriffen wird, da dieser veränderte Puls auch realisierbar sein soll. Der realisierbare Pulseingriff wird durch eine geeignete Wahl der Führungsgröße realisiert. In der Simulation gibt es zwei Möglichkeiten, die Führungsgröße zu definieren. In der ersten Variante wird die Führungsgröße aus dem Minimum der originalen Differenzgeschwindigkeit und einer Begrenzungsfunktion gebildet, d.h. die originale Differenzgeschwindigkeit, die aus dem originalen Puls resultiert, wird durch die Begrenzungsfunktion begrenzt. Es gibt zusätzlich noch die Möglichkeit, die Begrenzungsfunktion direkt als Führungsgröße zu definieren, d.h. man kreiert selbst eine Führungsgröße, die nicht zwingend etwas mit der originalen Differenzgeschwindigkeit zu tun hat.

## 5 SIMULATION

### 5.1 FE-Modell

Das FE-Modell ist eine realitätsnahe Abbildung des Schlittenversuchs. In diesem Modell sind alle Körper verformbar modelliert. Weiters sind der Gurt, der Airbag, der Sitz, das Lenkrad, Teile der Fahrgastzelle und Teile des Cockpits genau abgebildet. Der Schlittenversuch wird durch den auf das FE-Modell aufgetragenen Puls nachgestellt. In der folgenden Abbildung ist dieses Schlittenersatzsystem dargestellt:

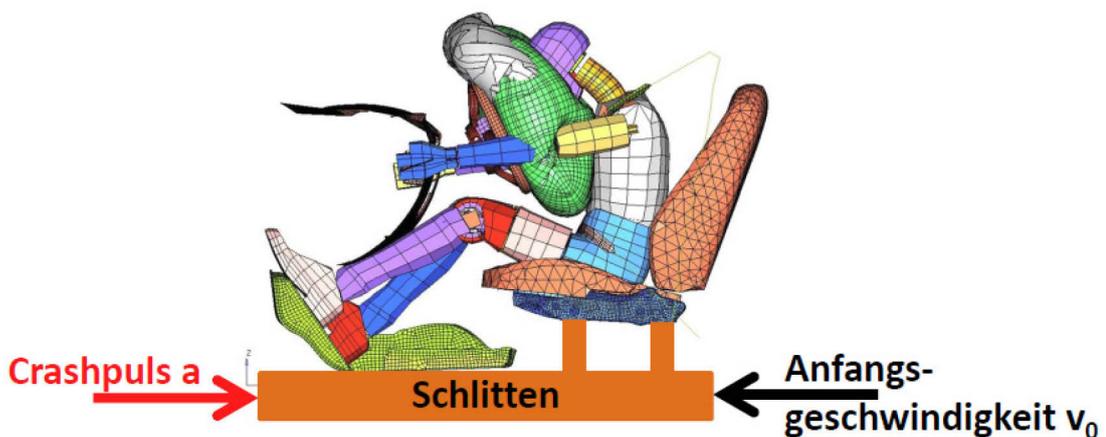


Abbildung 42: Schlittenersatzsystem: FE-Modell

### 5.2 Konfiguration

Die Simulation dient der Nachbildung des Frontalaufpralls gemäß dem US-NCAP Vorgaben, d.h. das Auto prallt mit einer Geschwindigkeit von 56km/h und 100% Überdeckung gegen eine starre Barriere. Der einzige Unterschied zum US-NCAP Test besteht darin, dass der Beifahrer hier nicht berücksichtigt wird. Es wird lediglich der Fahrer durch die Modellbildung des Schlittenversuchs erfasst. In der nachfolgenden Abbildung ist die Ausgangssituation für den Crashvorgang graphisch dargestellt.

# US NCAP

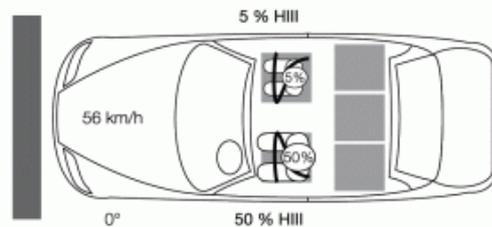


Abbildung 43: Crashkonfiguration des Frontalaufpralls gemäß US NCAP [7]

Während dieses Crashvorganges wird durch den Regler der vorhandene Crashpuls derart verändert, dass die Ausgangsgröße des Crashmodells der vorgegebenen Führungsgröße möglichst genau folgt. Die Führungsgröße wird je nach Fahrzeug, wie in Abschnitt 4.4 erläutert, festgelegt. Der durch die Regelung resultierende veränderte Puls wird direkt an die FE-Simulation weitergegeben, um dort die Auswirkungen des veränderten Pulses zu untersuchen. In der folgenden Abbildung ist der Koppelplan, der zur Regelung des Schlittenpulses nötig ist, dargestellt:

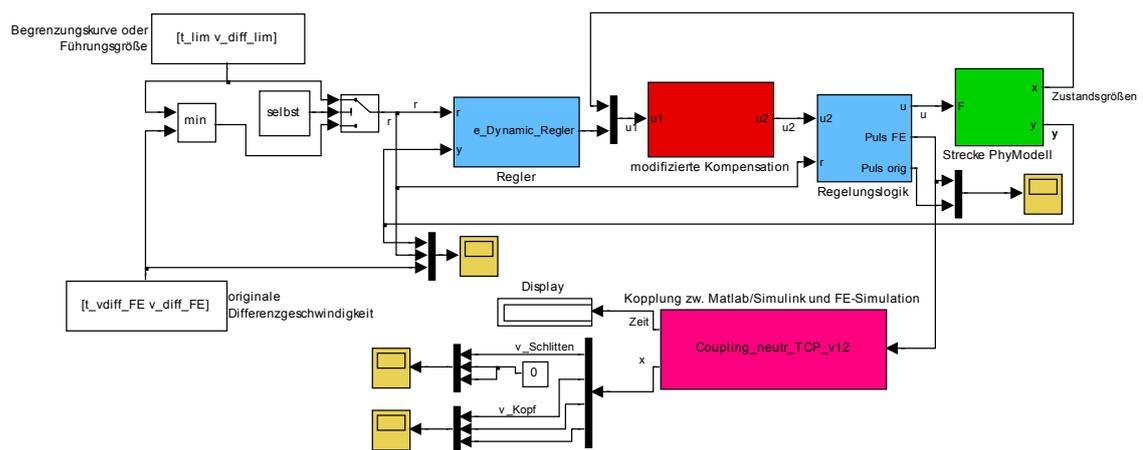


Abbildung 44: Koppelplan zur Simulation des US-NCAP Lastfalls

Dieser Koppelplan ist die Grundlage für alle Simulationen, die in Folge durchgeführt wurden.

## 5.3 Kopplung zwischen Matlab/Simulink und FE-Solver LS

### DYNA

Die Kopplung zwischen Matlab/Simulink und FE-Solver LS DYNA wurde vom *Kompetenzzentrum – Das virtuelle Fahrzeug* entwickelt und für diese Masterarbeit zur Verfügung gestellt. Die Kopplung wurde durch eine S-Function, die in C programmiert wurde, realisiert. Sie benötigt als Eingang den Crashpuls mit positivem Integral, während die Ausgänge beliebig definiert werden können. In diesem Fall wurden als Ausgänge die Geschwindigkeiten des Schlittens, des Kopfschwerpunkts und die aktuelle Simulationszeit gewählt. In der nachfolgenden Abbildung ist der Koppelplan, der zur Kopplung zwischen Matlab/Simulink und FE-Simulation nötig ist, zu sehen.

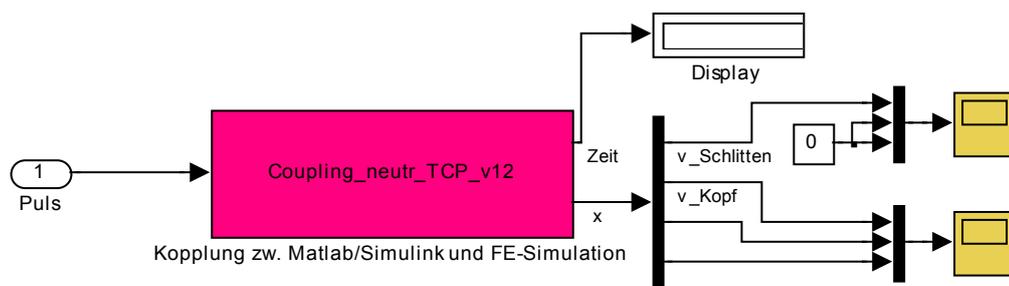


Abbildung 45: Kopplung zwischen Matlab/Simulink und FE-Simulation

## 5.4 Ergebnisse

### 5.4.1 FE-Differenzgeschwindigkeit des unveränderten Pulses als Führungsgröße ohne Kopplung mit der FE-Simulation

Als erste Führungsgröße wurde die Differenzgeschwindigkeit aus der FE-Simulation, welche durch den unveränderten Puls resultiert, ausgewählt. Der dazugehörige Koppelplan ist in der nachfolgenden Abbildung zu sehen:

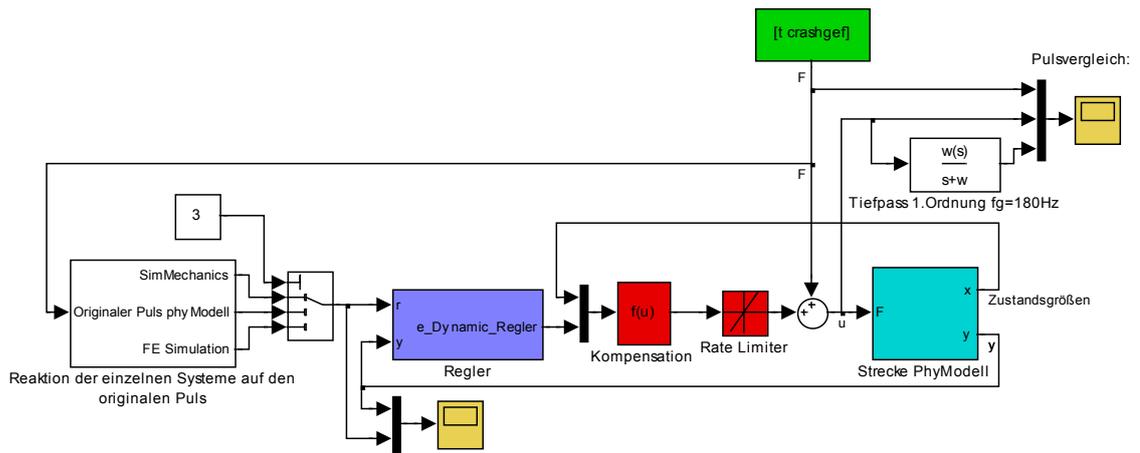


Abbildung 46: Koppelplan mit der FE-Differenzgeschwindigkeit als Führungsgröße

Diese Führungsgröße dient einerseits der Überprüfung des entworfenen Reglers und andererseits der Überprüfung der aufgestellten Modelle auf ihre Genauigkeit der Abbildung des Crashvorgangs. In der folgenden Abbildung sind die Führungsgröße und die tatsächliche Ausgangsgröße des physikalischen Modells zu sehen:

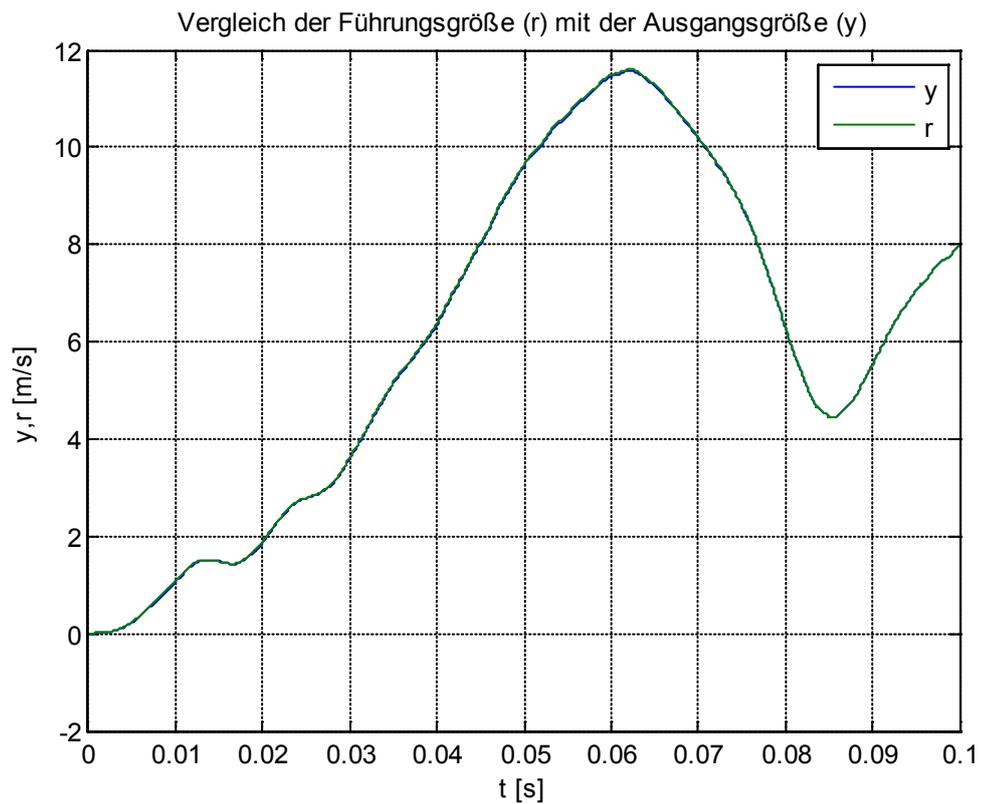


Abbildung 47: Vergleich zwischen der Führungsgröße und der Ausgangsgröße des physikalischen Modells am Beispiel eines charakteristischen Crashpulses

Wie aus der Abbildung 47 ersichtlich ist, kann der Regler der Führungsgröße exakt folgen. In der nächsten Abbildung ist der Vergleich zwischen dem unveränderten Puls und dem durch den Regler veränderten Puls zu sehen:

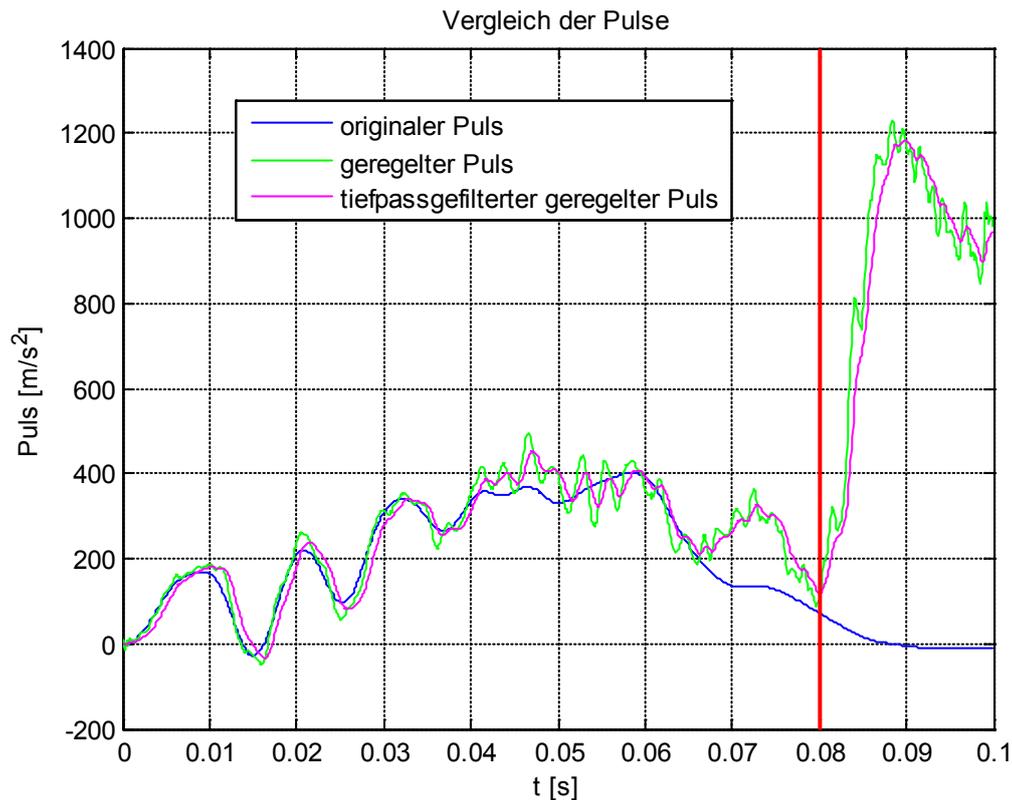


Abbildung 48: Vergleich des unveränderten mit dem veränderten Puls anhand eines charakteristischen Crashpulses

Hier wird noch einmal klar ersichtlich, dass die einzelnen Modelle bis ca. 80ms sehr gut mit dem Verhalten aus der FE-Simulation übereinstimmen, da der Regler den vorhandenen Puls kaum verändert und schön nachfährt. Erst ab ca. 80ms (rote Linie) weicht der durch den Regler veränderte Puls stark vom originalen Puls ab, da das physikalische Modell eine andere Stellgröße benötigt als die FE-Simulation, um die gewünschte Führungsgröße nachzufahren. Dies resultiert aus dem unterschiedlichen Verhalten der Modelle ab ca. 80ms. Da die Dummybelastung bei ca. 80ms schon in der Abklingphase (siehe Abbildung 48) und hier kein Pulseingriff mehr nötig ist, sind diese Modelle ausreichend für die mathematische Beschreibung des Crashvorganges.

## 5.4.2 Regelungslogik

Die Regelungslogik sorgt dafür, dass der originale Puls zum Ausgangssignal der Kompensation addiert wird, damit die Pulsveränderung gewährleistet ist. Der

veränderte Puls wird außerdem noch mit einem Tiefpass-Filter 1.Ordnung gefiltert, bevor der Puls in die Kopplung zur FE-Simulation gelangt. Weiters sorgt die Regelungslogik dafür, dass der veränderte Puls, der in die FE-Simulation gelangt, ein positives Integral besitzt, da durch die Wahl der Ausgangsgröße (Betrag der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Kopf und Schlitten) auch der Puls mit einem negativen Integral als veränderter Puls zulässig ist. Auf Grund der in 5.4.1 ermittelten Grenze, bei der die Modelldifferenzen zwischen dem physikalischen Modell und der FE-Simulation deutlich in Erscheinung treten, wurde die Regelungslogik so entworfen, dass sie den Regler ab dieser Grenze unwirksam macht, da durch die Modelldifferenzen ab diesem Zeitpunkt (bei ca. 80ms) keine sinnvolle Pulsveränderung entstehen würde. Zusätzlich wird noch die Energie über das Integral des veränderten Pulses ermittelt. Durch den Vergleich der Energie des veränderten Pulses mit der Energie des originalen Pulses kann man den Zeitpunkt bestimmen, bei welchem die Energie des Crashvorgangs abgebaut ist. Dies ist genau dann der Fall, wenn beide Energien denselben Wert erreicht haben. Somit wird der Regler auch dann außer Kraft gesetzt, wenn der Energieabbau bereits abgeschlossen ist oder spätestens wenn die Simulationszeit 80ms erreicht hat. Wenn die Führungsgröße gleich der Differenzgeschwindigkeit zwischen Kopf und Schlitten ist, die durch den originalen Puls resultiert, wird der Regler ebenfalls außer Kraft gesetzt, da durch diese Führungsgröße keine Pulsveränderung erwünscht ist. Tritt dieser Fall ein, wird der originale Puls ohne Filterung in die FE-Simulation weitergeleitet, d.h. die Tiefpassfilterung tritt nicht in Kraft, wenn die originale Differenzgeschwindigkeit nachgefahren wird.

Zusammenfassend wird der Regler genau dann deaktiviert, wenn

- die Simulationszeit 80ms erreicht hat,
- die Energie des veränderten Pulses die Energie des originalen Pulses erreicht oder
- die originale Differenzgeschwindigkeit als Führungsgröße wirkt.

In der folgenden Abbildung ist der Koppelplan der Regelungslogik dargestellt:

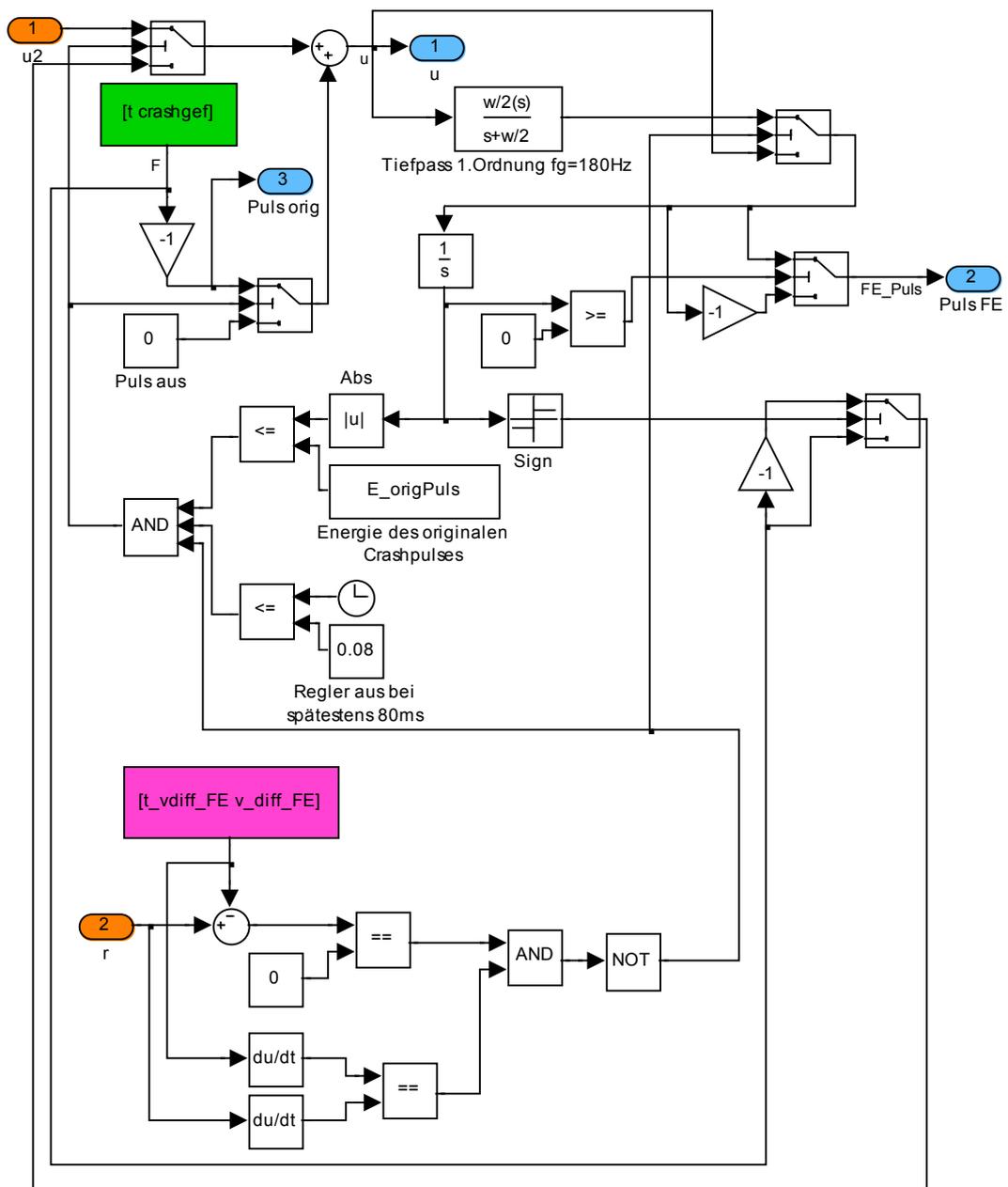


Abbildung 49: Koppelplan der Regelungslogik

### 5.4.3 Test der entworfenen Pulsregelung

In den folgenden Abschnitten wird der entworfene Regler inklusive der Regelungslogik mit verschiedenen Führungsgrößen getestet. Gleichzeitig wird auch die Kopplung des Simulink-Koppelplanes mit dem FE-Solver LS DYNA überprüft und getestet. Diese Tests

sollen aufzeigen, in welche Richtungen man die Differenzgeschwindigkeit sinnvoll verändern kann und welche Auswirkungen diese Veränderung auf den HIC-Wert hat. Weiters zeigen die folgenden Simulation, dass auch eine neue Definition der Differenzgeschwindigkeit als Führungsgröße geeignet ist. Die durchgeführten Simulationen unterteilen sich in zwei Varianten: die erste Variante beschäftigt sich mit einer im Verlauf neu definierten Führungsgröße, während die zweite Variante die Beschränkung der originalen Differenzgeschwindigkeit als Führungsgröße heranzieht. Durch die unterschiedlichen Führungsgrößen wird auch die Stabilität des Regelkreises experimentell bestätigt, da keine Simulation zu einem instabilen Verhalten des Regelkreises führt. Durch die folgenden Tests wurde auch die Wahl der Ausgangsgröße bestätigt, da eine Beschränkung der Differenzgeschwindigkeit zwischen Kopf und Schlitten in allen Fällen zu einer Reduktion des HIC-Wertes führt, d.h. diese Führungsgröße ist zur Beeinflussung des HIC geeignet. All diese Tests wurden für verschiedene Crashpulse erfolgreich durchgeführt. Die folgenden Simulationsergebnisse basieren beispielhaft auf den Daten des Toyota Scion.

#### **5.4.4 Neuedefinierter Verlauf der Differenzgeschwindigkeit als Führungsgröße mit Kopplung zur FE-Simulation**

##### **5.4.4.1 Anfängliche Erhöhung der Differenzgeschwindigkeit gefolgt von einer kuppenförmigen Begrenzung**

Bei dieser Simulation wurde die Führungsgröße mit Hilfe von Spline-Funktionen kreiert. Die Festlegung der Führungsgröße erfolgte durch Anlehnung an die FE-Differenzgeschwindigkeit des unveränderten Pulses. Die Führungsgröße wurde ebenfalls wie die originale FE-Differenzgeschwindigkeit mit Schwingern im Anstieg der Differenzgeschwindigkeit ausgestattet. Weiters wurde das Maximum der Differenzgeschwindigkeit mit einer Kuppe begrenzt, um den HIC-Wert zu reduzieren. Auch das Rückfedern des Dummys wurde entsprechend definiert. In der nächsten Abbildung sind die Führungsgröße und die diversen Differenzgeschwindigkeiten dargestellt:

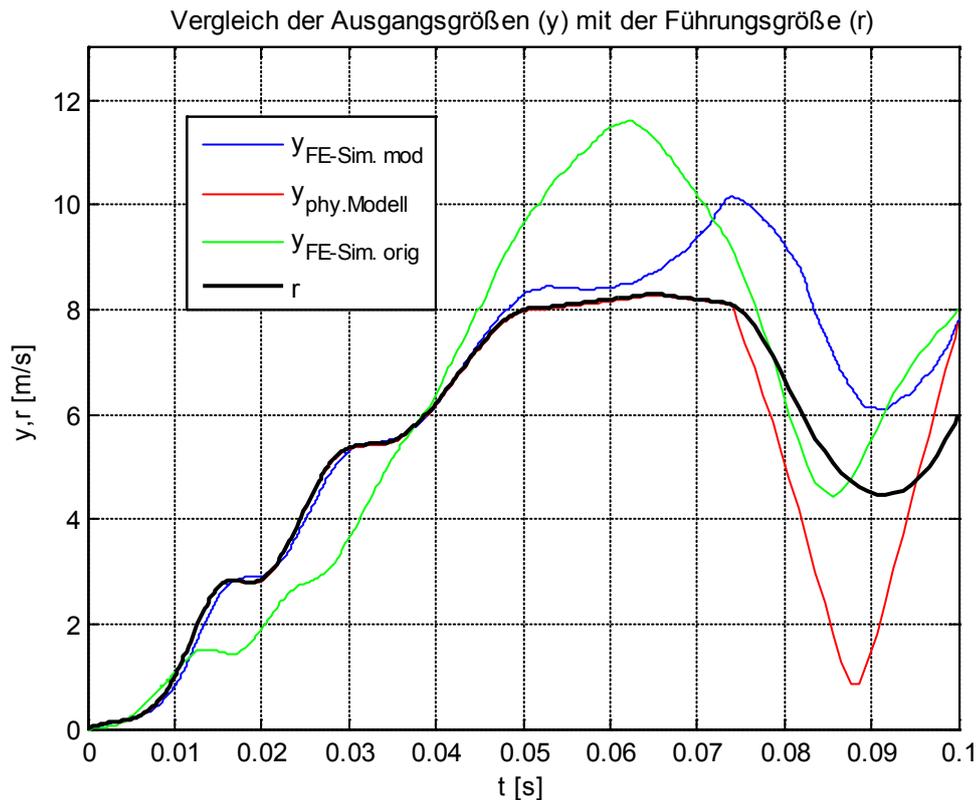


Abbildung 50: Vergleich der diversen Ausgangsgrößen (y) mit der Führungsgröße (r)

Die Ausgangsgröße des physikalischen Modells ( $y_{phy.Modell}$ , roter Verlauf) kann der Führungsgröße ( $r$ , schwarzer Verlauf) bis zur Abschaltung der Reglerwirkung bei ca. 73ms problemlos folgen. In diesem Fall wird er deshalb bei 73ms abgeschaltet, da die Fahrzeugenergie zu dieser Zeit bereits abgebaut ist. Durch die Erhöhung der Differenzgeschwindigkeit am Beginn (10 bis ca. 40ms) im Vergleich zur Differenzgeschwindigkeit des originalen Pulses wird bereits mehr Energie abgebaut als durch den originalen Puls. Daher erfolgt die Reglerdeaktivierung früher. Ab dem Zeitpunkt der Reglerdeaktivierung wirkt auf das physikalische Modell nur noch der originale Puls und die Ausgangsgröße des physikalischen Modells folgt der Führungsgröße nicht mehr. Die Differenzgeschwindigkeit der FE-Simulation ( $y_{FE-Sim.mod}$ , blauer Verlauf), die durch den veränderten Puls resultiert, folgt der Führungsgröße bis ca. 65ms nahezu perfekt. Ab 65ms treten erste Abweichungen auf, die bis zum Zeitpunkt der Reglerdeaktivierung ansteigen. Durch die Reglerdeaktivierung beginnt

die Differenzgeschwindigkeit wieder zu sinken, da hier wiederum nur mehr der originale Puls wirkt. In der folgenden Abbildung ist der Vergleich der Pulse zu sehen:

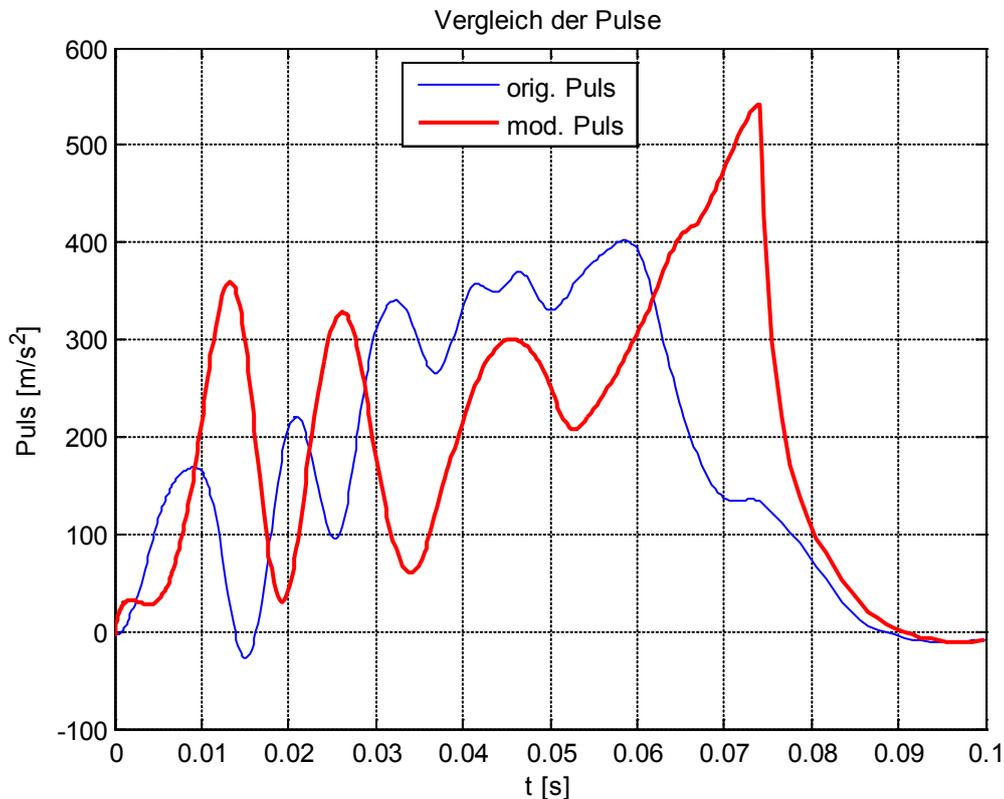


Abbildung 51: Vergleich der Pulse

Die anfängliche Erhöhung der Differenzgeschwindigkeit macht sich im veränderten Puls (roter Verlauf) durch stärker ausgeprägte Schwingungen erkenntlich. Die vorgegebene Kuppe, die nach dem Anstieg der Differenzgeschwindigkeit folgt, bewirkt ebenfalls stärker ausgeprägte Schwingen. Ab dem Zeitpunkt, bei dem auch die Differenzgeschwindigkeit der FE-Simulation durch den veränderten Puls stärker von der Führungsgröße abweicht (ca. 65ms), resultiert ein starker Pulsanstieg bis zur Reglerdeaktivierung. Erst nach der Reglerdeaktivierung läuft der modifizierte Puls auf den originalen Puls über einen Tiefpass 1. Ordnung zurück. Die Auswirkungen des veränderten Pulses auf das HIC sind in der kommenden Abbildung zu sehen:

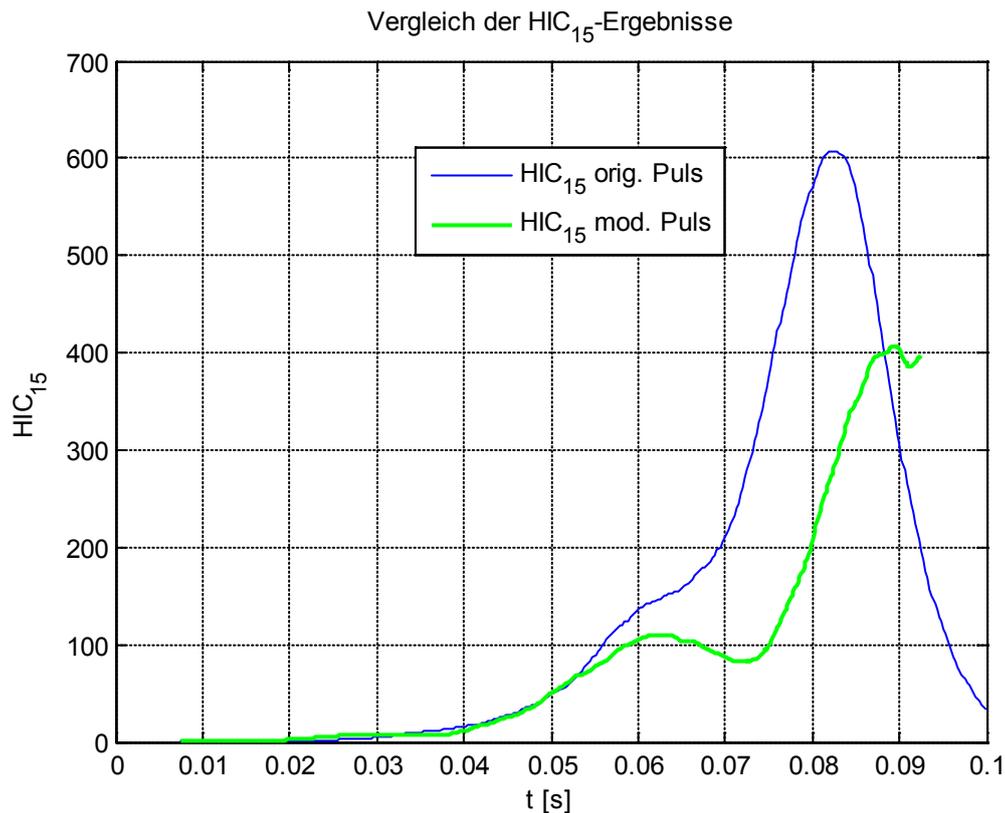


Abbildung 52: Auswirkung des modifizierten Pulses auf das Head Injury Criterion (HIC)

Wie aus der obigen Abbildung ersichtlich ist, wird durch diesen veränderten Puls das Maximum des HIC um ca. 1/3 reduziert, was einer deutlichen Verringerung der Verletzungswahrscheinlichkeit des Kopfes entspricht. Diese deutliche Reduktion der Kopfbelastung ist größtenteils auf die kuppenförmige Begrenzung der Differenzgeschwindigkeit zurückzuführen, da diese mit einer Reduktion um ca. 3.5 m/s im Vergleich zur max. Differenzgeschwindigkeit des unveränderten Pulses doch sehr stark ausgeprägt ist. Die anfängliche Erhöhung der Differenzgeschwindigkeit sorgt dafür, dass das Fahrzeug stärker abgebremst wird als das ursprünglich der Fall war. Somit wird in diesem Bereich mehr Fahrzeugenergie als beim originalen Puls abgebaut. Durch die kuppenförmige Begrenzung der Differenzgeschwindigkeit findet die Dummybewegung in den Airbag langsamer statt als beim originalen Puls. Diese langsamere Dummybewegung führt zu einer zeitlichen Verschiebung (Verschleppung) des HIC-Verlaufes.

#### 5.4.4.2 Gleichmäßige Reduktion der originalen Differenzgeschwindigkeit

Bei dieser Simulation wurde versucht, die originale Differenzgeschwindigkeit aus der FE-Simulation annähernd gleichmäßig über den gesamten Verlauf zu reduzieren. Die so entstehende Führungsgröße ( $r$ , schwarzer Verlauf) wurde wieder mit Spline-Funktionen realisiert. In der folgenden Abbildung sind die einzelnen Differenzgeschwindigkeiten dargestellt:

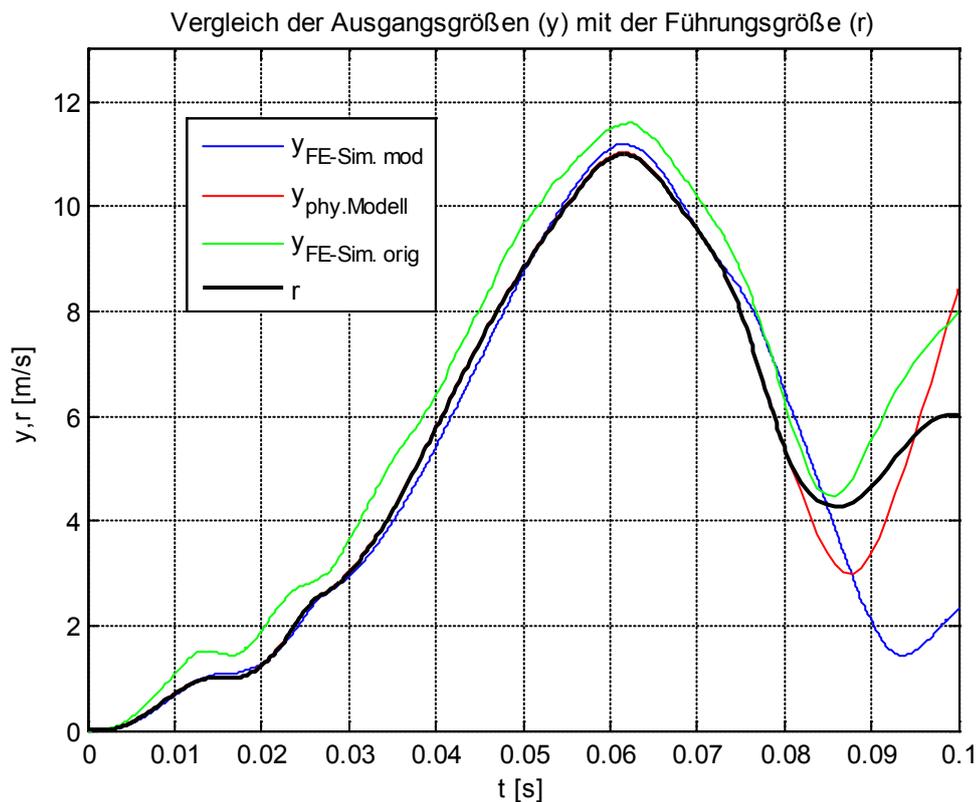


Abbildung 53: Vergleich der diversen Ausgangsgrößen ( $y$ ) mit der Führungsgröße ( $r$ )

Wie aus dieser Abbildung ersichtlich ist, erzeugt der veränderte Puls in der FE-Simulation eine Differenzgeschwindigkeit ( $y_{\text{FE-Sim.mod}}$ , blauer Verlauf), die der Führungsgröße bis zur Reglerdeaktivierung bei 80ms sehr gut folgen kann.

Die Veränderung des Pulses ist in ihrer groben Charakteristik nicht allzu groß, da sich der Verlauf der Differenzgeschwindigkeit nicht stark verändert hat, weil größtenteils eine Skalierung der Höhe durchgeführt wurde. Der veränderte Puls, der aus der vorgegebenen Differenzgeschwindigkeit resultiert, ist in der kommenden Abbildung ersichtlich:

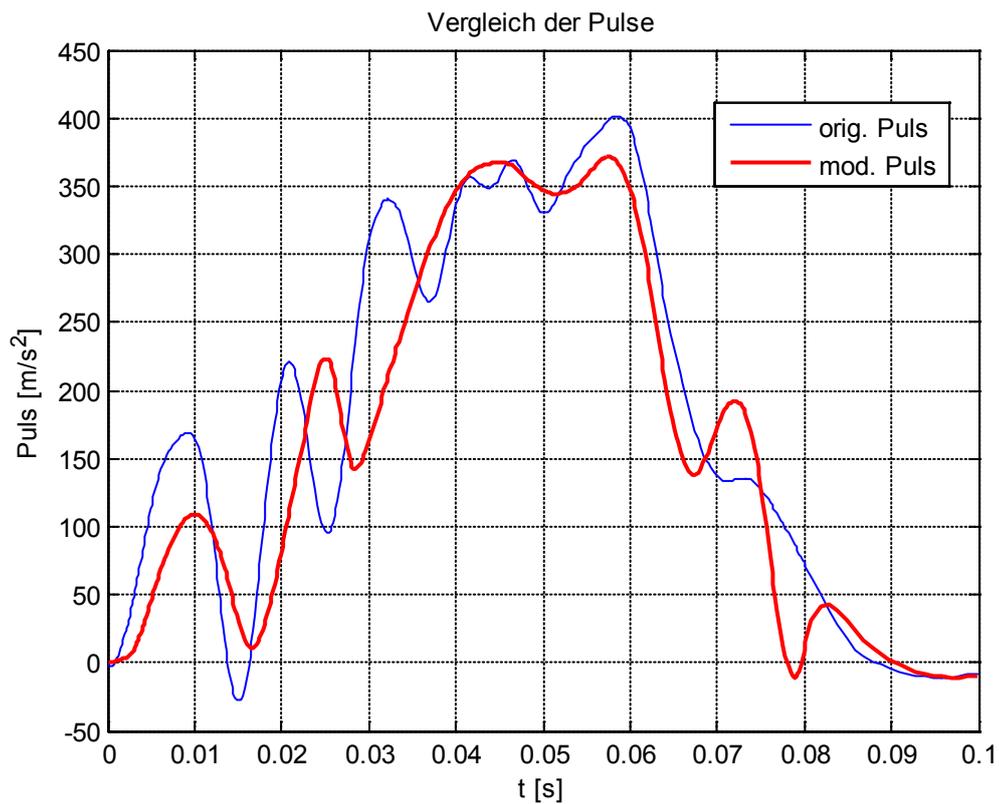


Abbildung 54: Vergleich der Pulse

Der veränderte Puls ist am Beginn durch zeitlich verschobene Schwinger im Vergleich zum originalen Puls gekennzeichnet. Zwischen ca. 30 und 50ms tritt nur eine Schwingung auf und ab ca. 50ms entspricht der veränderte Puls einigermaßen dem originalen Puls, abgesehen von den 2 Schwingern gegen Ende des Pulses. Ab 80ms wird der Regler wieder deaktiviert, was einen Pulsrücklauf auf den originalen Puls zur Folge hat. Die Auswirkungen des veränderten Pulses auf das HIC sind in der kommenden Abbildung zu sehen:

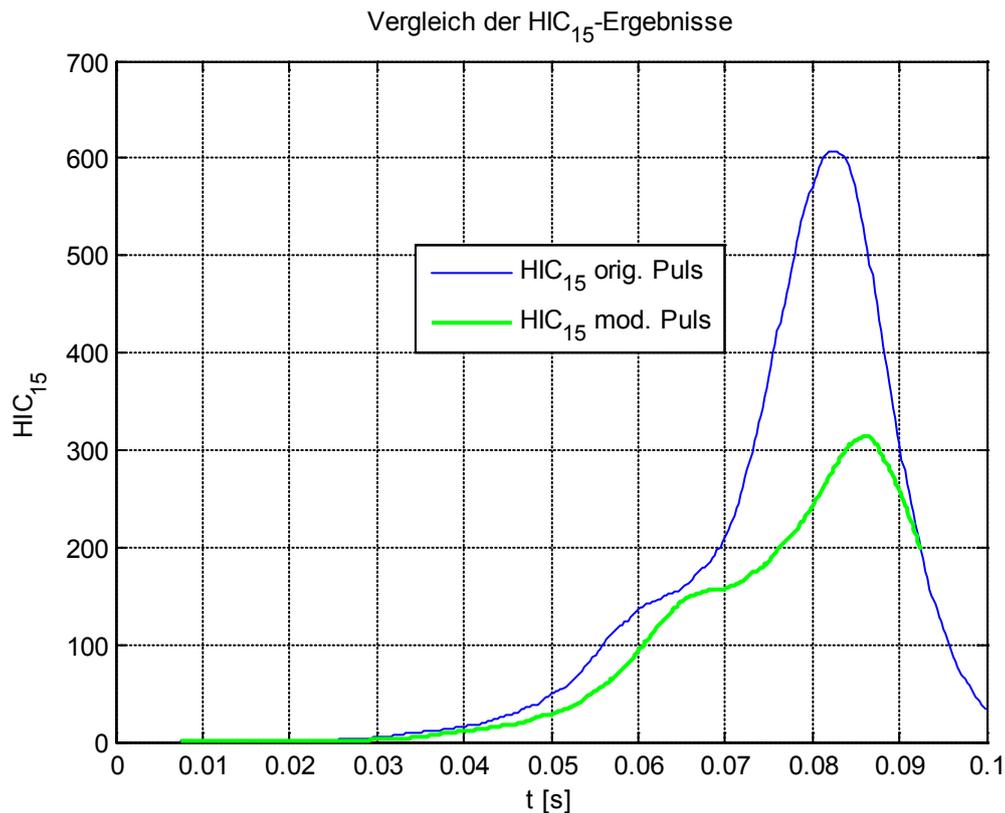


Abbildung 55: Auswirkung des modifizierten Pulses auf das Head Injury Criterion (HIC)

Wie aus der obigen Abbildung ersichtlich ist, wird das Maximum des HIC trotz der geringen Begrenzung der maximalen Differenzgeschwindigkeit beinahe um 50% reduziert. Dieses in diesem Ausmaß unerwartete Ergebnis resultiert aus der gleichmäßig reduzierten originalen Differenzgeschwindigkeit als Führungsgröße. Obwohl die Pulsveränderung nicht drastisch ausgeprägt ist, halbiert sich das Verletzungsrisiko beinahe um die Hälfte. Diese Pulsveränderung bewirkt, dass das Fahrzeug gleichmäßig weniger stark verzögert und somit die abzubauenen Fahrzeugenergie zeitlich nach hinten verlagert wird. Weiters zeigt sich, dass die geringe Herabsetzung der maximalen Differenzgeschwindigkeit im Vergleich zu 5.4.4.1 (wo die maximale Differenzgeschwindigkeit um ca. 3.5m/s herabgesetzt wurde) trotzdem den HIC-Wert wesentlich stärker reduziert. Aus den beiden Simulationen (5.4.4.1 und 5.4.4.2) ist erkennbar, dass die Form der Differenzgeschwindigkeitskurve entscheidender ist als die Reduktion des Maximalwertes. Wie in der vorigen Simulation findet auch hier eine Verschiebung des HIC-Verlaufes statt. Diese ist zwar nicht so

stark ausgeprägt wie unter 5.4.4.1, dafür findet früher (ab ca. 40ms) eine Reduktion des HIC-Verlaufes statt.

## 5.4.5 Beschränkung der originalen FE-Differenzgeschwindigkeit als Führungsgröße mit Kopplung zur FE-Simulation

### 5.4.5.1 Pulseingriff von ca.22 bis 80ms

In dieser Simulation wird die Führungsgröße ( $r$ , schwarzer Verlauf) aus dem Minimum der Differenzgeschwindigkeit aus der FE-Simulation bei Anregung mit dem Originalpuls ( $y_{FE-Sim.orig}$ , grüner Verlauf) und einer Begrenzungsfunktion gebildet, d.h. die originale Differenzgeschwindigkeit wird begrenzt. Die einzelnen Differenzgeschwindigkeiten sind in der folgenden Abbildung dargestellt:

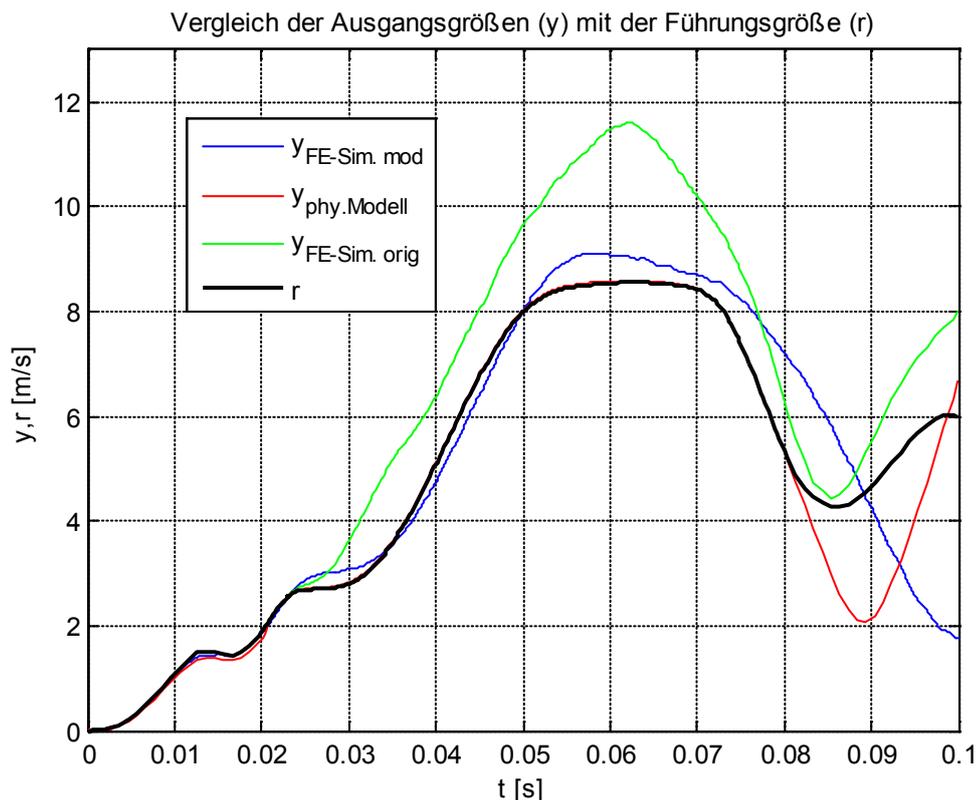


Abbildung 56: Vergleich der diversen Ausgangsgrößen ( $y$ ) mit der Führungsgröße ( $r$ )

Die Führungsgröße ist am Beginn bis ca. 22ms die originale Differenzgeschwindigkeit aus der FE-Simulation. Erst ab ca. 22ms wird die originale Differenzgeschwindigkeit aus

der FE-Simulation begrenzt. Wie aus der obigen Abbildung ersichtlich ist, folgt die Ausgangsgröße des physikalischen Modells ( $y_{\text{phy.Modell}}$ , roter Verlauf) der vorgegebenen Führungsgröße vom Beginn der Regelung bei ca. 22ms bis zur Reglerdeaktivierung bei 80ms perfekt. Erst ab 80ms weicht die Ausgangsgröße des physikalischen Modells stark von der Führungsgröße ab. Der Regler wird erst bei 80ms inaktiv, da durch die Begrenzung der Differenzgeschwindigkeit weniger Energie abgebaut wird als durch die originale Differenzgeschwindigkeit. Da bis 22ms keine Pulsveränderung erwünscht ist, aufgrund der Tatsache, dass die Führungsgröße die originale Differenzgeschwindigkeit ist, setzt die Regelung erst ab diesem Zeitpunkt ein. Die durch den veränderten Puls hervorgerufene Differenzgeschwindigkeit aus der FE-Simulation ( $y_{\text{FE-Sim.mod}}$ , blauer Verlauf) kann der Führungsgröße bis 80ms gut folgen. Durch die Reglerdeaktivierung ab 80ms sinkt die Differenzgeschwindigkeit aus der FE-Simulation noch weiter ab, da nur mehr der originale Puls wirksam ist. In der nächsten Abbildung sind die beiden Crashpulse zu sehen:

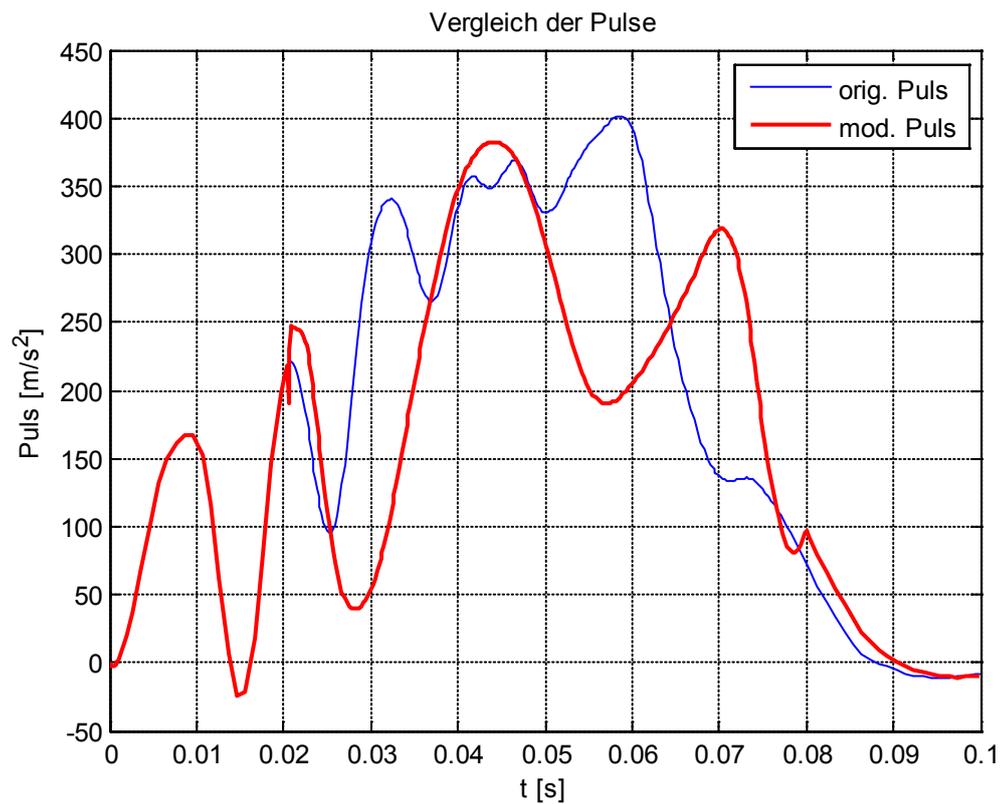


Abbildung 57: Vergleich der Pulse

Der modifizierte Crashpuls entspricht dem originalen Crashpuls bis ca. 22ms und zeichnet sich dann durch stärker ausgeprägte Schwingungen im Gegensatz zum originalen Puls aus. Weiters ist die Anzahl der Schwingungen nach 22ms geringer als beim originalen Puls. Bei 80ms ist der Rückgang auf den originalen Puls durch die Reglerdeaktivierung ersichtlich. Die Auswirkungen des veränderten Pulses auf das HIC sind in der kommenden Abbildung zu sehen:

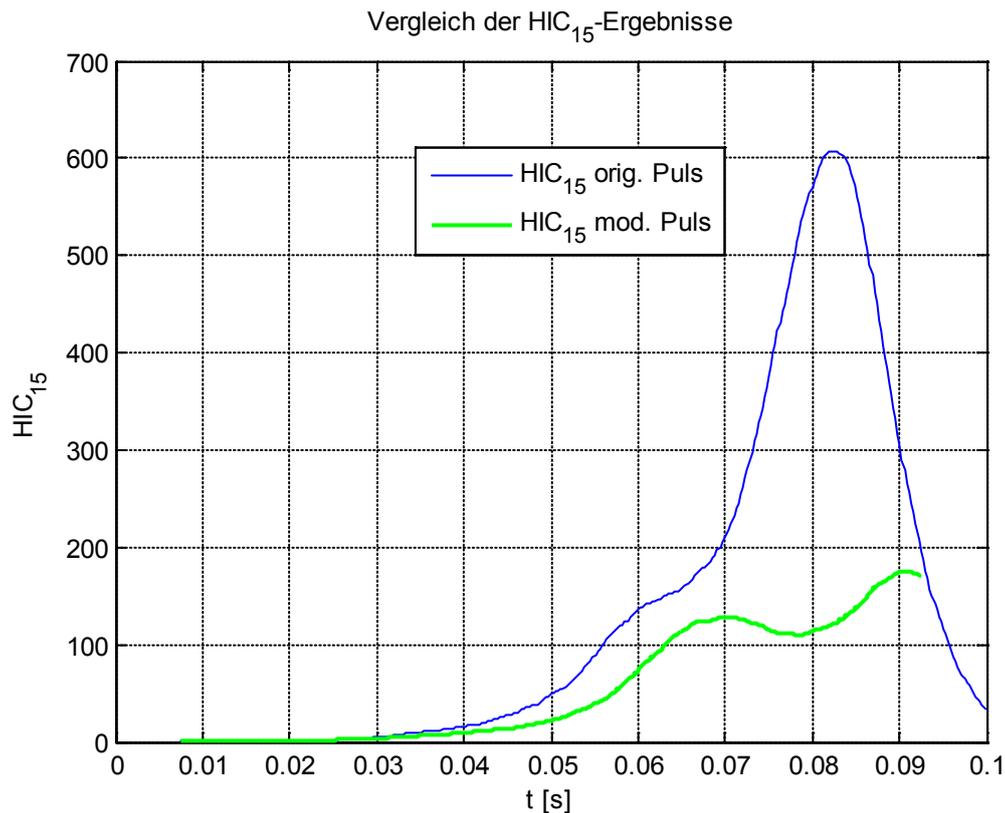


Abbildung 58: Auswirkung des modifizierten Pulses auf das Head Injury Criterion (HIC)

In diesem Fall wird das Maximum des HIC um ca. 70% reduziert, d.h. die Verletzungswahrscheinlichkeit für Kopfverletzungen sinkt ebenfalls um ca. 70%. Bemerkenswert ist, dass weniger aber dafür stärkere Schwinger sich wesentlich besser auf den HIC-Verlauf auswirken als viele schwach ausgeprägte Schwinger. Weiters ist erkennbar, dass hier ebenfalls wie in einer der vorigen Simulationen (vergleiche 5.4.4.1) die Differenzgeschwindigkeit durch eine Kuppe um ca. 3.5m/s herabgesetzt wird, aber die Reduktion des HIC-Wertes hier mehr als doppelt so groß ist. Auffällig ist auch, dass die Pulsveränderungen des originalen Pulses hier geringer sind als in der eben erwähnten Simulation (vergleiche 5.4.4.1). Weiters ist zu beachten, dass hier die Fahrzeugenergie durch die gewählte Reduktion der Differenzgeschwindigkeit noch nicht vollständig abgebaut ist. Wie schon in den vorigen Simulationen zeigt sich auch hier eine Verschiebung des HIC-Verlaufes zusammen mit einer Reduktion des HIC-Verlaufes ab ca. 40ms. Vergleicht man diese Simulation mit jener unter 5.4.4.1, ist erkennbar, dass sich die anfängliche Erhöhung der Differenzgeschwindigkeit unter

5.4.4.1 stark negativ auf den HIC-Wert auswirkt, da auch hier eine ähnliche kuppenförmige Begrenzung der Differenzgeschwindigkeit vorgenommen, aber der HIC-Wert mehr als doppelt so stark reduziert wird.

#### 5.4.5.2 Pulseingriff von 0 bis ca.30ms

In dieser Simulation wird die Führungsgröße gleich gebildet wie unter 5.4.5.1. Aus dieser Simulation ergeben sich folgende Differenzgeschwindigkeiten:

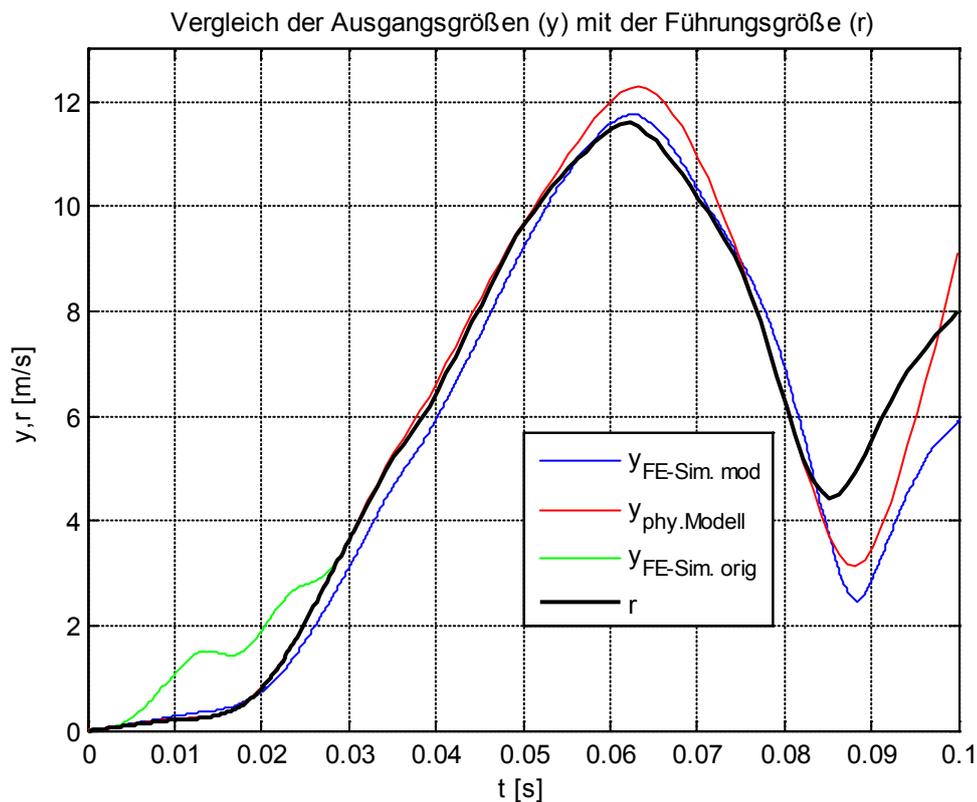


Abbildung 59: Vergleich der diversen Ausgangsgrößen (y) mit der Führungsgröße (r)

Die Differenzgeschwindigkeit, die aus dem originalen Puls resultiert ( $y_{FE-Sim.orig}$ , grüner Verlauf), wird bis ca. 30ms durch eine Begrenzungsfunktion begrenzt. Anschließend wird der Regler deaktiviert, da nun die originale Differenzgeschwindigkeit die Führungsgröße darstellt. Somit wirkt ab ca. 30ms der originale Puls selbst. Diese Begrenzung resultiert aus dem oben abgebildeten Führungsgrößenverlauf (r, schwarzer Verlauf). Die durch den veränderten Puls resultierende Differenzgeschwindigkeit aus der FE-Simulation ( $y_{FE-Sim.mod}$ , blauer Verlauf) entspricht

der Führungsgröße bis ca. 80ms mit nur geringen Abweichungen. Die Ausgangsgröße des physikalischen Modells ( $y_{\text{phy. Modell}}$ , roter Verlauf) deckt sich nur bis 30ms exakt mit der Führungsgröße, da ab diesem Zeitpunkt der Regler inaktiv wird und auf das physikalische Modell nur mehr der ursprüngliche Puls wirkt. Der Vergleich zwischen originalem und modifiziertem Puls schaut wie folgt aus:

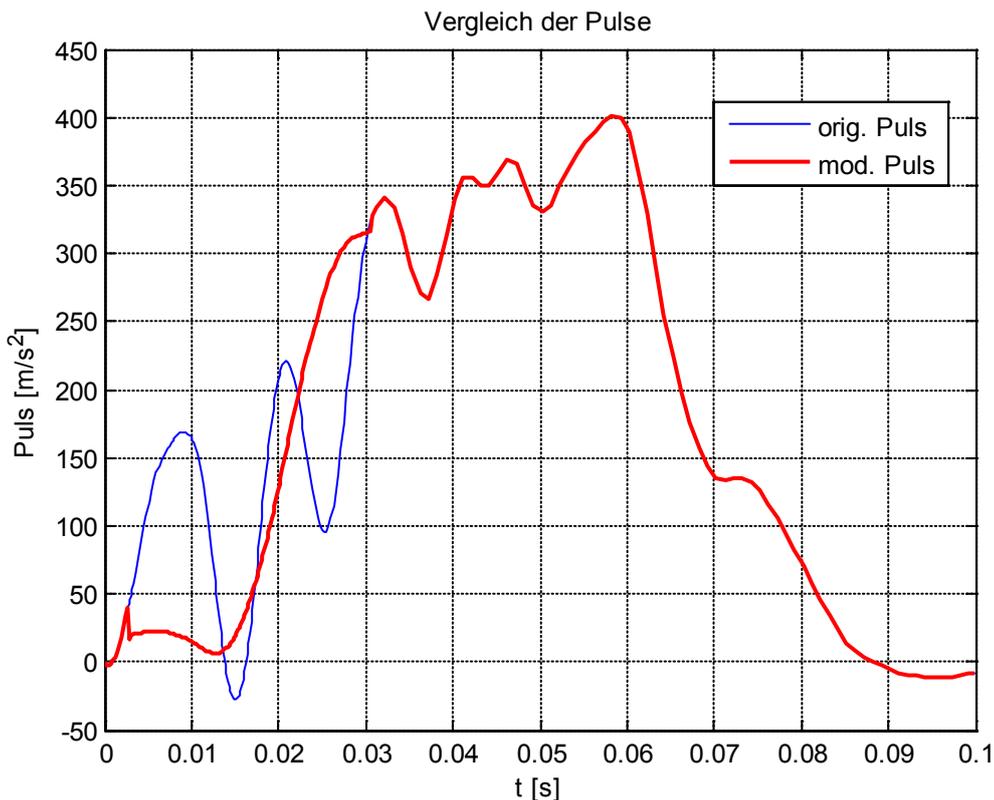


Abbildung 60: Vergleich der Pulse

Der Pulseingriff beschränkt sich hier auf die ersten 30ms. In diesem Bereich ist auch eine deutliche Veränderung des Pulses erkennbar, da hier nur ein sehr stark ausgeprägter Pulsanstieg im Vergleich zum originalen Puls gegeben ist. Ab 30ms entspricht der modifizierte Puls dem originalen Puls, da hier keine Änderung der originalen Differenzgeschwindigkeit gegeben ist. Die Auswirkungen des veränderten Pulses auf das HIC sind in der kommenden Abbildung zu sehen:

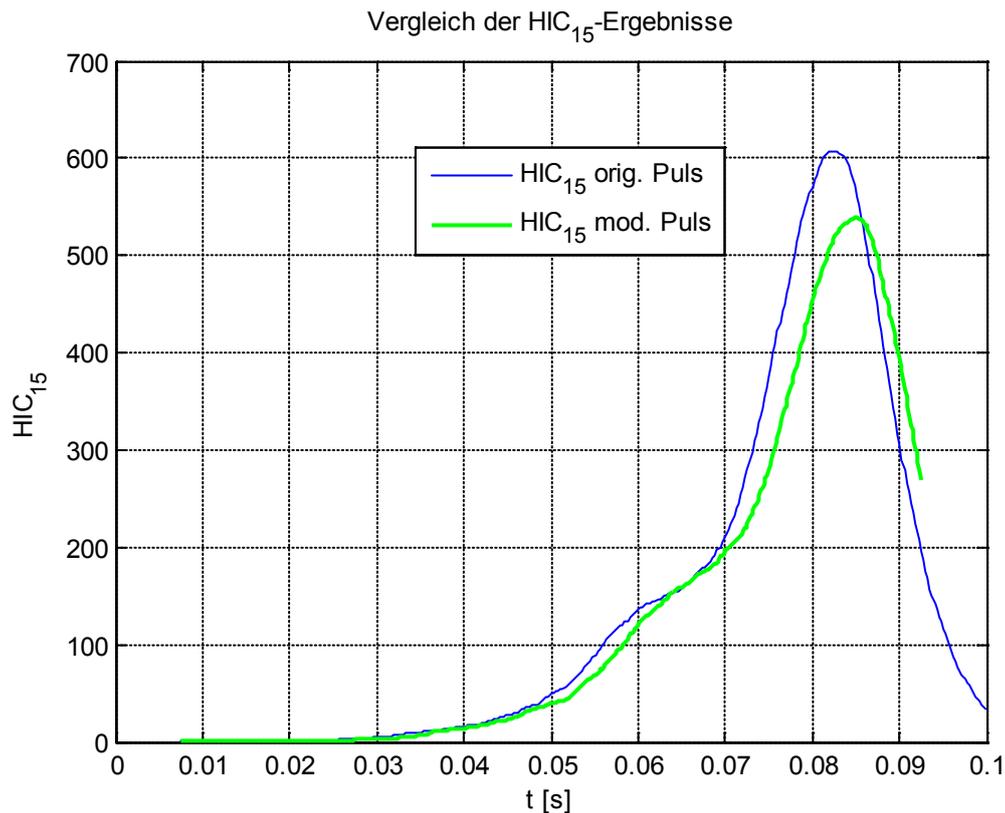


Abbildung 61: Auswirkung des modifizierten Pulses auf das Head Injury Criterion (HIC)

Trotz des kurzen Pulseingriffs am Beginn des Pulses bis ca. 30ms kann durch den modifizierten Puls das Maximum des HIC um ca. 11% gesenkt werden. Der Vorteil dieses frühen Pulseingriffs liegt eindeutig in der Realisierbarkeit des Pulseingriffes, da die Fahrzeugstruktur im Bereich der Stoßstange bis hin zur Crashbox bzw. zum Motorblock einige Veränderungen zulässt, um den veränderten Puls auch im Fahrzeug nachzubilden. Auch ein verhältnismäßig geringer Eingriff in die vorhandene Differenzgeschwindigkeit hat eine recht große Reduktion des HIC-Wertes zur Folge, d.h. auch Eingriffe am Beginn des Pulses haben entscheidenden Einfluss auf die Kopfverletzungswahrscheinlichkeit. Durch diesen Eingriff am Beginn des Pulses wird der Energieabbau in diesem Bereich zeitlich nach hinten verschoben und komprimiert, d.h. die Energie, die im ursprünglichen Puls zwischen 0 und 30ms abgebaut wird, verlagert sich beim modifizierten Puls in den Bereich zwischen 15 und 30ms. Diese Verlagerung und Komprimierung des Energieabbaus wirkt sich günstig auf das HIC aus.

Die Verschleppung des HIC-Verlaufs ist in diesem Fall geringer als in den vorigen Simulationen.

## **6 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK**

### **6.1 Fazit**

#### **6.1.1 Regelung**

Die entworfene Folgeregelung hat alle durchgeführten Tests erfolgreich bestanden. Die Kopplung zwischen Matlab/Simulink und dem FE-Solver LS DYNA erwies sich ebenfalls als funktionstüchtig. Die Simulationen zeigten, dass die Differenzgeschwindigkeit zwischen Kopf und Schlitten ohne Probleme in den verschiedensten Varianten verändert werden kann. Die dadurch resultierenden Pulse haben alle den Maximalwert des HIC reduziert. Dadurch stellte sich heraus, dass die Wahl der Ausgangsgröße (Differenzgeschwindigkeit zwischen Kopf und Schlitten) und somit die Führungsgröße den relevanten Dummybelastungswert (HIC) beeinflussen kann. Das Design der Führungsgröße ist abhängig von den Fahrzeugrandbedingungen, da man an gewisse Eingriffsgrenzen gebunden ist.

#### **6.1.2 Auswirkung auf den Dummy**

Bei den durchgeführten Simulationen hat sich gezeigt, dass sich jede Reduktion der Differenzgeschwindigkeit zwischen Kopf und Schlitten positiv auf den Maximalwert des HIC-Verlaufes auswirkt. Tendenzen, in welcher Form man die Differenzgeschwindigkeit reduzieren soll, haben sich nicht klar gezeigt. Weiters resultierte bei allen Simulationen eine Verschiebung des HIC-Verlaufes. Der Zeitraum, in dem die Fahrzeugenergie abgebaut wird, beeinflusst den Dummybelastungswert entscheidend. Einige Simulationen zeigten, dass der Dummybelastungswert durch eine zeitliche Verschiebung des Energieabbaus nach hinten reduziert werden kann. Es stellte sich auch heraus, dass manche Bereiche für den Energieabbau besser geeignet sind als andere.

## 6.2 Ausblick

Für die Zukunft wäre es wünschenswert, wenn alle relevanten Dummybelastungswerte beeinflusst werden könnten, um den Fahrzeugpuls so zu designen, dass die Kosten für teure Rückhaltesysteme stark gesenkt werden können. Dies wird auch nicht durch eine einzige Führungsgröße realisierbar, sondern es werden mehrere Führungsgrößen notwendig sein, die jeweils einen relevanten Dummybelastungswert beeinflussen werden. Weiters wird es notwendig sein, für jeden einzelnen relevanten Dummybelastungswert ein eigenes mathematisches Modell aufzustellen, um eine getrennte Pulsmodifikation durch die Regler vorzunehmen. Die daraus resultierenden veränderten Pulse könnten dann mit den gewünschten Gewichtungen zu einem optimalen Puls kombiniert werden. Weiters könnte man mit einem genaueren physikalischen Modell mit mehreren Körpern noch Verbesserungen hinsichtlich der Pulsveränderungen erzielen.

Hinsichtlich der Realisierung der modifizierten Pulse in der Praxis ist es nötig, eng mit der Abteilung der Fahrzeugkonstruktion bzw. der Fahrzeugstruktur zu kooperieren, um eine für den Insassen optimale Verzögerung zu erreichen.

## 7 VERZEICHNISSE

### 7.1 Literaturverzeichnis

- [1] Kramer, Florian: *Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen*. 3. Auflage. Vieweg + Teubner | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2009 – ISBN 978-3-8348-0536-2
- [2] Carhs.gmbh: *Safety Companion 2010: US-NCAP Rating Schema S.33*
- [3] Schaub, Norbert: Vorlesungsunterlagen von „*Passive Sicherheit für Kraftfahrzeuge*“ Folie 183, TU Graz
- [4] Schindler, Volker; Sievers, Immo: *Forschung für das Auto von Morgen, Aus Tradition entsteht Zukunft*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York 2008 – ISBN 978-3-540-74150-3
- [5] *Final Report of New Car Assessment Program Testing of a 2008 Dodge Grand Caravan SE*, NHTSA No.: M80307: <http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/database/asp/vehdb/querytesttable.aspx> - eingesehen am 12.08:2010
- [6] DENTON ATD, INC *Datenblatt des Hybrid III 50th Percentile Dummies*: <http://www.dentonatd.com/dentonatd/pdf/HIII50M.PDF> - eingesehen am 20.5.2010
- [7] carhs.gmbh: *SafetyWissen: NCAP-Tests*  
[http://www.carhs.de/de/training/safetywissen/\\_img/ncap\\_tabelle\\_1.gif](http://www.carhs.de/de/training/safetywissen/_img/ncap_tabelle_1.gif) - eingesehen am 10.8.2010
- [8] Murad, M.; Cheok, Ka C.; Das, M.: *Modeling and Simulation of an Advanced Intelligent Restraint System*. In: IEEE SysCon 2009 – 3rd Annual IEEE International Systems Conference, 2009 Vancouver, Canada, March 23-26, 2009
- [9] Adamy, Jürgen: *Nichtlineare Regelungen*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2009 – ISBN 978-3-642-00793-4
- [10] carhs.gmbh: *SafetyWissen: NCAP-Tests*  
[http://www.carhs.de/de/training/safetywissen/\\_img/ncap\\_tabelle\\_2.gif](http://www.carhs.de/de/training/safetywissen/_img/ncap_tabelle_2.gif) - eingesehen am 10.8.2010

[11] Schöneekäs, André: *Frontalaufprall*. Grazer Safety Update 2010 von carhs.gmbh

[12] Steffan, Herman: Vorlesungsunterlagen von „*Vehicle Safety 1*“. Teil: Restraint Systems. TU Graz 2007

[13] Hofer, Anton: Vorlesungsunterlagen von „*Computerunterstützte Modellbildung und Simulation*“, TU GRAZ 2004

## 7.2 Abkürzungsverzeichnis

HIC.....	Head Injury Criterion
FMVSS.....	Federal Motor Vehicle Safety Standard
ATD.....	Anthropomorphic Test Device
NCAP.....	New Car Assessment Program
NHTSA.....	National Highway Traffic Safety Administration
WSU-Kurve.....	Wayne State University Cerebral Concussion Tolerance Curve
KFZ.....	Kraftfahrzeug
RR.....	Relative Risk
RHS.....	Rückhaltesystem(e)
ESP.....	elektronisches Stabilitätsprogramm
ACC.....	Active/Adaptive Cruise Control
BAS.....	Bremsassistent
FE.....	Finite Elemente

## 7.3 Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1: Körperteil-spezifische Verletzungen von PKW-Insassen bei Frontalkollisionen [1].....</i>	<i>2</i>
<i>Abbildung 2: WSU-Kurve und <math>a_{3ms}</math>-Wert nach FMVSS 208 [1].....</i>	<i>4</i>
<i>Abbildung 3: Schutzkriterien und -kriterien-Levels nach FMVSS 208 [1].....</i>	<i>5</i>
<i>Abbildung 4: HYBRID III Dummy - Struktur und Messstellen [1].....</i>	<i>7</i>
<i>Abbildung 5: Teilbereiche der Straßenverkehrssicherheit und Beispiele für Sicherheitsmaßnahmen [1]....</i>	<i>8</i>
<i>Abbildung 6: Die passive Sicherheit von KFZ und ihre Wirkungsbereiche [1].....</i>	<i>9</i>

<i>Abbildung 7: Unfallforschung und Umsetzung der Erkenntnisse in verschiedenen Disziplinen [1].....</i>	<i>10</i>
<i>Abbildung 8: Gesetzliche Vorschriften und Standards zur inneren Sicherheit in verschiedenen Ländern [1]</i> <i>.....</i>	<i>14</i>
<i>Abbildung 9: Übersicht der NCAP-Tests [7], [10] .....</i>	<i>16</i>
<i>Abbildung 10: zeitlicher Ablauf des Unfallereignisses und Sicherheitsbereiche [1] .....</i>	<i>18</i>
<i>Abbildung 11: tragende Bauteile der Fahrgastzelle am Beispiel des Space Frame von AUDI [1] .....</i>	<i>19</i>
<i>Abbildung 12: Deformationszonen und Kraftniveaus an der PKW-Vorbastruktur [1] .....</i>	<i>20</i>
<i>Abbildung 13: Beschleunigungsschlitten mit hydraulischem Antrieb [1].....</i>	<i>23</i>
<i>Abbildung 14: Verzögerungsschlitten mit Verzögerungseinrichtung [1] .....</i>	<i>24</i>
<i>Abbildung 15: Crashpulse von verschiedenen Fahrzeugen aus diversen Fahrzeugklassen.....</i>	<i>25</i>
<i>Abbildung 16: Position der beiden Beschleunigungssensoren zur Erfassung des Crashpulses [5].....</i>	<i>26</i>
<i>Abbildung 17: Beschleunigungsverläufe des Left Rear Cross-Member-Beschleunigungs- und des Right</i> <i>Rear Cross-Member-Beschleunigungssensors .....</i>	<i>27</i>
<i>Abbildung 18: Zusammenhang zwischen Crashpuls und HIC-Wert .....</i>	<i>28</i>
<i>Abbildung 19: Zusammenhang der Dummybewegung mit dem Puls.....</i>	<i>29</i>
<i>Abbildung 20: 3-Punkt Gurtsystem mit Gurtschlosskraftbegrenzer, Gurtkraftbegrenzer und Gurtstraffer</i> <i>[4].....</i>	<i>31</i>
<i>Abbildung 21: Heutige Airbagausstattung am Beispiel eines Toyotas (Fahrer- und Beifahrer-Airbag, Knie-</i> <i>Airbags, Seiten-Airbags in den vorderen Sitzen sowie durchgehende Kopf-Airbags) [4] .....</i>	<i>32</i>
<i>Abbildung 22: Funktionsweise des Kniefängers und des Kopf-Airbags bei einer Frontalkollision nach [1]</i>	<i>33</i>
<i>Abbildung 23: Prinzip der verschiebbaren Lenksäule [3] .....</i>	<i>34</i>
<i>Abbildung 24: Sitzrampe als Submarining-Stütze nach OPEL nach [1] .....</i>	<i>35</i>
<i>Abbildung 25: Einfluss auf die Dummybelastungswerte.....</i>	<i>36</i>
<i>Abbildung 26: Trends zur Verknüpfung der aktiven und passiven Sicherheit [11].....</i>	<i>37</i>
<i>Abbildung 27: aktive Crashbox [11] .....</i>	<i>38</i>
<i>Abbildung 28: Entwicklungskosten und Eingriffsmöglichkeiten während der KFZ-Entwicklung.....</i>	<i>40</i>
<i>Abbildung 29: Modellierung des Schlittenversuches durch zwei unterschiedliche Modelle .....</i>	<i>42</i>
<i>Abbildung 30: Struktur des physikalischen Modells.....</i>	<i>43</i>
<i>Abbildung 31: generalisierte Koordinaten des physikalischen Modells .....</i>	<i>45</i>
<i>Abbildung 32: SimMechanics-Modell .....</i>	<i>49</i>
<i>Abbildung 33: Look-Up-Tabelle für die Schultergurtkraft .....</i>	<i>50</i>
<i>Abbildung 34: Look-Up-Tabelle für die Beckengurtkraft.....</i>	<i>51</i>
<i>Abbildung 35: Angriffspunkte des Sicherheitsgurtes am Dummy.....</i>	<i>52</i>
<i>Abbildung 36: Vergleich der Ausgangsgrößen der einzelnen Modelle auf Basis der Daten des Mercedes</i> <i>C300 .....</i>	<i>56</i>
<i>Abbildung 37: Vergleich der Ausgangsgrößen der einzelnen Modelle auf Basis der Daten des Toyota Scion</i> <i>.....</i>	<i>57</i>
<i>Abbildung 38: Standard-Regelkreis.....</i>	<i>58</i>
<i>Abbildung 39: Standard-Regelkreis mit Eingangs-Ausgangslinearisierung .....</i>	<i>60</i>

<i>Abbildung 40: Modifizierte Kompensation mit Rate Limiter</i> .....	61
<i>Abbildung 41: Standard-Regelkreis für den Reglerentwurf</i> .....	62
<i>Abbildung 42: Schlittenersatzsystem: FE-Modell</i> .....	64
<i>Abbildung 43: Crashkonfiguration des Frontalaufpralls gemäß US NCAP [7]</i> .....	65
<i>Abbildung 44: Koppelplan zur Simulation des US-NCAP Lastfalls</i> .....	65
<i>Abbildung 45: Kopplung zwischen Matlab/Simulink und FE-Simulation</i> .....	66
<i>Abbildung 46: Koppelplan mit der FE-Differenzgeschwindigkeit als Führungsgröße</i> .....	67
<i>Abbildung 47: Vergleich zwischen der Führungsgröße und der Ausgangsgröße des physikalischen Modells am Beispiel eines charakteristischen Crashpulses</i> .....	68
<i>Abbildung 48: Vergleich des unveränderten mit dem veränderten Puls anhand eines charakteristischen Crashpulses</i> .....	69
<i>Abbildung 49: Koppelplan der Regelungslogik</i> .....	71
<i>Abbildung 50: Vergleich der diversen Ausgangsgrößen (y) mit der Führungsgröße (r)</i> .....	73
<i>Abbildung 51: Vergleich der Pulse</i> .....	74
<i>Abbildung 52: Auswirkung des modifizierten Pulses auf das Head Injury Criterion (HIC)</i> .....	75
<i>Abbildung 53: Vergleich der diversen Ausgangsgrößen (y) mit der Führungsgröße (r)</i> .....	76
<i>Abbildung 54: Vergleich der Pulse</i> .....	77
<i>Abbildung 55: Auswirkung des modifizierten Pulses auf das Head Injury Criterion (HIC)</i> .....	78
<i>Abbildung 56: Vergleich der diversen Ausgangsgrößen (y) mit der Führungsgröße (r)</i> .....	79
<i>Abbildung 57: Vergleich der Pulse</i> .....	81
<i>Abbildung 58: Auswirkung des modifizierten Pulses auf das Head Injury Criterion (HIC)</i> .....	82
<i>Abbildung 59: Vergleich der diversen Ausgangsgrößen (y) mit der Führungsgröße (r)</i> .....	83
<i>Abbildung 60: Vergleich der Pulse</i> .....	84
<i>Abbildung 61: Auswirkung des modifizierten Pulses auf das Head Injury Criterion (HIC)</i> .....	85

## 7.4 Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Zusammenhang zwischen Relative Risk (RR) und den erzielten Sternen nach [2]</i> .....	17
---	----

## 8 ANHANG

Auf der CD befinden sich folgende Ordner:

- Datenblätter:  
Hier sind die gesamten Datenblätter enthalten.
- Matlab/Simulink:  
Hier sind sämtliche Koppelpläne und m-Files aus Matlab/Simulink enthalten.
- Masterarbeit:  
Hier ist die gesamte Masterarbeitsdokumentation inklusive Bilder enthalten.
- Maple:  
Hier ist das Maple-Skript zur Ermittlung der Bewegungsgleichungen des physikalischen Modells und zur Berechnung der Kompensation für die exakte Linearisierung enthalten.