

Potentialanalyse mehrdimensionaler Bewegungen für Schlittenanlagen in der Fahrzeugsicherheitsentwicklung

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der technischen Wissenschaften

eingereicht an der
Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Graz
Institut für Fahrzeugsicherheit

Dipl.-Ing. Gernot Woitsch

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

Zweitbegutachter
Em. O. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Peter Lugner

April 2014

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen AG.

Deutsche Fassung:
Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008
Genehmigung des Senates am 1.12.2008

EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

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

Graz, am

.....
(Unterschrift)

Englische Fassung:

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....
date

.....
(signature)

Vorwort

Diese Dissertation entstand in den Jahren 2011 bis 2014 am Institut für Fahrzeugsicherheit in Graz im Zuge einer Kooperation mit der Volkswagen AG. Sie ist nicht nur für diejenigen interessant, die sich mit Schlittenanlagen in der Fahrzeugsicherheitsentwicklung beschäftigen. Vielmehr können die Inhalte das Verständnis von Zusammenhängen bei Frontalcrashtests im Allgemeinen schärfen.

Danke,

- Dr. Wolfgang Sinz, der die Arbeit am Institut für Fahrzeugsicherheit betreute und stets Zeit und Energie in die anfallenden Problemstellungen investierte.
- Dr. Darius Grabowski und Dr. Florian Weiser, die seitens der Volkswagen AG den Inhalt dieser Arbeit wesentlich beeinflussten und universitäre Ziele stets unterstützten.
- Prof. Hermann Steffan für die Betreuung und Erstbegutachtung.
- Prof. Peter Lugner für die Ratschläge und die Zweitbegutachtung.
- den Mitarbeitern des Institutes für Fahrzeugsicherheit für die fachliche Unterstützung und eine wunderbare Zeit.
- Harald Mayrhofer, Peter Schrank und Philipp Maurer, die im Rahmen einer Konstruktionsübung am vorgestellten Anlagenkonzept mitgewirkt haben.

Ganz besonders bedanke ich mich bei meiner Familie für die Unterstützung.

Danke Elisabeth!

Zusammenfassung

Eine wesentliche Aufgabe von Fahrzeugherstellern ist, neben vielen anderen Aspekten, die Gewährleistung der Fahrzeugsicherheit bei ihren Produkten. Entwicklungsaufgaben hinsichtlich der Fahrzeugsicherheit betreffen längst nicht mehr nur die Erfüllung gesetzlicher Vorschriften, sondern auch unterschiedlichste Prüfungen von Verbraucherschutzorganisationen oder Versicherungsanstalten, Produkthaftungsfragen und oft zusätzliche interne Prüfvorschriften. Ein Teil der Fahrzeugsicherheit zielt auf den Schutz der Fahrzeuginsassen ab, und wiederum ein Teil dessen befasst sich mit dem statistisch hoch relevanten Fall der Frontalkollision. Ein wichtiges Werkzeug der Fahrzeugsicherheitsentwicklung hinsichtlich Frontalcrash sind Schlittenversuche, die neben bzw. in Kombination mit Finite Elemente Simulationen, im Vergleich zu Gesamtfahrzeugversuchen zeitsparend und kostengünstig eingesetzt werden können. Einsatzgebiet dieser Schlittenanlagen ist vorwiegend die Entwicklung von Rückhaltesystemen für die Insassen. Herkömmliche Schlittenanlagen haben einen Freiheitsgrad, wodurch sich das Ergebnis von jenem eines Gesamtfahrzeugversuchs mit sechs Freiheitsgraden im Allgemeinen unterscheidet. In dieser Dissertation wird das Potential mehrdimensionaler Schlittenanlagen, diese systembedingten Differenzen zu verkleinern, untersucht. Dazu wurden Korrelationswerte bestimmt, die eine Übereinstimmung zwischen Dummymesssignalen sowie Insassentrajektorien beschreiben. Mit Hilfe der Finite Elemente Methode konnten unterschiedlichste Schlittenbewegungsmuster erzeugt und deren Ergebnisse jenen der jeweiligen vollständigen Fahrzeugbewegung gegenübergestellt werden. So konnte eine Konfiguration mit drei dynamischen Freiheitsgraden zur Darstellung einer Nickbewegung, sowie einer statischen Einstellmöglichkeit eines Verdrehwinkels der Fahrzugkarosserie zur Hauptbewegungsrichtung des Schlittens um die Hochachse, als ideal für vier von fünf betrachteten Frontal-Crashtests ermittelt werden. Das Potential mehrdimensionaler Schlittenanlagen, einen bestimmten Fahrzeugversuch abzubilden, kann nur dann ausgeschöpft werden, wenn die mehrdimensionale Vorgabebewegung aus einer realen Crashtestbewegung eindeutig bestimmt werden kann. Deshalb wurden Methoden entwickelt, um dynamische Vorgabebewegungen sowie die beschriebene Verdrehung um die Hochachse schnell und ohne die Hilfe zeitraubender Simulationen berechnen zu können.

Das reale technische Potential mehrdimensionaler Schlittenanlagen hängt von vielen weiteren Faktoren ab. Deshalb wurden auch Untersuchungen durchgeführt, die in vereinfachter Form Unschärfen während des Entwicklungsprozesses, wie Versuchsstreuung oder die zeitliche Veränderung der Bewegungen von der ersten Strukturberechnung bis zur Serienreife, berücksichtigen. Weiters wurden auch eine nicht perfekte Reproduzierbarkeit sowie ein mögliches Unterschreiten von Zielvorgaben von Schlittenanlagen, aufgrund von technischen Grenzen bei der Umsetzung, in Betracht gezogen. Diese Untersuchungen minderten aber den Mehrwert mehrdimensionaler Schlittenanlagen gegenüber herkömmlichen Anlagen nicht.

Zuletzt wird ein neuartiges Anlagenkonzept vorgestellt, das zur Bewegungserzeugung nur die kinetische Energie der Ausgangsgeschwindigkeit nützt, den wesentlichen Anforderungen genügt und zudem eine Abbildung einer Bremsphase bis zur eigentlichen Kollision ermöglicht, was für zukünftige Entwicklungen zur Kombination aktiver und passiver Sicherheitssysteme von großem Nutzen sein könnte.

Abstract

To ensure vehicle safety is one major car manufacturer's task, amongst many others. Vehicle safety development doesn't solely regard statutory provisions, but also demands by tests of consumer organizations and insurance companies, product liability and additional internal test procedures. A subdivision of vehicle safety development concerns itself with vehicle occupant safety and part of that in turn regards frontal collisions. Sled testing is an important tool for vehicle safety development in terms of frontal collisions, besides and in combination with finite elements simulations. Compared to full vehicle crash testing, these development tools can be very timesaving and cost-efficient. A big domain of sled testing is occupant restraint system development. Conventional sled test facilities provide one degree of freedom, causing the test results to differ from those of a six degrees of freedom full vehicle crash test. This dissertation investigates multidimensional sled test facilities' potentials to reduce these system-inherent differences. To do so, correlation values comparing measuring signals and dummy trajectories were determined. By finite elements methods, the results of different vehicle motion patterns were compared to the full vehicle motion. This led to the statement, that a configuration, providing three degrees of freedom, producing pitching motion, in combination with the possibility of a static pre-rotation of the vehicle body about the yaw axis, is ideal for four out of five frontal crash test configurations regarded. A multidimensional sled test facility's potential to image a full scale crash test can only be exploited if the multidimensional target sled motion can be calculated from a full scale test motion explicitly. For this reason methods were developed to calculate dynamic target motions as well as the ideal pre-rotation about the yaw-axis quickly and without using time-consuming simulations.

The technical potential of multidimensional sled test facilities depends on many further factors. So investigations were performed regarding vagueness during the development process, like crash test scattering or changing motions between the first structural calculation and start of production, in a simplified way. Additionally non perfect repeatability as well as not fulfilling target parameters for reasons of technical boundaries were regarded. These investigations however did not minor the additional benefit of multidimensional compared to conventional sled test facilities.

In the end a new facility concept, using only kinetic energy from the initial speed, fulfilling the major requirements and offering the possibility of a pre-crash motion, is presented. These features could be advantageous for future developments combining active and passive safety.

Abkürzungen

a3ms	Maximale Beschleunigung, die über ein Zeitfenster von drei Millisekunden erhalten bleibt
CFC	Channel Frequency Class
COG	Center of Gravity
DSD	Dr. Steffan Datentechnik
ECE	Economic Commission for Europe
EuroNCAP	European New Car Assessment Program
FE	Finite Elemente
FMVSS	Federal Motor Vehicle Safety Standard
FTSS	First Technology Safety Systems
H305	Hybrid 3 Dummy female 5 % Percentile
H350	Hybrid 3 Dummy male 50 % Percentile
HIC	Head Injury Criterion
IAV	Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr
IIHS	Insurance Institute for Highway Safety
IST	Instron Structural Testing Systems
MKS	Mehrkörpersystem
NCAC	National Crash Analysis Center
NCAP	New Car Assessment Program
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
NIJ	Neck Injury criterion
ODB	Offset Deformable Barrier
OEM	Original Equipment Manufacturer
PDB	Partnership for Dummy Technology and Biomechanics
PDOF	Principal Direction of Force
PMHS	Post Mortem Human Subject
RCAR	Research Council for Automobile Repairs
RHS	Rückhaltesystem
SAE	Society of Automotive Engineers
SOP	Start of Production
SUV	Sports Utility Vehicle
TTF	Time to fire
USNCAP	US New Car Assessment Program

Inhalt

Vorwort	V
Zusammenfassung	VII
Abstract	VIII
Abkürzungen	IX
1 Einleitung	5
1.1 Häufigkeit von Frontalunfällen	5
1.2 Unfallverlauf	5
1.3 Entwicklungsmethodik	7
1.4 Anforderungen an Schlittenanlagen	8
1.5 Stand der Technik von Schlittenanlagen für Entwicklungen im Frontalanprall	8
1.5.1 Vorwärtsprinzip	8
1.5.2 Rückwärtsprinzip	9
1.5.3 Eigenschaften von Vor- und Rückwärtsprinzip	9
1.5.4 Anlagen mit mehreren Freiheitsgraden	9
2 Aufgabenstellung	13
3 Methode	15
3.1 Bewegungen	15
3.2 Bewertung der Abbildung	15
3.3 Methoden für die Verbesserung der Abbildung auf Schlittenanlagen	16
3.4 Einschränkungen der Anlagendynamik	16
3.5 Unsicherheiten im Entwicklungsprozess	16
4 Definitionen und Grundlagen	17
4.1 Finite Elemente Solver	17
4.1.1 Explizite Zeitintegration.....	17
4.1.2 Materialmodelle für Finite Elemente Methoden	17
4.1.3 Elementformulierungen für Finite Elemente Methoden.....	17
4.1.4 Starrkörper	18
4.1.5 Kontakt	18
4.2 Insassenmodelle	18
4.3 Definitionen der Fahrzeugbewegung	19
4.4 Definition von Systemen und Punkten der Dummies	21
4.5 Bewegungsberechnung	22
4.5.1 Konventionen	22

4.5.2	Bewegungsmodifikationen für den FE-Solver	23
4.5.3	Sperrung von Freiheitsgraden der Fahrzeugbewegung	25
4.6	Definition der Abbildungsgüte	27
4.6.1	Subjektive Beurteilung	28
4.6.2	Objektive Beurteilung	29
4.6.3	Zusammenführung subjektiver und objektiver Beurteilungen	34
5	Abbildung von Gesamtfahrzeugversuchen auf Schlittenanlagen mit verschiedenen Bewegungskomponenten	35
5.1	Kategorisierung von Crashversuchen basierend auf Bewegungsanalysen	35
5.1.1	Untersuchte Lastfälle	35
5.1.2	Entstehung von Bewegungskomponenten	36
5.1.3	Auftretende Bewegungsbandbreiten	41
5.1.4	Zusammenfassung	42
5.2	Einfluss der Fahrzeugbewegungsanteile auf die Kräftesituation von Insassen beim Crashversuch	42
5.2.1	Airbag-Kraft	43
5.2.2	Brustgurt	44
5.2.3	Kräfte auf den Beckenbereich	44
5.2.4	Tibia-Kraft	45
5.3	Abbildung von 6DOF-Crashversuchen auf 1DOF-Schlittenanlagen	45
5.3.1	Ergebnis für ein Fahrzeug der Mittelklasse	45
5.3.2	Ergebnisse für Kleinwagen und SUV	54
5.3.3	Zusammenfassung	55
5.4	Abbildung von 6DOF-Crashversuchen mit Vorverdrehung	56
5.4.1	Regressionsmethode - Berechnung der optimalen Vorverdrehung um die ⁰ Z-Achse	56
5.4.2	Verbesserte Abbildung durch Vorverdrehung um die ⁰ Z-Achse beim Lastfall EuroNCAP	61
5.4.3	Verbesserte Abbildung durch Vorverdrehung um die ⁰ Z-Achse beim Lastfall FMVSS 208 30°	64
5.4.4	Kontaktpunktmethode – Erweiterung der Regressionsmethode	68
5.4.5	Verbesserte Abbildung durch Vorverdrehung um die ⁰ Z-Achse beim Lastfall „Small Overlap“	70
5.4.6	Zusammenfassung	71
5.4.7	Abbildung bei Vorverdrehung um die ⁰ Y-Achse am Beispiel USNCAP	72
5.5	Abbildung von 6DOF-Crashversuchen bei kausaler Veränderung von Zündzeitpunkten	74
5.6	Abbildung von 6DOF-Crashversuchen auf Anlagen mit drei Freiheitsgraden zur Applikation der Nickbewegung	76
5.6.1	USNCAP	76
5.6.2	EuroNCAP	77
5.6.3	Zusammenfassung	80
5.7	Abbildung von 6DOF-Crashversuchen auf Anlagen mit drei Freiheitsgraden zur Applikation der Gierbewegung	80
5.7.1	EuroNCAP	80
5.7.2	FMVSS 208 30°	81

5.7.3	Small Overlap.....	81
5.7.4	Zusammenfassung.....	83
5.8	Abbildung von asymmetrischen 6DOF-Crashversuchen auf nickfähigen Anlagen mit Vorverdrehung.....	84
5.8.1	Bewegungsberechnung für nickfähige Anlagen mit Vorverdrehung und Optimierung für einzelne Insassenpositionen	85
5.8.2	Nickachse normal zur Fahrzeuglängsachse (lokales Nicken)	89
5.8.3	Nickachse normal zur Bewegungsrichtung (globales Nicken)	96
5.8.4	Fazit	100
6	Abbildung von Gesamtfahrzeugversuchen auf Schlittenanlagen unter Einschränkungen im realen Einsatz	103
6.1	Einfluss der Anlagendynamik auf Abbildungen von Realtests.....	103
6.1.1	Methode	104
6.1.2	Abbildungswerte bei reduzierter Dynamik.....	108
6.1.3	Ausgleichende Bewegungsveränderung.....	116
6.1.4	Fazit	118
6.2	Einsatz von Schlittenanlagen im Kontext streuender Fahrzeugversuche und Unschärfen während des Entwicklungsprozesses	119
6.2.1	Methode.....	120
6.2.2	Ergebnisse.....	121
6.2.3	Fazit	122
7	Umsetzung von Schlittenanlagen	125
7.1	Anforderungen an Schlittenanlagen	125
7.2	Problemstellungen bei der Umsetzung einer mehrdimensionalen Schlittenbewegung.....	125
7.3	Neues Anlagenkonzept.....	126
7.3.1	Funktionsweise des VSI-Schlittenanlagenkonzepts	127
7.4	Fazit.....	130
7.4.1	Vor- und Nachteile des VSI-Anlagenkonzepts	130
8	Schlussfolgerung.....	131
9	Abbildungsverzeichnis.....	133
10	Tabellenverzeichnis.....	141
11	Literaturverzeichnis	145

1 Einleitung

1.1 Häufigkeit von Frontalunfällen

Verkehrsunfälle mit Todesfolge stellen ein großes globales Problem dar. 2002 wurden im weltweiten Straßenverkehr nach einer Zählung der WHO 1183492 Menschen getötet [31]. In dieser Arbeit wurden spezifische Anforderungen der Märkte USA und Europa zugrunde gelegt. In den USA gab es im Straßenverkehr nach mehrjährigem Abwärtstrend im Jahr 2011 32367 Todesopfer [2]. In der EU ist die Zahl mit 30269 für das Jahr 2009 ähnlich [11]. Frontalunfälle zählen zu den statistisch relevantesten Unfallarten beim Ziel, Unfälle zu verhindern und deren Schwere zu reduzieren [2, 28, 43]. 69 % der Todesfälle im Straßenverkehr in den USA entfielen auf Insassen mehrspuriger Kraftfahrzeuge. 59 % der involvierten Personenkraftwagen wiesen den Erstkontakt im Frontbereich auf [2]. In Österreich gab es 531 Todesopfer im Jahr 2012. Davon waren 52 % Insassen von PKW [43]. 30 % dieser Unfälle waren Gegenverkehrskollisionen [50]. Die Position des Erstkontakts am Fahrzeug ist hier nicht statistisch erhoben. Auch andere Unfallarten fallen also teilweise in die Kategorie Frontalanprall. Die Anzahl von verletzten Personen ist um das Hundertfache höher als jene der Todesfälle. Aus diesen beispielhaften Zahlen lässt sich abschätzen, dass die Entwicklung der Fahrzeugsicherheit zum Schutz von Fahrzeuginsassen bei Frontalkollisionen relevant ist. Um diese Frontalkollisionen besser zu verstehen, werden sie in einzelne Phasen unterteilt.

1.2 Unfallverlauf

Die einzelnen Phasen von Frontalkollisionen können je nach Problemstellung unterschiedlich aufgegliedert werden. In der integralen Sicherheit, die die Vernetzung von aktiver (Unfallvermeidung) und passiver (Verringerung der Unfallschwere) Sicherheit beschreibt, wird beispielsweise anhand von Fahrzuständen und Sicherheitssystemen unterteilt [40]:

- 1) Konditionssicherheit: normaler Fahrzustand
- 2) Unfallvermeidung: kritischer Fahrzustand, instabiler Fahrzustand, aktive Sicherheitssysteme
- 3) Unfallfolgen mildern: Unvermeidbarkeit des Unfalls, Unfall, passive Sicherheitssysteme
- 4) Retten und Bergen: erfolgt nach dem Unfall

Aufgrund der Untersuchung von Fahrzeugbewegungen sowie Bewegungen von Fahrzeuginsassen wird für diese Arbeit folgende Unterteilung definiert (Tabelle 1). Der Verlauf ist dabei beispielhaft und Zeitangaben sind Richtwerte.

Tabelle 1 Beispiel einer Phasenunterteilung eines Frontalanpralls

Einteilung nach Schwarz	Konditionssicherheit	Unfallvermeidung		Passive Sicherheit				Retten und Bergen	
Phase		1	2	3	4	5	6		
Beispielhafte Zeitschiene		-1500ms	-1000ms	t ₀	30ms	60ms	100ms	130ms	
Fahrzeug		Kollisionswarnung	autonome Notbremsung	Deformation	Deformation / Nickbewegung		Rebound		keine Bewegung
Insasse		Gefahreneerkennung/Reaktion	Vorverlagerung			Verzögerung durch RHS	Rebound		keine Bewegung
		nicht berücksichtigt		berücksichtigt					nicht berücksichtigt

- 1) *Pre-Crash Phase 1: Gefahrenerkennung durch den Fahrer oder ein Assistenzsystem, keine Änderung des Fahrzustandes.*
Keine Relevanz.
- 2) *Pre-Crash Phase 2: Maßnahmen zur Unfallvermeidung oder Reduktion der Unfallschwere durch den Fahrer oder ein Assistenzsystem.*
Fahrzeuga-bewegung: Änderung des Fahrzustandes (Bremsen, Ausweichen) aufgrund von Reifenkräften.
Insasse: Verlagerung der Insassenpositionen. In dieser Phase können bereits Rückhaltesysteme Verwendung finden, die durch aktive Sicherheitssysteme ausgelöst werden (bsp. reversible Gurtstraffung) um die Insassen in Normposition zu bringen.
- 3) *Crashphase 1: Erkennen der Kollision sowie der voraussichtlichen Unfallschwere durch die Sicherheitssysteme.*
Fahrzeuga-bewegung: Zunehmende Verzögerung. Bewegungsrichtung bleibt annähernd unverändert.
Insasse: In dieser Phase (ca. 10-30 ms) vom Erstkontakt (t₀) bis zur Zündung irreversibler Rückhaltesysteme wird vorwiegend aufgrund der Fahrzeugbeschleunigung durch ein Steuergerät die richtige Auslösestrategie für Rückhaltesysteme berechnet. Ebenfalls in diese Phase fällt die mechanische Sperrung des Gurtaufrollers. Eine Rückhaltewirkung für den Insassen ist aber noch nicht gegeben, da der Gurt erst durch Vorverlagerung oder einen Gurtstraffer gespannt werden muss. Ausnahme ist die Verwendung eines reversiblen Gurtstraffers, der schon vor t₀ (Zeitpunkt des Erstkontakts) aktiviert wird.
- 4) *Crashphase 2: Auslösung und Wirkungsentfaltung irreversibler, pyrotechnischer Rückhaltesysteme, Veränderung der Fahrzeugbewegung.*
Fahrzeuga-bewegung: In dieser Phase treten durch Deformationen des Vorderwagens und nicht zentrische Kraftrichtungen der Lastpfade vom Kollisionsobjekt zusätzliche Bewegungsanteile der Fahrgastzelle auf.
Insasse: Um den Insassen möglichst schnell an die Bewegung des Fahrzeugs anzukoppeln, werden die Gurte pyrotechnisch gestrafft und die Airbags entfaltet.
- 5) *Crashphase 3: Geschwindigkeitsabbau.*
Fahrzeuga-bewegung: Der Anteil des Geschwindigkeitsvektors des Fahrzeugs in der Bewegungsrichtung zum Zeitpunkt des Erstkontakts wird abgebaut (Ausnahme sind

Unfälle mit positiver Auslaufgeschwindigkeit, z.B. im Richtungsverkehr). Es bleiben Bewegungsanteile der anderen Raumrichtungen erhalten.

Insasse: Die Differenz der Fahrzeuggeschwindigkeit und der Geschwindigkeit des Insassen zu dem Zeitpunkt, an dem die Rückhaltesysteme voll wirken, muss wieder abgebaut werden. Sie entsteht dadurch, dass der Insasse durch die Rückhaltesysteme weniger stark verzögert wurde als das Fahrzeug. Der Ausgleich erfolgt durch Ausnutzen des freien Raumes vor den Insassen. Um diesen für den Fahrer zu vergrößern, kann das Lenkrad eingeschoben werden. Diese Phase dauert bis zum Stillstand an.

6) *Crashphase 4: Rebound.*

Fahrzeugbewegung: Durch elastische Anteile des Fahrzeugdeformationsverhaltens entsteht eine Gegenbewegung des Fahrzeugs.

Insasse: Durch elastische Anteile der Rückhaltesysteme entsteht eine Gegenbewegung des Insassen gegenüber dem Fahrzeug. Diese Phase ist nicht sehr energiereich, erhöht aber ungünstiger Weise die Unfallschwere durch die größere Differenz der Geschwindigkeitsvektoren vor und nach dem Crash (Δv). Der Beginn der Reboundphase ist für Fahrzeug und Insassen nicht ident.

1.3 Entwicklungsmethodik

Die wesentlichen Werkzeuge für Entwicklungen in der Fahrzeugsicherheit sind Simulationen und Versuche. Virtuelle Auslegungen aus frühen Phasen eines Entwicklungsprozesses sind später bei Vorhandensein von Prototypenbauteilen unbedingt durch Versuche abzugleichen. So kann die Prognosegüte virtueller Verfahren verbessert werden, was wiederum zu einer Reduktion der notwendigen Anzahl an Realversuchen führt. Es werden aber beide Entwicklungswerkzeuge auch zukünftig bestehen bleiben.

Entwicklungen im Bereich der Frontalcrashtests können versuchsseitig anhand von Gesamtfahrzeugversuchen oder Komponentenversuchen durchgeführt werden. Schlittenversuche sind deutlich günstiger als Gesamtfahrzeugversuche, haben aber den Nachteil, dass Gesamtfahrzeugversuche nicht exakt abgebildet werden können. Sie sind gut reproduzierbar, aber auf realistische Eingangspulse angewiesen. Natürlich könnten auch Simulationen, die anhand von Schlittenversuchen validiert wurden, dazu verwendet werden, die Abbildung des Gesamtfahrzeugversuches wieder zu erhöhen. Leider können gewisse Effekte in Simulationsprogrammen nicht oder nur mit unverhältnismäßig großem Aufwand realitätsgetreu abgebildet werden, wodurch auch hier immer ein Fehler bestehen bleibt (bsp. exakte Bewegung bei der Airbagentfaltung).

Im Entwicklungsbereich Frontalcrashtests werden Schlittenanlagen vorwiegend für die Abstimmung der Rückhaltesysteme und für Detailuntersuchungen verwendet. Der Versuchsaufbau wird mittels einer sogenannten Panzerkarosse, eine dem Versuchsfahrzeug entsprechende Fahrgastzelle aufgebaut. Diese ist so versteift, dass bei Aufbringen der entsprechenden Beschleunigung keine wesentlichen Deformationen auftreten. Die weitgehend zulässigen Annahmen für diese Methode sind, dass sich die Fahrgastzelle im Realcrash nicht deformiert und keine Intrusionen auftreten. Bei Fußraumintrusionen können diese Annahmen von der Realität abweichen. Hier gibt es Ansätze, diese Intrusionen am Schlitten darzustellen [5, 44] (Phase 5 und 6 in Tabelle 1).

1.4 Anforderungen an Schlittenanlagen

Schlittenanlagen müssen die Auswirkungen eines Realcrashs für einen Insassen nachstellen können. Daher müssen alle, den Insassen kontaktierenden Bauteile (zumindest: Sitz, Gurt, Fußraum, Lenkrad, Airbag, Instrumententafel) realitätsgetreu aufgebaut sein. Das Verhalten dieser Bauteile muss unter den Massekräften beim Versuch jenem des Gesamtfahrzeugs entsprechen.

Die realitätsgetreue Abbildung des Unfallverlaufs wird durch Aufbringen der dafür notwendigen Bewegungsanteile erzeugt. Diese müssen von einer Anlage reproduzierbar und detailliert bereitgestellt werden können.

Eine Schlittenanlage sollte eine geringe Komplexität aufweisen, um in einen Fahrzeugentwicklungsprozess eingebunden werden zu können. Dazu zählen ein möglichst geringer Zeitaufwand für das sogenannte „Einschießen“ bis zur Darstellung der gewünschten Bewegungen, also das Trimmen der Vorgabebewegung um die Sollbewegung bestmöglich abzubilden, sowie ein wirtschaftlicher Kostenaufwand für Anschaffung und Betrieb.

Ein zunehmender Entwicklungszweig ist jener der integralen Sicherheit. Diese verbindet aktive (Unfallvermeidung) und passive Sicherheit (Reduktion der Verletzungsschwere). Durch die integrale Sicherheit werden sich Entwicklungsfragen häufen, bei denen auf Pre-Crash-Phasen eingegangen wird (Vorbremmung, Dummyvorverlagerung, etc.). Solche Vorbremmungen müssen dann von einer Anlage dargestellt werden können (vgl. Phase 2 in Tabelle 1).

1.5 Stand der Technik von Schlittenanlagen für Entwicklungen im Frontalanprall

Schlittenanlagen mit einem Freiheitsgrad sind Stand der Technik und werden bei vielen OEMs, Zulieferern und Forschungsinstituten der Fahrzeugindustrie eingesetzt. Es werden zwei Prinzipien (Vorwärtsprinzip und Rückwärtsprinzip) unterschieden (Abbildung 1).

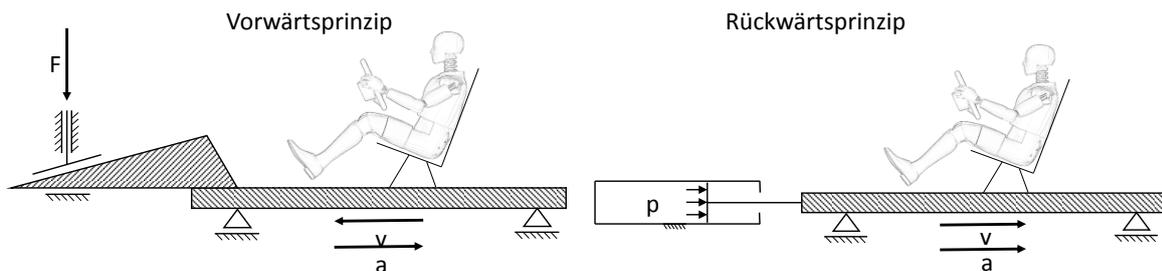


Abbildung 1 Vorwärtsprinzip und Rückwärtsprinzip bei Schlittenanlagen

1.5.1 Vorwärtsprinzip

Die Panzerkarosse wird auf einem Schlitten bis zur erforderlichen Geschwindigkeit sanft beschleunigt und anschließend durch deformationsbasierte bzw. reibungsbasierte Bremsen oder hydraulisch geregelte Bremseinrichtungen entsprechend eines Crashtests wieder verzögert [22, 23]. Eine Bewegungsumkehr ist nicht möglich. Daher wird zur Abbildung des gesamten Δv des Realcrashtests (Anfahrtschwindigkeit + Reboundgeschwindigkeit) eine erhöhte Anfahrtschwindigkeit verwendet.

Im Vorwärtsprinzip werden verschiedene Methoden zur definierten Abbremsung des Schlittens verwendet. Eine Abbremsung über Biegebleche oder Stauchrohre kann in gewissen Grenzen eingestellt, aber nicht geregelt werden. Die Reproduzierbarkeit leidet unter der Anisotropie der sich plastisch verformenden Materialien. Hydraulische Bremssysteme versprechen hier ein wesentlich größeres Potential. Bei ihnen wird beispielsweise am Schlitten ein Bremsdorn befestigt, der bei der Abbremsung ein hydraulisches Fluid aus einer Kammer verdrängt. Diese Verdrängung kann über ein hochdynamisches Ventil geregelt werden [23].

1.5.2 Rückwärtsprinzip

Beim Rückwärtsprinzip wird die Panzerkarosse durch eine Katapulteinrichtung aus dem Stand gegen die eigentliche Fahrtrichtung des Realcrashtests, entsprechend der realen Verzögerung beschleunigt. Anschließend wird die Geschwindigkeit moderat abgebaut. Die Kräftesituation am Dummy kann durch diese Bewegung ebenso wie im Vorwärtsprinzip dargestellt werden.

Anlagen für das Rückwärtsprinzip müssen große Beschleunigungskräfte aufbringen können. Das kann beispielsweise durch Gasdruckspeicher erfolgen. Erwähnt sei das Prinzip der Hyper-G Anlagen, bei dem eine große Schubkraft pneumatisch aufgebracht wird, während die Regelung der Vorgabebeschleunigungskurve mithilfe von hydraulischen Schubstangenbremsen erfolgt [16].

1.5.3 Eigenschaften von Vor- und Rückwärtsprinzip

Vorteil des Vorwärtsprinzips ist, dass bestehende Crashanlagen adaptiert werden, und Gesamtfahrzeugtests sowie Schlittentests auf ein und derselben Anlage durchgeführt werden können. Der Vorteil des Rückwärtsprinzips ist, dass Dummypositionen zu Versuchsbeginn viel genauer eingemessen werden können, da sich der Dummy bis t_0 nicht bewegt. Das erhöht die Reproduzierbarkeit und erleichtert die Auswertung. Außerdem ist der Platzbedarf für eine solche Anlage viel geringer als jener für das Vorwärtsprinzip. Bei zukünftigen Anlagen ist aber auch die Abbildung einer Pre-Crash-Phase zu überlegen, was im Vorwärtsprinzip aus heutiger Sicht einfacher zu realisieren ist. Grund dafür ist, dass im Rückwärtsprinzip die Strecke, auf der Energie in den Schlitten eingebracht werden muss, sehr groß werden würde. Eine solche Anforderung ist zurzeit aber noch ungewiss.

1.5.4 Anlagen mit mehreren Freiheitsgraden

Dass Nick- und Gierbewegungen einen deutlichen Einfluss auf die Bewegung der Insassen haben, ist seit den Anfängen der Fahrzeugsicherheitsentwicklung bekannt. Die technische Umsetzung dieser Bewegungen auf Schlittenanlagen kann unterteilt werden in eine aktive Energiezufuhr und eine Ausnützung der Trägheit. Bei aktiver Energiezufuhr lassen sich die Einzelbewegungen, je nach System, unabhängig verändern. Bei einer Ausnützung der Trägheit ergibt sich eine Abhängigkeit zwischen der Längsbewegung und den anderen Bewegungsanteilen.

Jordan präsentierte schon 1974 eine Möglichkeit sowohl die Nick- als auch die Gierbewegung durch Ausnutzung der Trägheit auf einer Anlage darzustellen [19]. Dabei wird die Gierbewegung über eine exzentrisch angebrachte Koppelstange, die einen Unterschlitten mit einem Oberschlitten verbindet, induziert. Die Nickbewegung wird durch eine weitere gelenkige Anbindung erreicht. Momentandrehachsen der Bewegungsanteile Nicken sowie Gieren im System des Unterschlittens können sich so nicht ändern, was aber bei Realcrashtests sehr stark der Fall ist. Eine aktuellere Entwicklung der IAV GmbH versucht ebenfalls beide Bewegungsanteile durch

Ausnutzung der Trägheit darzustellen. Dabei ist die Panzerkarosse auf dem Schlitten frei beweglich. Die Bewegung ergibt sich durch ein definiertes Deformationselement zwischen Schlitten und der Karosse oder durch eine entsprechende Mechanik [7, 32, 49]. Es gibt eine Reihe weiterer Patente, die eine Abbildung von Nick- und Gierbewegungen in Aussicht stellen, diese wurden aber bisher aufgrund der hohen, dynamischen Kräfte nicht umgesetzt. Drei realisierte und einsetzbare Systeme sind zurzeit bekannt, die lediglich die Nickbewegung abbilden. Eine Anlage von DSD vermischt die Ausnutzung der Trägheit mit aktivem Energieeintrag. Mithilfe von Intrusionszylindern, ähnlich dem genannten Hyper-G, wird die gewünschte Bewegung eingestellt. Eine Bewegungsumkehr wird durch einen Kurbeltrieb realisiert [24] (Abbildung 2).

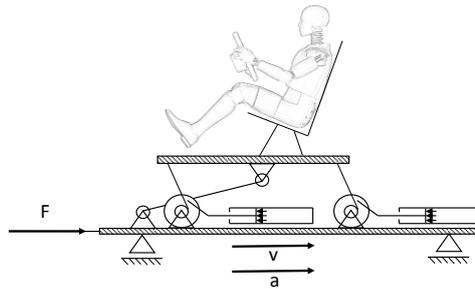


Abbildung 2 Prinzip einer nickfähigen Anlage von DSD

Instron Structural Systems entwickelte ein System im Rückwärtsprinzip, bei dem die Nickbewegung von der Längsbewegung völlig entkoppelt ist. Hierbei wird die vertikale Position von kurzen horizontal ausgerichteten Führungsschienen durch Hubzylinder verändert. Der Schlittenaufbau ist vorne und hinten in unterschiedlichen Schienen geführt, wodurch drei Freiheitsgrade entstehen [56] (Abbildung 3).

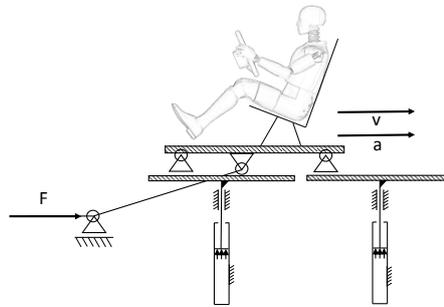


Abbildung 3 Prinzip einer nickfähigen Anlage von IST

Seattle Safety setzt zur Erzeugung einer Nickbewegung auf Kulissenführungen, deren Form veränderlich ist [51] (Abbildung 4).

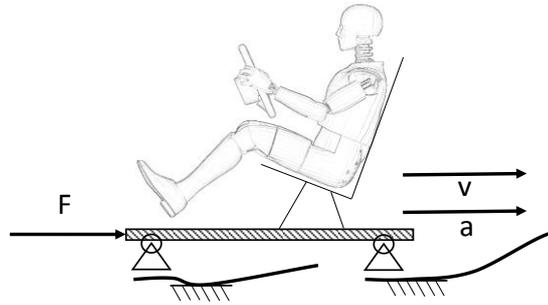


Abbildung 4 Prinzip einer nickfähigen Anlage von Seattle Safety

Hersteller dieser nickfähigen Anlagen weisen auf die Relevanz dieser Bewegungen hin [15], eine detaillierte Erfassung der realen Vorteile ist aber bis jetzt nicht bekannt.

2 Aufgabenstellung

Ziel dieser Dissertation ist eine umfassende Wissensbasis über Potentiale verschiedener Bewegungsanteile von Schlittenanlagen für den Einsatz in der Fahrzeugsicherheitsentwicklung. Dazu wurden folgende Teilaufgaben definiert:

- *Entwicklung einer Methodik für eine objektive Bewertung der Abbildung eines Fahrzeugversuchs durch einen Komponententest.*

Eine gute Abbildung zeichnet sich dabei dadurch aus, dass die Belastungen auf den Dummy sowie dessen Trajektorien innerhalb seiner Fahrzeugumgebung möglichst ident sind. Hinsichtlich der Dummybelastungen ist es nicht ausreichend, nur die Maximalwerte abzubilden. Stattdessen sollen sich die Verläufe der maßgeblichen Dummysignale gleichen. Einerseits sind wesentliche Verletzungskriterien verlaufsabhängig, andererseits ist die richtige Abbildung von Verläufen in der Entwicklung von Bedeutung um Potentiale und Defizite erkennen zu können. Die Dummykinematik im Fahrzeugsystem wird ebenfalls in Betracht gezogen, da auch Restabstände zu Bauteilen des Fahrzeuginnenraums entwicklungsrelevant sind. Aufgrund der Versuchsstreuung müssen Restabstände mit gewissen Sicherheiten ausgelegt werden.
- *Ermittlung der relevanten Fahrzeugbewegungskomponenten für die Abbildung von Dummybelastungen und Dummybewegungen je nach Lastfall.*

Es soll ein Anforderungsprofil für zukünftige Entwicklungen von Schlittenanlagen gefunden werden.

 - *Kategorisierung von Crashversuchen basierend auf einer Bewegungsanalyse.*

Bei der Fahrzeugentwicklung hinsichtlich Frontalanprall werden neben gesetzlichen Anforderungen auch Testszenarien von Verbraucherschutzorganisationen (bsp. USNCAP, EuroNCAP, IIHS,...) zugrunde gelegt. Diese Tests weisen unterschiedliche Randbedingungen (Form und Verhalten der Barriere, Anfahrsgeschwindigkeit, Verwendung von Sicherheitsgurten) auf. Daher können je nach Lastfall unterschiedliche Fahrzeugbewegungsanteile wichtig für die Abbildung der Dummybelastung und Dummykinematik sein.
 - *Ermittlung der relevanten Fahrzeugbewegungen je Kategorie.*
 - *Ermittlung von Möglichkeiten zur Umsetzung der relevanten Fahrzeugbewegungen auf Schlittenanlagen.*
- *Entwicklung von Methoden für die Verbesserung der Abbildung von herkömmlichen Schlittenanlagen sowie solchen mit mehrdimensionalen Bewegungen.*

Dieser Punkt betrifft die Berechnung der Bewegungen der jeweils zur Verfügung gestellten Freiheitsgrade aus den dreidimensionalen Bewegungsdaten eines Gesamtfahrzeugversuchs.
- *Bestimmung des Einflusses von Einschränkungen in der Anlagendynamik auf Dummybelastungen und Dummybewegungen.*

Bei der Bestimmung erzielbarer Abbildungsgüten muss auch in Betracht gezogen werden, dass reale Anlagen berechnete Vorgabebewegungen nicht perfekt umsetzen können und eine gewisse Streuung aufweisen.

- *Bestimmung des Nutzens erhöhter Anlagenkomplexität im Kontext der Unsicherheiten im Entwicklungsprozess.*

Dieser Punkt berücksichtigt, dass sich Fahrzeugbewegungen innerhalb eines Entwicklungsprozesses von der ersten Strukturberechnung bis zum Serienprodukt ändern. Je nach Einsatzzeitpunkt einer Anlage muss daher mit einem Streuband möglicher Bewegungen gearbeitet werden. Zudem bestehen auch zu diskreten Zeitpunkten Unsicherheiten durch Versuchsstreuung. Je nach untersuchter Fragestellung könnte auch dieser Aspekt das Potential mehrdimensionaler Anlagen verringern.

3 Methode

Für die Beantwortung der Fragestellungen wurden Finite Elemente Simulationen durchgeführt. Sehr gut validierte, aktuelle numerische Modelle unterschiedlicher Fahrzeuge, bestehend aus Fahrgastzelle, Armaturentafel, Lenksäule, Pedalerie, Airbags, Gurtsystem, Sitz und Dummy, wurden von Volkswagen AG zur Verfügung gestellt. Die verwendeten Fahrzeugbewegungen beruhen auf Realversuchen. Sämtliche Ergebnisse dieser Arbeit entstammen aber Simulationen.

3.1 Bewegungen

Bei aktuellen Gesamtfahrzeugversuchen werden im Allgemeinen Videoanalysen eingesetzt. Durch die Aufzeichnungen mehrerer synchron laufender Hochgeschwindigkeitskameras kann die Bewegung der Fahrgastzelle mit einer Genauigkeit von unter 5 mm [33, 34] ermittelt werden. Diese Bewegung wird einer Starrkörperbewegung angenähert und durch sechs Freiheitsgrade beschrieben.

Originale Bewegungsdaten wurden entsprechend der numerischen Anforderungen für FE-Simulationen modifiziert (Filtern zum Ausgleich von Pixelfehlern, Einschreiben von Splinekurven und Erhöhung der Samplerate, etc.). Bei dem verwendeten FE-Solver kann aufgrund zusätzlich implementierter Gleichungen der Mehrkörperdynamik diese Bewegung in sechs Freiheitsgraden einem Starrkörper zugewiesen werden. Dieser Starrkörper bildet die Karosserie der Fahrgastzelle. Somit sind alle Befestigungspunkte für relevante Bauteile (Sitz, Lenksäule, Pedalerie, Armaturentafel, etc.) starr miteinander verbunden.

Durch eine Reihe von Berechnungsschritten wurden aus den Bewegungsverläufen in sechs Freiheitsgraden ideale Bewegungsverläufe bei eingeschränkten Freiheitsgraden ermittelt. Die ideale eingeschränkte Bewegung ist nicht immer eindeutig. In diesem Fall wurden verschiedene Möglichkeiten bewertet.

Simulationen mit den Bewegungsdaten der Gesamtfahrzeugversuche liefern die Referenzergebnisse, die durch Konfigurationen mit eingeschränkten Freiheitsgraden möglichst gut abgebildet werden sollen. Es wäre nicht zweckmäßig, für die Betrachtung einer Abbildung direkt die Ergebnisse der Gesamtfahrzeugversuche mit Simulationen eingeschränkter Freiheitsgrade zu vergleichen, da so zwei Abbildungsfehler vermischt würden (Fahrzeugversuch – Simulation – Einschränkung von Freiheitsgraden) und ihre Anteile nicht mehr feststellbar wären. Durch den gewählten Ansatz sind natürlich Abweichungen zwischen Simulationen und etwaigen Realversuchen zu erwarten. Aufgrund relativer Betrachtungen dürften diese Fehler die getroffenen Aussagen aber kaum beeinflussen.

3.2 Bewertung der Abbildung

Um einen objektiven Vergleich unterschiedlicher Konfigurationen sicherzustellen, wurden Bewertungsschemen definiert, die je nach Lastfall unterschiedlich gewichtet sind. Steht beispielsweise bei einem Test mit gegurteten Insassen die richtige Abbildung der Belastungen des Körpers des Dummies im Vordergrund, so ist bei einem Test ohne Sicherheitsgurte die Kopftrajektorie von großer Bedeutung, da hier ein entwicklungsrelevanter Kontakt zwischen Kopf

und A-Säule auftreten kann, der vermieden werden sollte. Mit dem Korrelationsanalyse-Programm CORA von PDB wurde ein Bewertungsmuster erstellt, mit dem Dummybelastungen und Trajektorien objektiv bewertet wurden, was eine gesicherte Aussage über die bestmögliche Abbildung eines Realversuchs zulässt [14].

3.3 Methoden für die Verbesserung der Abbildung auf Schlittenanlagen

Durch das zunehmende Verständnis der Zusammenhänge entstanden Ideen zur Verbesserung von Schlittentests innerhalb der gegebenen Randbedingungen. Folgende Punkte wurden untersucht.

1. Vorverdrehung des Aufbaus am Schlitten für Anlagen mit einem bzw. drei Freiheitsgraden
2. Wahl des Referenzpunktes für die Berechnung der Vorgabebewegung für Anlagen mit drei Freiheitsgraden
3. Veränderung von Zündzeitpunkten der Rückhaltesysteme für Anlagen mit einem Freiheitsgrad

Entsprechende Berechnungsmethoden wurden entwickelt, und der Grad der dadurch verbesserten Abbildung wurde ermittelt.

3.4 Einschränkungen der Anlagendynamik

Bei Einschränkungen der Anlagendynamik (bsp. ein Überschreiten der Maximalbeschleunigung durch die Vorgabe) ist das Verhalten von der jeweiligen Bauweise der Anlage und dem verwendeten Regler abhängig. Es wurde versucht, allgemeingültige Aussagen zu erhalten. So wurde auf die Betrachtung von Reglern verzichtet und zwischen Bewegungsänderungen mit und ohne ausgleichender Berechnung unterschieden. Dabei setzt die ausgleichende Bewegungsberechnung die Kenntnis voraus, dass ein Anlagenmaximalwert von der Vorgabebewegung überschritten wird. Um beschränkte Anlagendynamik zu simulieren wurden die Bewegungsdaten nach unterschiedlichen Gesichtspunkten modifiziert:

- Filterung der Beschleunigungsverläufe mit schrittweise abnehmender Grenzfrequenz
- Beschränkung maximaler Beschleunigungen
- Beschränkung maximaler Geschwindigkeiten

Eine detaillierte Erklärung der Methode erfolgt in Kapitel 6.1.1.

3.5 Unsicherheiten im Entwicklungsprozess

Um die beschriebenen Unschärfen im Entwicklungsprozess zu berücksichtigen, wurden jeweils verschiedene Versuchsbewegungen desselben Fahrzeugtyps betrachtet. Die Differenzen der Bewegungen resultieren dabei sowohl aus der Versuchsstreuung als auch aus Veränderungen der Fahrzeugstruktur. Die Simulationen bildeten eine Spannbreite der unterschiedlichen relevanten Verläufe. Simulationsergebnisse bei eingeschränkten Freiheitsgraden wurden mit mehreren Referenzsimulationen verglichen und die Abbildungen dem Streuband gegenübergestellt. So konnte festgestellt werden, ob der Fehler durch die Einschränkung der Anlagenfreiheitsgrade größer ist als der Fehler durch Streuung.

4 Definitionen und Grundlagen

In diesem Kapitel werden grundlegende Definitionen der Bewegungen und Orientierungen in den Koordinatensystemen sowie wiederkehrende Bewegungsberechnungen beschrieben. Auch wird auf Möglichkeiten und Einschränkungen des verwendeten Finite Elemente Programms bezüglich der vorliegenden Anforderungen eingegangen.

4.1 Finite Elemente Solver

Zur Berechnung der Finite Elemente Modelle wurde der Solver Pam Crash [3] verwendet. Damit ist es möglich, nichtlineare, zeitabhängige Fragestellungen zu berechnen. Die Zeitintegration der Bewegungsgleichungen kann implizit oder explizit erfolgen, wobei in dieser Arbeit nur die explizite Methode von Bedeutung ist.

4.1.1 Explizite Zeitintegration

Bei der expliziten Zeitintegration wird aus der Bewegungsgleichung, beispielsweise $\tilde{M}\ddot{\vec{x}} + \tilde{C}\dot{\vec{x}} + \tilde{K}\vec{x} = \vec{F}_{ext}$ und mathematischen Methoden wie der zentralen Differenzenmethode der Verschiebungsvektor des nächsten Zeitschritts $\vec{x}_{t+\Delta t}$ explizit ausgedrückt. Dabei sind \tilde{M} die Massenmatrix, \tilde{C} die Dämpfungsmatrix, \tilde{K} die Steifigkeitsmatrix, \vec{F}_{ext} der Vektor der äußeren Kräfte, und \vec{x} der Verschiebungsvektor. Diese Methode hat einen kritischen Zeitschritt Δt_{krit} zur Folge, der für eine stabile Lösung nicht überschritten werden darf. Δt_{krit} ist abhängig von Schallgeschwindigkeit und Elementgröße. Durch die werkstoffabhängige Wahl der Elementgröße wird versucht ein Δt_{krit} von ca. $1 \cdot 10^{-6}$ s nicht zu unterschreiten [25, 35]. Einerseits kann so die Berechnungsdauer auf ein wirtschaftliches Maß begrenzt werden und andererseits werden Fehler der FE-Methoden über die Berechnungszyklen mitgetragen, wodurch die Anzahl der Zyklen beschränkt werden sollte.

4.1.2 Materialmodelle für Finite Elemente Methoden

Die Berechnung von \tilde{M} , \tilde{C} und \tilde{K} erfolgt anhand von Netzgeometrie und Materialparametern. Dabei kommen unterschiedliche Materialdefinitionen, (elastisch, elastoplastisch, viscoelastisch, etc.) zum Einsatz. Realitätsgetreue Berechnungen erfordern oft einen großen Aufwand, um aus Materialprüfungen genügend Parameter für die Materialdefinitionen abzuleiten. Speziell bei anisotropen oder dehnratenabhängigen Materialien ist das schwierig.

4.1.3 Elementformulierungen für Finite Elemente Methoden

Für die Crashberechnung werden allgemein Elemente mit linearen Ansatzfunktionen verwendet. Elemente höherer Ordnung würden die Berechnungsdauer erhöhen, ohne einen tatsächlichen Nutzen gegenüber einem entsprechend feineren Netz linearer Elemente zu bringen. Zum Einsatz kommen Stabelemente (2 Knoten), Schalenelemente (3 oder 4 Knoten), Solid-Elemente (4-8 Knoten) sowie diskrete Elemente (2 Knoten). Im Automobilbereich werden großteils Schalenelemente verwendet, da dünnwandige Strukturen vorherrschen. Solid-Elemente kommen bei der Crashberechnung beispielsweise zur Diskretisierung von Sitzschaum oder Dummyteilen zum Einsatz. Stabelemente werden beispielsweise als Verbindungselemente verwendet. Bei diskreten Elementen werden keine Materialeigenschaften definiert, sondern direkt die

Steifigkeits- und Dämpfungsbeziehungen zwischen zwei Knoten aufgeprägt. Sie werden vorwiegend als Feder-Dämpfer-Elemente eingesetzt [25].

Bei der Elementgröße muss zwischen der Auflösung der Deformationen und der Zeitschrittproblematik abgewogen werden. Gängige Modelle zur Crashberechnung weisen üblicherweise eine Elementgröße von 5 mm bis 10 mm und eine Elementanzahl bis zu 8 Millionen auf [21]. Eine Netzverfeinerung an kritischen Bereichen, wie bei impliziten Verfahren üblich, wird vermieden, da sich hier der Zeitschritt für das gesamte Modell verringern würde. Für einzelne Elemente, die dem gewünschten Zeitschritt nicht entsprechen, gibt es die Möglichkeiten, Masse oder Steifigkeit zu skalieren, um die Schallgeschwindigkeit im Element zu verändern. Dies sollte aber nur in einem sehr eingeschränkten Maß erfolgen.

4.1.4 Starrkörper

Neben den eigentlichen Finite Elemente Methoden ist auch die Simulation von Starrkörpern möglich. Ihre Bewegung wird durch Bewegungsgleichungen im Schwerpunkt berechnet. Der Trägheitstensor des Starrkörpers wird aufgrund von Dichte und Netzgeometrie ermittelt, und die Verschiebungsvektoren der Knotenpunkte werden vom Schwerpunkt aus berechnet. Starrkörpern können Bewegungen auch vorgegeben werden. Weiters werden sie eingesetzt, um einfache Gelenkverbindungen zu schaffen [10].

4.1.5 Kontakt

In einem Crashverlauf treten natürlich zahlreiche Kontakte zwischen einzelnen Bauteilen sowie zwischen Elementen desselben Bauteils auf. Es gibt verschiedene Kontaktformulierungen, wobei für die explizite Zeitintegration vor allem die Penalty-Methode von Bedeutung ist. Dabei werden bei einer Detektion von Kontakten zwischen den entsprechenden Knoten Federn definiert, die einer Durchdringung entgegenwirken. Die Berechnung dieser Federn kann wiederum den Zeitschritt beeinflussen oder zu Instabilitäten führen [25].

4.2 Insassenmodelle

Insassenmodelle bezeichnen kombinierte Modelle von Insassen und Fahrzeuginnenräumen. Oft sind das MKS-Modelle, die nur aus Sitz, Lenkrad, Airbag, Gurt und Dummy bestehen. Auf diese Weise sind Insassenmodelle sehr berechnungseffizient und eignen sich sehr gut für Variantenrechnungen [20]. Die Insassenmodelle, die in dieser Arbeit verwendet wurden, sind sehr detaillierte FE-Modelle, die alle relevanten Innenraumbauteile sowie einen Dummy beinhalten. Es wurden FE-Modelle verwendet, da viele Fragestellungen eine detaillierte physikalische Abbildung des Insassen erfordern, wie beispielsweise das Kontaktverhalten zwischen Sitz und Dummy. Die Modelle wurden in den Entwicklungsprozessen aktueller Fahrzeugmodelle eingesetzt und sind sehr gut validiert. Abbildung 5 beschreibt die Struktur solcher FE-Insassenmodelle.

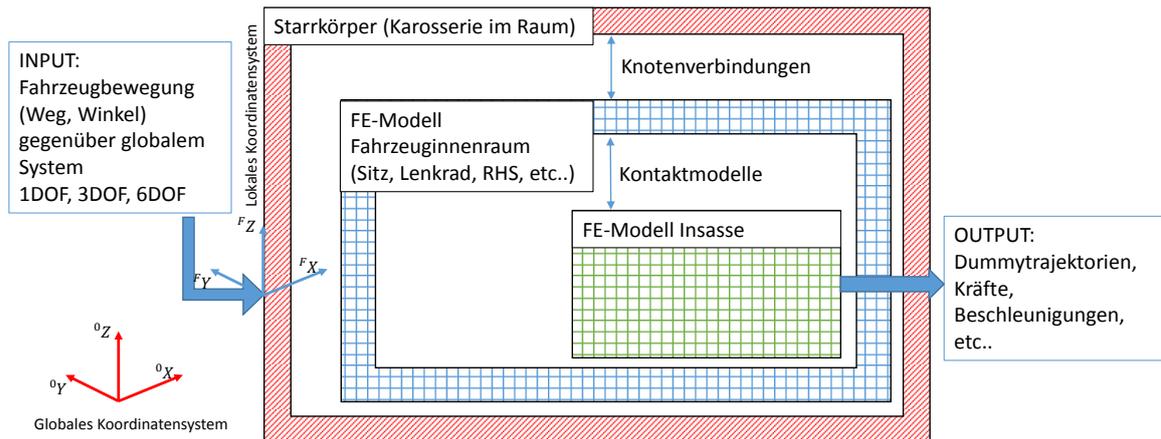


Abbildung 5 Struktur der verwendeten Finite Elemente - Fahrzeug-Dummy Modelle

Von zentraler Bedeutung sind die Dummymodelle. Diese werden mit großem Aufwand entwickelt und validiert, um dem realen Verhalten von Dummies zu entsprechen. Zum Einsatz kamen Dummies der Fa. FTSS [12].

Bei den Insassenmodellen unterliegen die Karosseriebleche, die den Fahrgastraum umgeben, einer Starrkörperdefinition. Diese Annahme ist für die meisten Frontalcrash-Lastfälle zulässig. Dem Starrkörper werden die Bewegungen eines realen Crashtests oder einer Struktursimulation aufgebracht.

Die Ausgabe der relevanten Zeitsignale erfolgt mit einer Rate von 10 kHz. Dabei handelt es sich unter anderem um Verläufe von Kräften, Beschleunigungen oder Verschiebungen zur Berechnung der Verletzungswerte sowie um wichtige Verläufe der Rückhaltesysteme (Airbagdruck, -volumen, Einschub der Lenksäule, Gurtkräfte, etc.). Weiters werden für eine visuelle Beurteilung Geometriedaten ausgegeben.

4.3 Definitionen der Fahrzeugbewegung

Die Abkürzung DOF (Degree of Freedom) beschreibt immer die Anzahl der Freiheitsgrade der Fahrzeugbewegung unter der Annahme einer Starrkörperbewegung (Fahrgastzelle). Die Bezeichnung 6DOF ist also äquivalent der Bewegung des Gesamtfahrzeugversuchs. 1DOF dagegen ist die Bewegung einer herkömmlichen Schlittenanlage.

Das globale, ortsfeste Inertialsystem wird als 0-System, das fahrzeugfeste System als F-System bezeichnet. Zum Zeitpunkt null sind die beiden Systeme deckungsgleich. Die Ausrichtung der Achsensysteme entspricht dem Design-Koordinatensystem. In diesem System zeigt die ${}^F X$ -Achse gegen die Fahrtrichtung, die ${}^F Y$ -Achse vom Fahrzeug aus gesehen nach rechts und die ${}^F Z$ -Achse nach oben. Der Koordinatenursprung befindet sich im Mittelpunkt der Vorderachse des Fahrzeuges (Abbildung 6).

Die Bewegungen der Videoauswertung werden in einem hallenfesten System angegeben. Die Drehvorschrift zur Definition der Lage des Fahrzeugs im Raum ist die Drehung um raumfeste Achsen, es wird also in der Reihenfolge ${}^0 X$ - ${}^0 Y$ - ${}^0 Z$ immer um die „alten“ raumfesten Achsen

gedreht. Bei manchen Bewegungsberechnungen wird aus praktischen Gründen in eine andere Konvention transformiert.

Bei Fahrzeugen werden die Rotationen um die lokalen Achsen üblicherweise als Rollen oder Wanken (${}^F X$), Nicken (${}^F Y$) und Gieren (${}^F Z$) bezeichnet. Für diese Arbeit werden im Allgemeinen die Drehungen um die Achsen ${}^0 X$, ${}^0 Y$ und ${}^0 Z$ entsprechend bezeichnet.

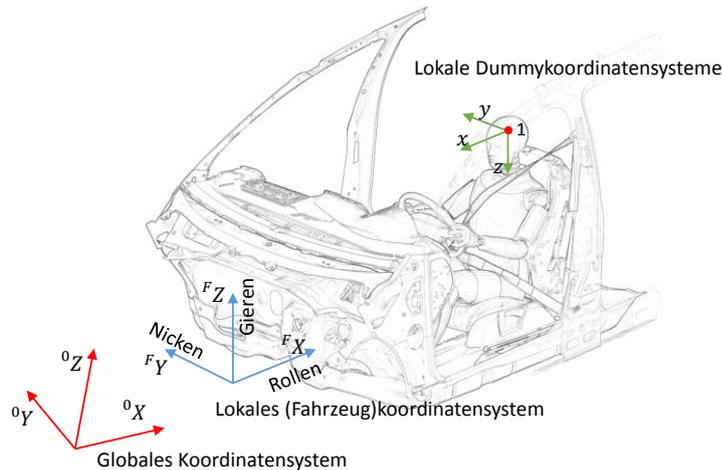


Abbildung 6 Übliche Bezeichnungen der Rotationen bei Fahrzeugen sowie Achsensysteme

Betrachtet man nur eine Teilbewegung (bsp. eine Rotation), ist diese Information nicht vollständig, da sich die Bewegung in einer Ebene definiert und zu einer Rotation die Momentandrehachse bekannt sein muss. Da diese bei Crashtests im Allgemeinen die Lage ändert, ist eine Reduktion der Freiheitsgrade zu einer ${}^0 X$ -Bewegung und einer Rotation nicht sinnvoll. Deshalb sind in dieser Arbeit immer die entsprechenden Translationen der jeweiligen Bewegungsebene impliziert. Das heißt „Nickbewegung“ meint die Rotation um ${}^0 Y$ sowie die Translation in ${}^0 Z$, und „Gierbewegung“ meint die Rotation um ${}^0 Z$ sowie die Translation in ${}^0 Y$. Die jeweilige zweite Translation dieser Bewegungsebenen ist ${}^0 X$, welche immer ausgeführt wird. Einen Spezialfall stellt Rollen dar, die entsprechenden Ebenentranslationen sind ${}^0 Y$ und ${}^0 Z$. Mit „Rollen“ ist zur Vereinfachung nur die Rotation um die ${}^0 X$ -Achse gemeint, diese Bewegung hat für diese Untersuchung aufgrund späterer Ergebnisse aber nur eine untergeordnete Rolle.

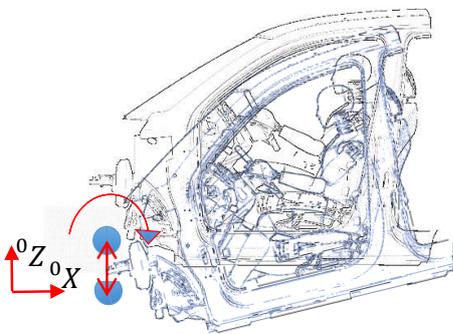


Abbildung 7 Definition der Nickbewegung in der ${}^0 X$ ${}^0 Z$ -Ebene

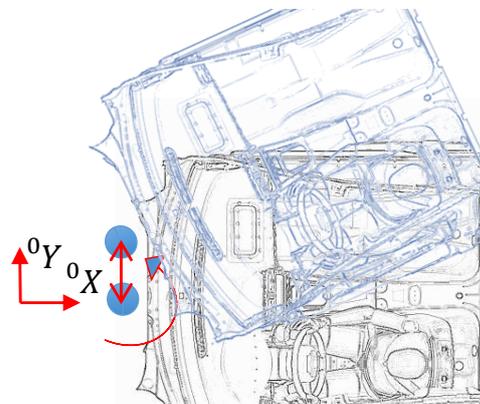


Abbildung 8 Definition der Gierbewegung in der ${}^0 X$ ${}^0 Y$ -Ebene

Die einzelnen Bewegungskomponenten werden wie in Tabelle 2 beschrieben bezeichnet:

Tabelle 2 Bezeichnungen von Bewegungskomponenten

Bewegungskomponente	Bezeichnungen	Einheit
Verschiebung eines Fahrzeugpunkts in 0X -Richtung beschrieben im globalen Koordinatensystem	dX	mm
Verschiebung eines Fahrzeugpunkts in 0Y -Richtung beschrieben im globalen Koordinatensystem	dY	mm
Verschiebung eines Fahrzeugpunkts in 0Z -Richtung beschrieben im globalen Koordinatensystem	dZ	mm
Erste Rotation je nach Drehkonvention (Rollen, Wanken)	rotX, ψ , α	rad oder $^\circ$
Zweite Rotation je nach Drehkonvention (Nicken)	rotY, φ , β	rad oder $^\circ$
Dritte Rotation je nach Drehkonvention (Gieren)	rotZ, κ , γ	rad oder $^\circ$

4.4 Definition von Systemen und Punkten der Dummies

Messungen am Dummy werden immer im lokalen Dummykoordinatensystem angegeben (nicht die Trajektorien), da sich die Messinstrumente bei realen Versuchen mitbewegen. Bei den Koordinatensystemen des Dummies orientiert sich die z-Achse entlang der Körperlängsachse von Kopf nach Fuß. Die y-Achse zeigt immer nach rechts [38], (Abbildung 6). Abbildung 9 zeigt weiters einige relevante Punkte eines Dummies.

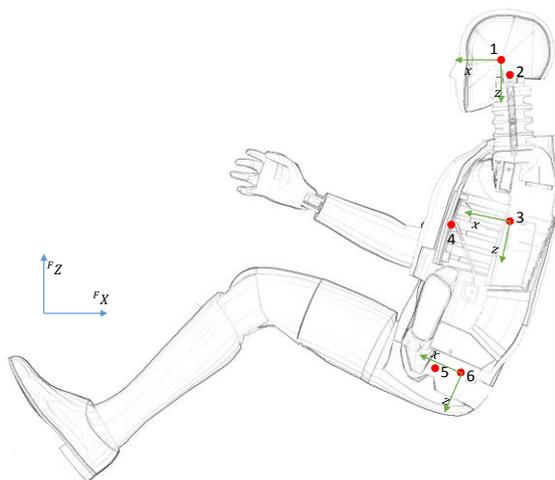


Abbildung 9 Definitionen von Koordinatensystemen und Punkten der Dummies

1. Position des Kopfbeschleunigungssensors. Beschleunigungen sowie Trajektorien des Kopfes beziehen sich auf diesen Punkt.
2. Position der Kraftmessdose im oberen Nackenbereich. Hier werden relevante Nackenkräfte gemessen. Kräfte in x- bzw. y-Richtung des dortigen Dummykoordinatensystems werden als Scherkräfte bezeichnet, Kräfte in z-Richtung werden als Zug- und Druckkräfte bezeichnet.
3. Position des Brustbeschleunigungssensors.
4. Position des Messpunktes der Brusteingdrückung.
5. H-Punkt (Hüftpunkt).

6. Position des Beckenbeschleunigungssensors. Beschleunigungen sowie Trajektorien des Beckens beziehen sich auf diesen Punkt.

4.5 Bewegungsberechnung

In diesem Abschnitt werden allgemeine Berechnungsroutinen vorgestellt, die Bewegungsdaten modifizieren und für Untersuchungen mittels FE-Analysen notwendig sind. Sie befassen sich mit Modifikationen für eine optimale Bewegungsdefinition im verwendeten FE-Solver und der Sperrung von Freiheitsgraden.

4.5.1 Konventionen

α, β, γ ...Kardanwinkel (Drehreihenfolge ${}^F X, {}^F Y, {}^F Z$)

ψ, φ, κ ...Winkel der Drehung um feste Raumachsen (Drehreihenfolge ${}^0 X, {}^0 Y, {}^0 Z$)

δ Drehwinkel bei Drehung um eine Gerade im Raum

\vec{v} ...Geschwindigkeit

$\vec{\omega}$...Winkelgeschwindigkeit

\vec{e} ...Einheitsvektor

s...Sinus

c...Cosinus

${}^F \vec{r}, {}^0 \vec{r}$...Ortsvektor im Fahrzeugkoordinatensystem, bzw. im globalen Koordinatensystem

Grundsätzlich gilt bei der Betrachtung von Starrkörperrotationen die Konvention der Drehung um feste Raumachsen. Die zugehörige Drehmatrix \tilde{R}_1 für die Gleichung

$${}^0 \vec{r} = \tilde{R}_1 \cdot {}^F \vec{r} \quad (4.1)$$

lautet [48]:

$$\tilde{R}_1 = \begin{bmatrix} c\varphi c\kappa & -c\psi s\kappa + s\psi s\varphi c\kappa & s\psi s\kappa + c\psi s\varphi c\kappa \\ c\varphi s\kappa & c\psi c\kappa + s\psi s\varphi s\kappa & -s\psi c\kappa + c\psi s\varphi s\kappa \\ -s\varphi & s\psi c\varphi & c\psi c\varphi \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Die invertierte Drehmatrix lautet:

$$\tilde{R}_1^{-1} = \begin{bmatrix} c\varphi c\kappa & c\varphi s\kappa & -s\varphi \\ -c\psi s\kappa + s\psi s\varphi c\kappa & c\psi c\kappa + s\psi s\varphi s\kappa & s\psi c\varphi \\ s\psi s\kappa + c\psi s\varphi c\kappa & -s\psi c\kappa + c\psi s\varphi s\kappa & c\psi c\varphi \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Die Drehmatrix für die Konvention der Kardanwinkel mit Drehreihenfolge x, y, z lautet [39]:

$$\tilde{R}_2 = \begin{bmatrix} c\beta c\gamma & -c\beta s\gamma & s\beta \\ c\alpha s\gamma + s\alpha s\beta c\gamma & c\alpha c\gamma - s\alpha s\beta s\gamma & -s\alpha c\beta \\ s\alpha s\gamma - c\alpha s\beta c\gamma & s\alpha c\gamma + c\alpha s\beta s\gamma & c\alpha c\beta \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Die Drehmatrix für die Drehung um eine Gerade im Raum der Form

$$\vec{n} = n_x \cdot \vec{e}_x + n_y \cdot \vec{e}_y + n_z \cdot \vec{e}_z \quad (4.5)$$

lautet [48]:

$$\tilde{R}_3 = \begin{bmatrix} c\delta + (1 - c\delta)n_x^2 & (1 - c\delta)n_x n_y - s\delta n_z & s\delta n_y + (1 - c\delta)n_x n_z \\ s\delta n_z + (1 - c\delta)n_x n_y & c\delta + (1 - c\delta)n_y^2 & (1 - c\delta)n_z n_y - s\delta n_x \\ (1 - c\delta)n_x n_z - s\delta n_y & s\delta n_x + (1 - c\delta)n_z n_y & c\delta + (1 - c\delta)n_z^2 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

4.5.2 Bewegungsmodifikationen für den FE-Solver

Bei der Aufbereitung von Bewegungsdaten für den verwendeten FE-Solver sind zwei Dinge zu beachten. Einerseits wird bei Vorgabe von Bewegungskurven zwischen den angegebenen Stützstellen linear interpoliert, und andererseits gibt es die Möglichkeit der Vorfilterung von Ausgabekurven.

Der Solver bietet die Möglichkeiten, eine Bewegung als Verschiebung bzw. Winkelveränderung, Geschwindigkeit bzw. Winkelgeschwindigkeit oder Beschleunigung bzw. Winkelbeschleunigung vorzugeben. Da eine möglichst genaue Abbildung der gemessenen räumlichen Verlagerungen sinnvoll ist, wird hauptsächlich die Vorgabe von Verschiebungen und Winkelveränderungen verwendet. Der Ortsvektor berechnet sich sonst durch Integrale der Vorgabe, was zu Fehlern führt. Die lineare Interpolation zwischen den Stützstellen der Bewegungsvorgabe bewirkt, dass zwischen den Stützstellen eine konstante Geschwindigkeit herrscht, und eine Geschwindigkeitsänderung nur in jenem Berechnungszeitschritt erfolgt, in dem das Geschwindigkeitslevel gewechselt wird. Beschleunigung entsteht also in einem Abschnitt einer Stützstellenweite nur in einem einzigen Zeitschritt. Die Beschleunigung ist hier genau um das Verhältnis $\frac{\Delta_s}{\Delta_i}$ höher als beim realen Crashtest, in allen anderen Zeitschritten ist sie null (siehe Abbildung 10). Dabei ist Δ_s das Zeitintervall zwischen den Stützstellen und Δ_i das aktuelle Berechnungszeitschrittintervall. Die Beschleunigungsspitzen können als Störfrequenz angesehen werden, die die numerischen Ergebnisse beeinflusst. Ist die Anregungsfrequenz groß genug, ist diese Störung in den Ausgabesignalen bei Verwendung des Vorfilters nicht sichtbar.

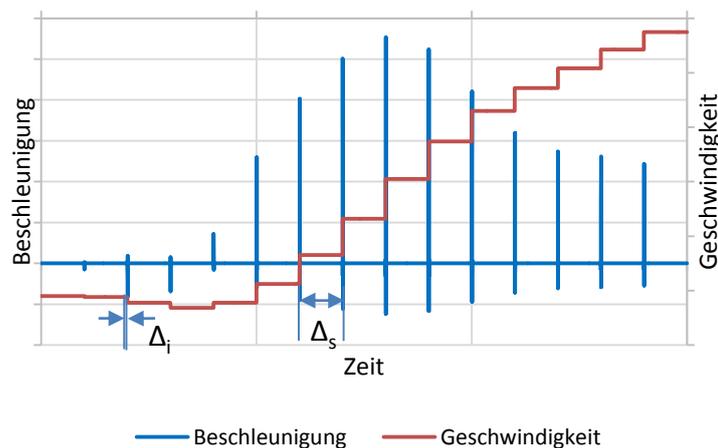


Abbildung 10 Beispielhafter Verlauf von Beschleunigung und Geschwindigkeit bei Wegvorgabe ohne Vorfilterung

Der standardmäßig verwendete Vorfilter ist ein Tiefpassfilter mit einer Grenzfrequenz von:

$$f_p = \frac{0,38}{2\Delta_0} \quad (4.7)$$

Dabei ist Δ_0 das Abtastzeitintervall für die Ausgabe von Verläufen. Dieses beträgt üblicherweise 0,1 ms. Die Grenzfrequenz beträgt demnach [10]:

$$f_p = 1,9 \text{ kHz} \quad (4.8)$$

Die Bewegungsbestimmung von Realcrashtests erfolgt durch Video-Vermessungsmethoden. Die Highspeedkameras werden mit einer Aufzeichnungsfrequenz von 1 kHz betrieben. Somit ergibt sich auch die Stützstellenweite der Bewegungsvorgabe von 1 ms. Diese Anregungsfrequenz ist deutlich geringer als die Grenzfrequenz des Tiefpassfilters. Diese kann zwar durch ein größeres Δ_0 verringert werden, das führt aber zu einem Informationsverlust und Aliasing.

Folgende Modifikationen wurden deshalb an den Bewegungsverläufen durchgeführt:

1. Filtern der Bewegungsverläufe mit der Filterklasse CFC60
2. Berechnung von Splines für die Bewegungsverläufe
3. Verringerung der Stützstellenweite auf 0,1 ms

Durch die begrenzte Auflösung der Crashtestvideos entstehen bei der Bewegungsberechnung Ungenauigkeiten im Pixelbereich. Ist der Fehler in einem Bild positiv und im nächsten negativ, entsteht ein kurzfristiger Beschleunigungssprung, der nicht der Realität entspricht. Das Filtern der Bewegungsverläufe glättet diese Beschleunigungssprünge.

Durch die Verringerung der Stützstellenweite der Bewegungsverläufe entsteht eine Anregungsfrequenz von 10 kHz, die nun größer ist als die Grenzfrequenz, nicht mehr im Durchgangsbereich liegt und so gefiltert wird (Abbildung 11). Bei einer Bewegungsvorgabe mit 1 kHz ist nicht nur die Anregungsfrequenz kleiner als die Grenzfrequenz, auch die durch das Filtern entstehenden Phasenverschiebungen sind nicht konsistent. Die Bewegungsvorgabe mit einer Stützstellenweite von 0,1 ms ist mit dem Solver weitgehend verträglich.

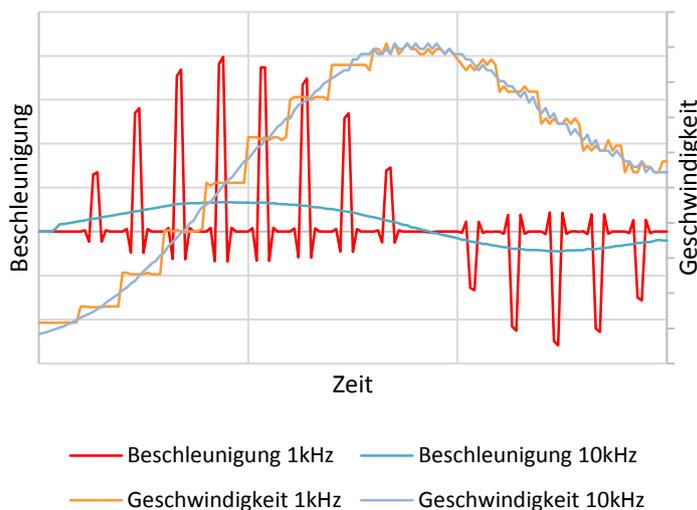


Abbildung 11 Vergleich von Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverläufen bei Ortsvorgabe mit 1 kHz bzw. 10 kHz und Verwendung des Vorfilters

4.5.3 Sperrung von Freiheitsgraden der Fahrzeugbewegung

Es gilt, im Falle von gesperrten Freiheitsgraden, die Umgebung des Dummys so gut wie möglich abzubilden. Daher ist es nicht ausreichend, beispielsweise für die Darstellung der reinen Nickbewegung die Drehungen rotX und rotZ sowie die Verschiebung dY im hallenfesten System zu null zu setzen. Um die tatsächliche Nickbewegung des Fahrzeugs zu finden, muss die gesamte Bewegung im fahrzeugfesten lokalen Koordinatensystem dargestellt werden.

Drei Freiheitsgrade der Fahrzeugbewegung: Nicken, Gieren

Um die Bewegung unabhängig von Drehreihenfolgen darzustellen, wird sie mithilfe eines translatorischen Geschwindigkeitsvektors und eines Winkelgeschwindigkeitsvektors beschrieben.

Zuerst werden die Drehungen um raumfeste Achsen auf Kardanwinkel umgerechnet. Dies erfolgt durch Koeffizientenvergleich der beiden Transformationsmatrizen (4.2) und (4.4).

Mit der neuen Beschreibung durch Kardanwinkel lässt sich der Winkelgeschwindigkeitsvektor im globalen System berechnen [54]:

$${}^0\vec{\omega} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & s\beta \\ 0 & c\alpha & -s\alpha c\beta \\ 0 & s\alpha & c\alpha c\beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Der Geschwindigkeitsvektor ist:

$${}^0\vec{v} = \begin{pmatrix} {}^0\dot{X} \\ {}^0\dot{Y} \\ {}^0\dot{Z} \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

Generell kann als fahrzeugfester Referenzpunkt zur Beschreibung der Geschwindigkeit der Koordinatenursprung herangezogen werden. Im Fall von großen Rollwinkeln kann aber beispielsweise der H-Punkt verwendet werden, um die Fahrzeugbewegung in der Nähe des Insassen zu beschreiben. Die beiden Vektoren ${}^0\vec{\omega}$ und ${}^0\vec{v}$ werden nun im lokalen Fahrzeugkoordinatensystem dargestellt. Dazu werden die Winkel um feste Achsen verwendet.

Für einen Vektor \vec{r} gilt:

$${}^F\vec{r} = \tilde{R}_1^{-1} \cdot {}^0\vec{r} \quad (4.11)$$

In der lokalen Betrachtung der Geschwindigkeitsvektoren lassen sich nun die Freiheitsgrade sperren.

Im Fall „Nicken“ gilt:

$${}^F\dot{\gamma} = {}^F\dot{\alpha} = {}^F\dot{\beta} = 0 \quad (4.12)$$

Im Fall „Gieren“ gilt:

$${}^F\dot{Z} = {}^F\dot{\alpha} = {}^F\dot{\beta} = 0 \quad (4.13)$$

Man erhält jeweils drei Freiheitsgrade, die „reines“ Nicken oder „reines“ Gieren beschreiben.

Der neue Winkelgeschwindigkeitsvektor hat nur mehr eine einzige Komponente (bezüglich 0Y oder 0Z) im globalen Koordinatensystem. Die Drehung reduziert sich zu einer Elementardrehung und die Beschreibung der Drehung um feste Achsen ist ident mit jener um Kardanwinkel. Auch die Darstellung im lokalen System ist natürlich ident mit jener im globalen System. Deswegen kann aus diesem Vektor durch Integration direkt der Verlauf der neuen Drehung berechnet werden.

Es muss nur der Geschwindigkeitsvektor in das globale Koordinatensystem transformiert werden. Die jeweilige Transformationsmatrix vereinfacht sich zu:

Nicken: Elementardrehung um die 0Y -Achse:

$$\tilde{R}_Y = \begin{bmatrix} c\beta & 0 & s\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\beta & 0 & c\beta \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Gieren: Elementardrehung um die 0Z -Achse:

$$\tilde{R}_Z = \begin{bmatrix} c\gamma & -s\gamma & 0 \\ s\gamma & c\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Im globalen System wird der Geschwindigkeitsvektor integriert, und man erhält mit der Integrationskonstante $C=0$ die neuen Verschiebungen des betrachteten Punktes.

Berechnung der Bewegung für nur einen Freiheitsgrad der Translation in 0X :

Bei den Simulationen mit nur einem Freiheitsgrad wird so vorgegangen wie bei den real durchgeführten Tests auf einer Schlittenanlage. Dabei wird bei einem Full-Scale-Crashtest mit linksseitiger Überdeckung die Beschleunigung beispielsweise am linken Schweller gemessen (hier treten höhere Beschleunigungen auf als rechts). Das FX -Signal dieses Sensors (Fahrzeuglängsrichtung) wird dann als gewünschter Beschleunigungsverlauf der Fahrzeugkarosserie beim Schlittentest herangezogen. Das heißt, dass dieses Signal im lokalen, fahrzeugfesten Koordinatensystem gemessen wird. Dieses Signal muss für die Simulation ausgehend von den Bewegungskurven des Ursprungs (Mittelpunkt Vorderachse) berechnet werden.

Um die Bewegung der Sensorposition zu berechnen wird der im lokalen Fahrzeugkoordinatensystem konstante Ortsvektor ins globale System transformiert:

$${}^0\vec{r}_{SENS} = \tilde{R}_1 \cdot {}^F\vec{r}_{SENS} \quad (4.16)$$

Durch zweimaliges Ableiten des Ortsvektors erhält man den Beschleunigungsvektor des Sensorpunktes im globalen System. Dieser muss im lokalen System dargestellt werden, um die richtige lokale FX -Komponente zu erhalten.

$${}^F\vec{a}_{SENS} = \tilde{R}_1^{-1} \cdot {}^0\vec{a}_{SENS} \quad (4.17)$$

Vom so erhaltenen lokalen Beschleunigungsvektor wird die FX -Komponente direkt auf das numerische Modell aufgegeben.

4.6 Definition der Abbildungsgüte

Dieser Abschnitt geht darauf ein, wie der Unterschied zwischen einem Gesamtfahrzeugversuch und einem Schlittenanlagenversuch im Hinblick auf die resultierende Insassenbelastung und Insassenkinematik gemessen werden kann. Bei jeder Einrichtung zur Abbildung eines Crashtests muss im Allgemeinen eine Abweichung der Ergebnisse zum Originalresultat in Kauf genommen werden. Sind die Abweichungen zwischen Dummysignalen bzw. der resultierenden Dummykinematik von Realcrashtests und Dummysignalen von zukünftigen Schlittenversuchen gering, wird das nachfolgend als „gute Abbildung von Versuchen“ bezeichnet.

Relevante Entwicklungskriterien in der Insassenschutz-Entwicklung sind die Minimierung von Insassenbelastungen sowie geometrische Faktoren (Dummytrajektorien, Restabstände). Anhand dieser Kriterien wird sichergestellt, dass auch bei Unfallkonstellationen, die von den standardisierten Tests in gewissen Grenzen abweichen, keine ungewollten harten Kontakte zwischen Innenraum und Fahrzeuginsassen auftreten.

Dummybelastungen werden in Form von biomechanischen Vergleichsgrößen mithilfe von Messsignalen des Dummys berechnet. Eine gute Abbildung ist nicht dadurch gekennzeichnet, dass die errechneten Verletzungswerte gleich groß sind, was auch zufällig passieren kann. Vielmehr sollten sich die Verläufe der relevanten Messsignale gleichen. Natürlich ist aber die Ähnlichkeit der Verläufe in Bereichen hoher Belastung wichtiger als in Bereichen niedriger Belastung.

Zur Beurteilung „geometrischer“ Faktoren werden Trajektorien einzelner Dummypunkte in das lokale Fahrzeugkoordinatensystem transformiert. Sind diese lokalen Trajektorien nahezu gleich, so ist die Bewegung des Insassen im Fahrzeuginnenraum zu jedem Zeitpunkt gleich. Durch die Betrachtung in einem lokalen System bedeutet das nicht, dass die Belastungen gleich sein müssen. Wenngleich resultierende Kräfte und Trajektorien in Zusammenhang stehen, können schon geringe Trajektorienabweichungen auf kurzzeitige, große Kraftdifferenzen zurückzuführen sein, die die Dummybelastung maßgeblich verändern. Bei kritischen Abständen wird der Verlauf des Abstands der Körper- und Bauteilkonturen in einem Postprozessor gemessen. Das kann Vorteile haben, wenn sich die Lage des Insassen verglichen zum Abstand deutlich ändern kann. Beispielsweise kann der Restabstand zwischen Kopfkontur und Lenkrad gleich sein, durch eine andere Kopflage die Trajektorie des Kopf-Schwerpunktes aber deutlich abweichen (Abbildung 12).

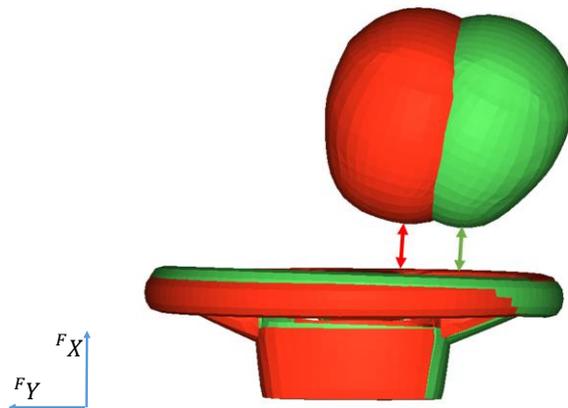


Abbildung 12 Beispiel gleichen Abstandes zwischen Kopfkontur und Lenkrad bei deutlich unterschiedlichen Kopftrajektorien

Beim Abstand zwischen Kopfkontur und Lenkrad wurde der Abstand zu der Fläche gemessen, die vom Lenkradkranz aufgespannt wird. Die Fläche wurde vernetzt und mit Materialparametern versehen, die eine Verwindung bei Lenkraddeformation zulassen und das Verhalten des Lenkrades nicht beeinflussen. Bei anderen Abständen (Sonnenblende, Tür, etc.) wurden die Bauteilkonturen selbst herangezogen. Der verwendete Postprozessor berechnet automatisch, welche Knoten von Körperteil und dem entsprechenden Innenraumbauteil den aktuellen Minimalabstand bilden und misst diesen.

Die Beurteilung der Abbildung erfolgt einerseits subjektiv, also durch Gegenüberstellung der Verläufe sowie Maximalwerte und andererseits objektiv durch numerische Analyse der Korrelation mithilfe der Software „CORA“ von PDB [14]. Beide Methoden sind für ein umfassendes Verständnis der Abbildungsgüte notwendig. Aussagen ohne Interpretationsspielraum sind speziell in Bereichen wichtig, in denen es um kleine Verbesserungen geht. Auch kann nur so der Überblick über eine Vielzahl von Lastfällen und deren Varianten gewahrt werden. Bei numerischen Methoden sind aber auch Risiken gegeben, wichtige Zusammenhänge falsch zu interpretieren. Deshalb ist es wichtig, auch eine subjektive Einschätzung zu treffen. Beispiele für eine nicht ausreichende Bewertung durch CORA können das Auftreten großer Differenzen zwischen den Einzelbewertungen oder ungünstige Signalverläufe sein, die vom Bewertungsverfahren falsch interpretiert werden (Kapitel 4.6.2).

4.6.1 Subjektive Beurteilung

Folgende Verläufe sowie deren Maximalwerte wurden für eine subjektive Beurteilung der Abbildungsgüte herangezogen (Tabelle 3).

Tabelle 3 Verläufe und Verletzungswerte für die subjektive Beurteilung von Insassenbelastungen

Messstelle	Einheit	Verletzungswert
Kopfbeschleunigung i. R. x	g	-
Kopfbeschleunigung i. R. y	g	-
Kopfbeschleunigung i. R. z	g	-
Kopfbeschleunigung resultierend	g	HIC15, HIC36
Nacken Zugkraft i. R. z	kN	Maximalkraft, NIJ
Nacken Scherkraft i. R. x	kN	Maximalkraft, NIJ
Nacken Moment i. R. y	Nm	Maximalmoment, NIJ
Brusteindrückung	mm	Maximalwert
Brustbeschleunigung resultierend	g	a3ms-Wert
Beckenbeschleunigung resultierend	g	-
Oberschenkelkraft links	kN	Maximalkraft
Oberschenkelkraft rechts	kN	Maximalkraft
Unterschenkelkraft links	kN	Maximalkraft
Unterschenkelkraft rechts	kN	Maximalkraft
Schultergurtkraft	kN	-
Beckengurtkraft	kN	-

Für geometrische Betrachtungen wurden folgende Verläufe betrachtet (Tabelle 4).

Tabelle 4 Verläufe für die subjektive Beurteilung der Insassenkinematik

Verlauf	Einheit
$^F X$ -Koordinate Kopf im lokalen Koordinatensystem	mm
$^F Y$ -Koordinate Kopf im lokalen Koordinatensystem	mm
$^F Z$ -Koordinate Kopf im lokalen Koordinatensystem	mm
$^F X$ -Koordinate Becken im lokalen Koordinatensystem	mm
$^F Y$ -Koordinate Becken im lokalen Koordinatensystem	mm
$^F Z$ -Koordinate Becken im lokalen Koordinatensystem	mm
Abstand Kopf - Lenkrad (Ebene des Lenkradkranzes)	mm
Abstand Kopf - Sonnenblende	mm
ggf. Abstand Kopf - A-Säule	mm
ggf. Abstand Kopf - Fahrertür	mm

Die angeführten Verläufe wurden aufgrund der Relevanz für die Entwicklung ausgewählt. Die Betrachtung von Messstellen über den gesamten Körper des Dummies verteilt garantiert, dass nicht nur punktuelle Abbildungen bewertet werden. Die subjektive Beurteilung erfolgte immer durch Vergleich mehrerer Verläufe mit dem Referenzverlauf, wodurch verschiedene Varianten gereiht werden können.

4.6.2 Objektive Beurteilung

Die Bestimmung einer Ähnlichkeit zwischen zwei Zeitsignalen ist eine Fragestellung vieler technischer Bereiche. Die Anforderungen an eine solche Bestimmung variieren je nach Einsatzgebiet. Bezogen auf Dummiesignale wurden publizierte Verfahren meist dazu entwickelt, Dummyversuche und PMHS-Versuche zu vergleichen, um so das Verhalten von Dummies jenem

von Menschen anzunähern. Die Norm ISO TR 9790 [18] regelt die Bestimmung einer Ähnlichkeit zwischen Dummyversuchen und PMHS-Versuchen für den Seitenanprall. Weitere Ansätze gibt es beispielsweise von Rhule et al. [37] oder Nusholtz et. al. [30]. Diese Ansätze verwenden Korridorverfahren bzw. Korrelationsmethoden für die Berechnung der Ähnlichkeit zwischen Messkurven. Bei Korridorverfahren wird um das Referenzsignal ein Korridor gelegt. Je nach Position des Vergleichssignales in diesem Korridor wird eine Bewertung berechnet. Bei Korrelationsverfahren werden Größe (Kurvenintegral), Form und Phase (Zeitversatz) beurteilt [30]. Jede Methode hat dabei Vor- und Nachteile. Ein gängiges Problem stellen beispielsweise Phasenverschiebungen der zu vergleichenden Signale dar. Diese verändern die Verletzungswerte nicht, führen aber dazu, dass für eine Beurteilung die Werte verschiedener Zeitpunkte verglichen werden müssten. Insbesondere Rhule et. al. [37] behandeln dieses Problem. Die Form einer Kurve entscheidet darüber, welche Methode für die Beurteilung am besten geeignet ist.

Korrelationsanalysen mithilfe der Software CORA [14] basieren auf beiden Verfahren. Die Berechnung des Korrelationswertes einzelner Verfahren kann vom Benutzer gesteuert werden. Ebenso kann die Gewichtung der unterschiedlichen Verfahren sowie die Definition des Evaluierungsintervalls frei gewählt werden. Die Berechnung der Korrelationswerte ist also vom Benutzer abhängig und eine allgemeingültige Aussage kann nicht getroffen werden. Bei gleichbleibenden Parametern können aber vergleichende Aussagen getroffen werden.

Für jedes Paar von Kurven wird ein Wert zwischen null und eins berechnet. Null bedeutet, dass die beiden Verläufe nicht korrelieren. Eins bedeutet, dass die Verläufe im Evaluierungsintervall sehr gut korrelieren, also fast deckungsgleich sind. Die Verfahren, wie im Programm CORA verwendet, werden kurz beschrieben.

Korridorverfahren:

Bei diesem Verfahren werden ein äußerer sowie ein innerer Korridor um das Referenzsignal gelegt. Liegt ein Datenpunkt der Vergleichskurve innerhalb des inneren Korridors (grüner Korridor in Abbildung 13), erhält er den Wert eins. Liegt er außerhalb des äußeren Korridors, erhält er den Wert null. Dazwischen wird anhand einer Potenzfunktion interpoliert, deren Grad der Benutzer festlegen kann. Dieser Vorgang wird für alle Wertepaare innerhalb des festgelegten Evaluierungsintervalls wiederholt. Die berechneten Bewertungen werden über das Evaluierungsintervall gemittelt. Auch Breite und Verlauf der Korridore können vom Benutzer beeinflusst werden. Mit der Referenzkurve $x(t)$, der Vergleichskurve $y(t)$, dem inneren Korridor $\delta_i(t)$, dem äußeren Korridor $\delta_o(t)$ (vgl. Abbildung 13) und der Konstante k gilt für die Bewertung C [45]:

$$c_j = \begin{cases} 1 & |y(t_j) - x(t_j)| < \delta_i(t_j) \\ \left(\frac{\delta_o(t_j) - |y(t_j) - x(t_j)|}{\delta_o(t_j) - \delta_i(t_j)} \right)^k & \delta_i(t_j) < |y(t_j) - x(t_j)| < \delta_o(t_j) \\ 0 & |y(t_j) - x(t_j)| > \delta_o(t_j) \end{cases} \quad (4.18)$$

$$C = \frac{\sum_{j=1}^n c_j}{n}; 0 \leq C \leq 1; k \geq 1 \quad (4.19)$$

Das Korridorverfahren hat den Nachteil, dass Vergleichskurven eine gute Bewertung erhalten können, obwohl sie eine abweichende Form haben, solange ein Großteil innerhalb des äußeren

Korridors liegt. Andererseits können bei starken Steigungen der Referenzkurve und kleinem Zeitversatz der Vergleichskurve die Bewertungen zu gering ausfallen.

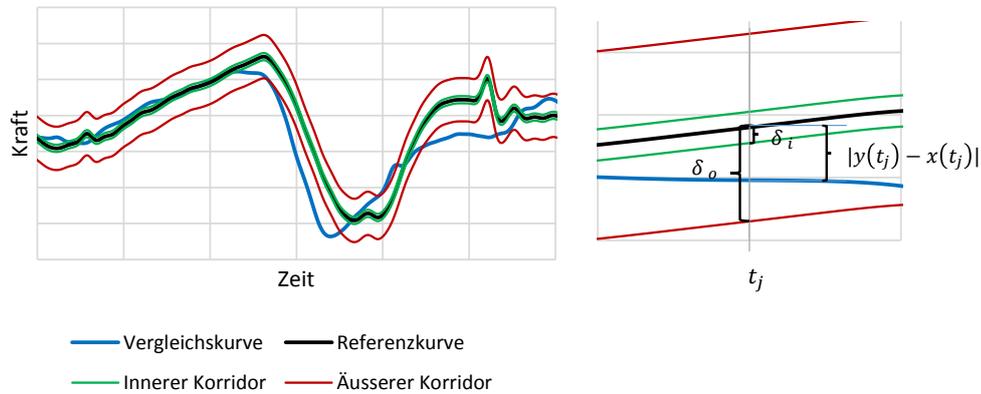


Abbildung 13 Beispiel für eine schlechte Bewertung einer Kurvenabbildung durch Phasenverschiebung (Bewertung=0,544) und Beschreibung des Korridorverfahrens

Der in Abbildung 13 gezeigte Vergleich zwischen zwei Verläufen einer Oberschenkelkraft ergibt einen durch das Korridorverfahren berechneten geringen Abbildungswert von 0,544, obwohl durch die Kurvenform und den Maximalwert ähnliche Verletzungen hervorgerufen werden. Durch die Phasenverschiebung fällt aber die Vergleichskurve im Bereich großer Anstiege schnell aus dem Korridor heraus.

Kreuzkorrelationsverfahren

Die Kreuzkorrelationsanalyse ist auf drei Bewertungen aufgeteilt. Mit dem Kreuzkorrelationskoeffizienten kann die Verlaufsform unabhängig vom Zeitversatz beurteilt werden. Der Zeitversatz kann berechnet werden und bildet die zweite Teilbewertung. Die dritte Teilbewertung entsteht aus dem Vergleich der Kurvenflächen. Der Kreuzkorrelationskoeffizient K wird für mehrere zeitliche Verschiebungen der Vergleichskurve berechnet, wobei die Verschiebung δ ist dem maximalen K zugeordnet. δ ist ein Vielfaches von Δt mit dem Faktor m_0 .

$$\delta = m_0 \cdot \Delta t \quad (4.20)$$

Für jedes m gilt [45]:

$$K_{xy}(m) = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} x(t_{min}+(m+i)\cdot\Delta t) \cdot y(t_{min}+i\cdot\Delta t)}{\sqrt{(\sum_{i=0}^{n-1} x^2(t_{min}+(m+i)\cdot\Delta t) \cdot \sum_{i=0}^{n-1} y^2(t_{min}+i\cdot\Delta t))}} \quad \text{mit } -1 \leq K_{xy} \leq 1 \quad (4.21)$$

$$K = K_{xy}(m_0) = \max(K_{xy}(m)) \quad (4.22)$$

Mit K und der benutzerdefinierten Konstante k_v berechnet sich die Verlaufsbeurteilung V zu [45]:

$$V = \left(\frac{1}{2}(K + 1)\right)^{k_v} \quad (4.23)$$

Für die Bewertung der Phasenverschiebung P wird mit δ_{min} und δ_{max} ein zeitlicher Bewertungskorridor definiert. Mit der benutzerdefinierten Konstante k_p und der zeitlichen Verschiebung δ gilt [45]:

$$P = \begin{cases} 1 \\ \left(\frac{|\delta_{max} - |\delta||}{\delta_{max} - \delta_{min}} \right)^{k_p} \\ 0 \end{cases} \text{ wenn } \begin{cases} |\delta| < \delta_{min} \\ \delta_{min} < |\delta| < \delta_{max} \\ |\delta| > \delta_{max} \end{cases} \quad (4.24)$$

Mit den Quadratsummen von Referenzkurve und Vergleichskurve sowie der benutzerdefinierten Konstante k_G berechnet sich die die Größenbewertung G [45]:

$$G = \left(\frac{\sum_{i=1}^n x^2(t_{min} + i \cdot \Delta t)}{\sum_{i=1}^n y^2(t_{min} + \delta + i \cdot \Delta t)} \right)^{k_G} \quad (4.25)$$

Auch die Kreuzkorrelation hat Nachteile. Zum einen ist sie sehr empfindlich gegenüber Oberschwingungen. Das bedeutet, dass die Kurven stark gefiltert werden müssen. Hier wurde generell die Filterklasse CFC180 [38] verwendet. Verläufe mit geringer Dynamik (z.B. Trajektorien-signale) erzielen immer eine sehr gute Bewertung der Verlaufsform. Der Zeitversatz kann dann nicht mehr gut bestimmt werden. Bei den Vergleichen der Flächen unter den Kurven wird eine Quadratur eingeführt, um zu verhindern, dass periodische Signale einen Flächenwert von null erhalten. Dadurch werden Flächen unterhalb der x-Achse positiv gezählt und eine stark abweichende Kurve kann eine gute Bewertung erhalten.

Auswahl der Berechnungsparameter für Frontalcrash

Die Charakteristiken jedes einzelnen Signals müssen berücksichtigt werden, um eine sinnvolle Bewertung zu erhalten. Die Parameter der Evaluierungsmethoden (Gewichtungsfaktoren der einzelnen Bewertungsverfahren, Korridorbreiten, Evaluierungsintervalle und die Berechnungsfunktion der Bewertung aus dem Ergebnis der Bewertungsverfahren) müssen für jedes Signal bestmöglich angepasst werden. Die Parameter $k, k_v, k_p, k_G, \delta_i, \delta_o, \delta_{min}$ und δ_{max} wurden so gewählt, dass beim Vergleich zwischen Versuchskinematiken mit sechs Freiheitsgraden und Schlittenversuchen mit einem Freiheitsgrad für den Lastfall EuroNCAP (bei dem der Schlittenversuch den Realcrashtest sehr schlecht abbildet) die Verläufe einen Wert um 0,5 erhalten. Abbildung 14 zeigt Beispiele für eine gute (0,866) und eine schlechte (0,566) Korrelation zwischen Original- und Vergleichssignal. Die relativen Abweichungen der Maximalwerte liegen bei 6 % bzw. 40 %. Maximalfehler korrelieren nicht notwendiger Weise mit dem Abbildungswert.

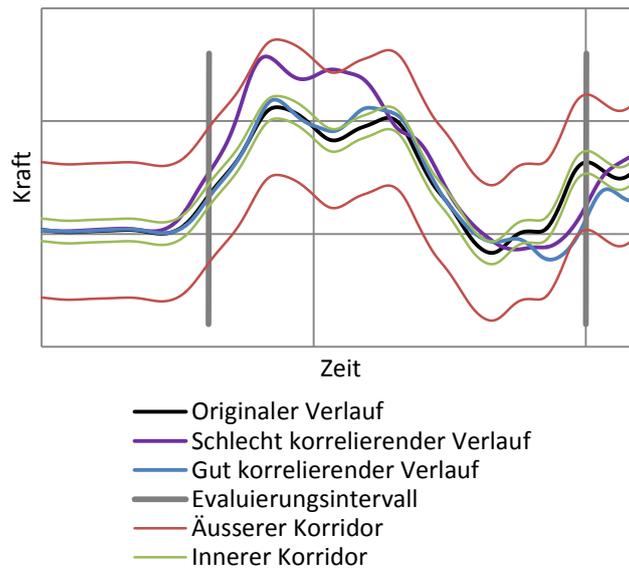


Abbildung 14 Beispiel für gute (0,866) und schlechte (0,566) Korrelationen von Dummysignalen unter Berücksichtigung von (4.20) – (4.25) und Wahl von Gewichten und Werten der Einzelverfahren

Aus den Einzelbewertungen wird ein Gesamtwert berechnet, der die Güte der Abbildung eines Gesamtfahrzeugversuchs beschreibt. Es werden aber immer zwei Abbildungswerte angegeben, wobei ein Wert die Abbildung von Dummybelastungen und der andere die Abbildung von Trajektorien beschreibt. Für die objektive Bewertung wurden folgende Verläufe herangezogen und gewichtet (Tabelle 5).

Tabelle 5 Verläufe für die objektive Beurteilung von Insassenbelastungen und der Kinematik

Korrelation	Dummysignal	Einheit	Gewicht
Dummybelastung	Resultierende Kopfbeschleunigung	[g]	0,2
	Nackenzugkraft z	[kN]	0,1
	Nackenscherkraft x	[kN]	0,1
	Nackenumoment y	[Nm]	0,1
	Brusteindrückung	[mm]	0,15
	Resultierende Brustbeschleunigung	[g]	0,15
	Femurkraft links	[kN]	0,1
	Femurkraft rechts	[kN]	0,1
Dummykinematik	Kopfposition F_X	[mm]	0,167
	Kopfposition F_Y	[mm]	0,167
	Kopfposition F_Z	[mm]	0,167
	Beckenposition F_X	[mm]	0,167
	Beckenposition F_Y	[mm]	0,167
	Beckenposition F_Z	[mm]	0,167

Diese Auswahl ermöglicht eine automatisierte Berechnung bei Verwendung eines Dummymodells, ungeachtet vom restlichen Fahrzeugmodell. Für die Durchgängigkeit der Bewertungen bei unterschiedlichen Modellen und Lastfällen wurde somit auf die Betrachtung von Gurt- und Abstandsverläufen verzichtet.

4.6.3 Zusammenführung subjektiver und objektiver Beurteilungen

Die objektive Beurteilungsmethode einer Abbildungsgüte ergibt Korrelationswerte. Eine subjektive Beurteilung dagegen kann nicht auf einer Verhältnisskala definiert werden. Aus diesem Grund werden in den meisten Fällen, wo sich die subjektive Einschätzung mit der objektiven Beurteilung deckt, nur die Korrelationswerte der objektiven Beurteilung herangezogen. Bei Abweichungen der beiden Herangehensweisen wird explizit darauf hingewiesen.

5 Abbildung von Gesamtfahrzeugversuchen auf Schlittenanlagen mit verschiedenen Bewegungskomponenten

Dieses Kapitel beschreibt die Entstehung von Bewegungsanteilen bei Frontalcrashtests, ihre Auswirkungen auf die Insassen im Vergleich zu Schlittenanlagen mit einem Freiheitsgrad sowie das Potential komplexerer Anlagen. Es wird vorausgesetzt, dass die Vorgabebewegungen von einer Anlage perfekt umgesetzt werden können.

5.1 Kategorisierung von Crashversuchen basierend auf Bewegungsanalysen

Dieser Abschnitt geht auf die Entstehung sowie auf mögliche Spannweiten der Bewegungen verschiedener Fahrzeuge bei unterschiedlichen Frontal-Crashtests ein. Das führt zu einer Abschätzung, bei welchen Lastfällen bestimmte Bewegungskomponenten verstärkt auftreten und wie groß diese werden können.

5.1.1 Untersuchte Lastfälle

Es wurden die Anforderungen für den europäischen Markt sowie für den US-Markt zugrunde gelegt. Die gesetzlichen Anforderungen für den Frontalunfall für Personenkraftwagen sind in Europa in der ECE-R94 festgelegt [47]. Die Testkonfiguration ist ein Frontalanprall gegen eine deformierbare Barriere mit einer Überdeckung von 40 % und einer Anprallgeschwindigkeit von 56 km/h. Dieser Test wurde für die Betrachtungen nicht berücksichtigt, da der Verbraucherschutztest nach EuroNCAP in derselben Konfiguration, aber mit einer höheren Geschwindigkeit (64 km/h) durchgeführt wird [1]. Auch einige Lastfälle der Gesetzgebung in den USA können durch dort durchgeführte Verbraucherschutztests gut abgedeckt werden. Eine Besonderheit stellen aber Tests dar, die ohne Gurt durchgeführt werden. Dabei handelt es sich um eine Konfiguration, bei der das Fahrzeug mit 40 km/h gegen eine starre Barriere mit voller Überdeckung trifft sowie eine Konfiguration mit einer um 30° schräg zur Anfahrriichtung gestellten Barriere. Diese Tests werden in dieser Arbeit behandelt und als FMVSS 208 0° bzw. FMVSS 208 30° bezeichnet [46]. Der USNCAP-Test wird mit einer starren Barriere, voller Überdeckung und einer Ausgangsgeschwindigkeit von 56 km/h ausgeführt [27]. Ein weiterer relevanter Crashtest wird seit kurzem von IIHS durchgeführt. Der Small Overlap Test wird mit einer starren Barriere mit nur 25 % Überdeckung und einer Ausgangsgeschwindigkeit von 64 km/h durchgeführt [17, 41]. Die vorgeschriebenen Testprozeduren umfassen auch Dummies und Konfigurationen, die nicht berücksichtigt wurden. In dieser Arbeit untersuchte Lastfälle sind in Abbildung 15 dargestellt.

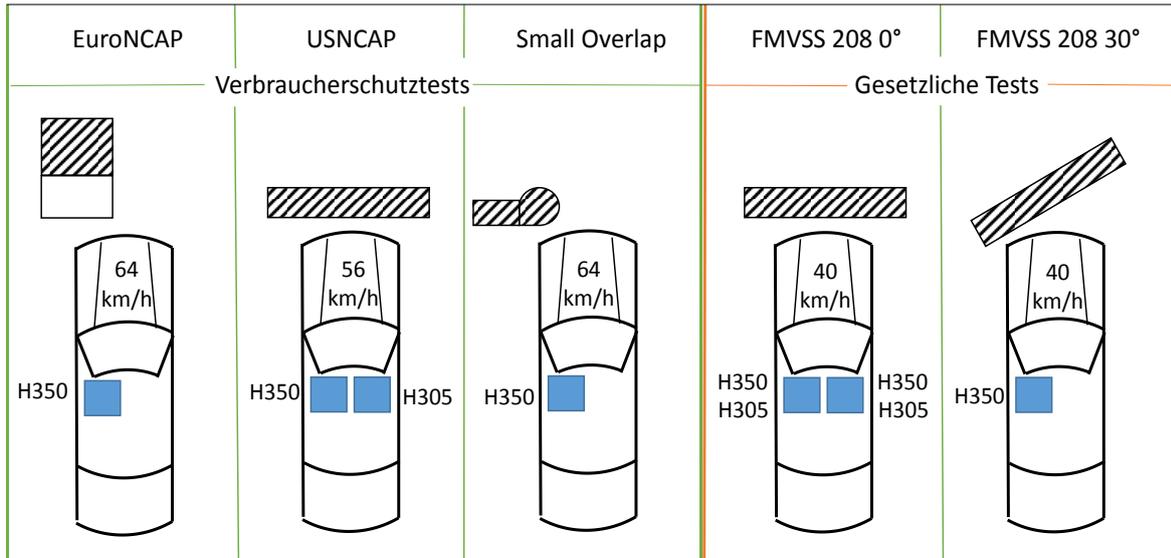


Abbildung 15 Betrachtete Frontal-Crashtest-Konfigurationen

In Tabelle 6 sind die Ausgangsgeschwindigkeiten, Eigenschaften der Barrieren sowie die Verwendung von Sicherheitsgurten für die betrachteten Lastfälle zusammengefasst.

Tabelle 6 Betrachtete Frontalcrash-Lastfälle

Crashtest	v_0	Überdeckung	Anprallwinkel	Gurt	Barriere
EuroNCAP	64 km/h	40 %	0°	ja	ODB
USNCAP	56 km/h	100 %	0°	ja	starr
FMVSS 208 0°	40 km/h	100 %	0°	nein	starr
FMVSS 208 30°	40 km/h	100 %	30°	nein	starr
Small Overlap	64 km/h	25 %	0°	ja	starr

5.1.2 Entstehung von Bewegungskomponenten

Bei allen Crashtest-Konfigurationen entsteht neben der Longitudinalbeschleunigung, je nach Fahrzeugaufbau, eine Nickbewegung. Während bei symmetrischen Lastfällen die durch asymmetrische Fahrzeugbauweise (z.B. Motor-Getriebeeinheit) entstehenden Gier- und Rollbewegungen sehr klein sind, können sie bei asymmetrischen Lastfällen groß werden.

Entstehung der Nickbewegung

Die Nickbewegung der Fahrgastzelle kann auf zwei Haupteffekte zurückgeführt werden:

1. Vertikaler Abstand zwischen Fahrzeugschwerpunkt und Kraftangriffspunkt am Fahrzeug (Abbildung 16).
2. Einknicken der vorderen Längsträger in s-förmigen Bereichen (Abbildung 17) [8].

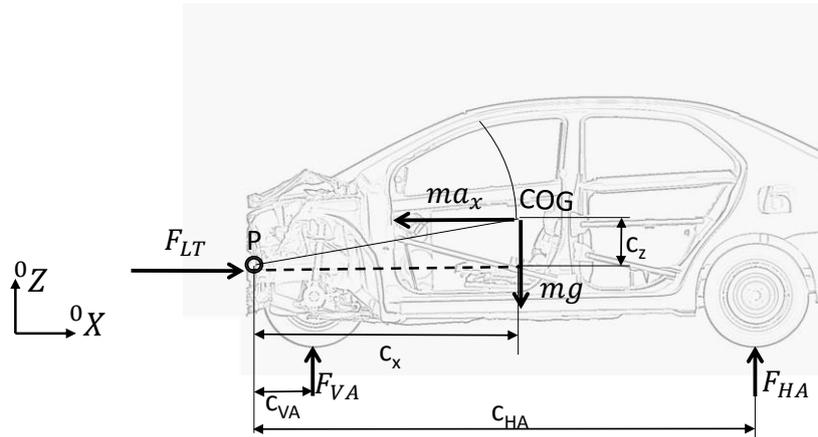


Abbildung 16 Kräfte am Fahrzeug in der Nickebene, Simulation des veröffentlichten Toyota Yaris FE-Modells [26, 52]

Ist der Fahrzeugschwerpunkt höher als der Kraftangriffspunkt an der Barriere, entsteht ein Moment um die 0Y -Achse, das proportional zur Verzögerung ist. Für den Beginn einer Rotation um den Punkt P gilt unter der Annahme vernachlässigbarer Horizontalreifenkräfte:

$$I_P \dot{\omega} = -ma_x c_z + mgc_x - F_{VA}c_{VA} - F_{HA}c_{HA} \quad (5.1)$$

Für $c_z=0$ ist das Momentengleichgewicht gegeben und es tritt keine Drehung ein. In der Literatur werden Schwerpunktshöhen für verschiedene Fahrzeugmodelle angegeben [6, 13]. Diese liegen zwischen 500 mm und 560 mm über der Fahrbahn bei Kompaktfahrzeugen. SUVs dagegen haben Schwerpunktshöhen bis zu 700 mm.

Die Höhe des Kraftangriffspunktes hängt natürlich von der Bauart des Fahrzeuges ab. Mit der Einführung des RCAR Bumper Tests [36] orientieren sich die Fahrzeughersteller mit der Höhe der Längsträger aber an dieser einheitlichen Teststoßfängerhöhe. Diese Versuchsstoßstange befindet sich an der Unterseite 455 mm über der Fahrbahn und ist 100 mm hoch. Damit befindet sich der Kraftangriffspunkt bei Kompaktfahrzeugen in derselben Höhe wie der Schwerpunkt und der entsprechende Effekt zur Erzeugung der Nickbewegung ist hinfällig. Lediglich bei SUVs hat er, bedingt durch das Fahrzeugkonzept, einen signifikanten Einfluss.

Der zweite Effekt betrifft das Deformationsverhalten der Crashstrukturen im Fahrzeug. Um die großen Longitudinalkräfte auf den Fahrgastraum zu übertragen, werden die Längsträger zwischen Vorderachse und Spritzwand gekröpft und unter den Fahrgastraum gezogen.

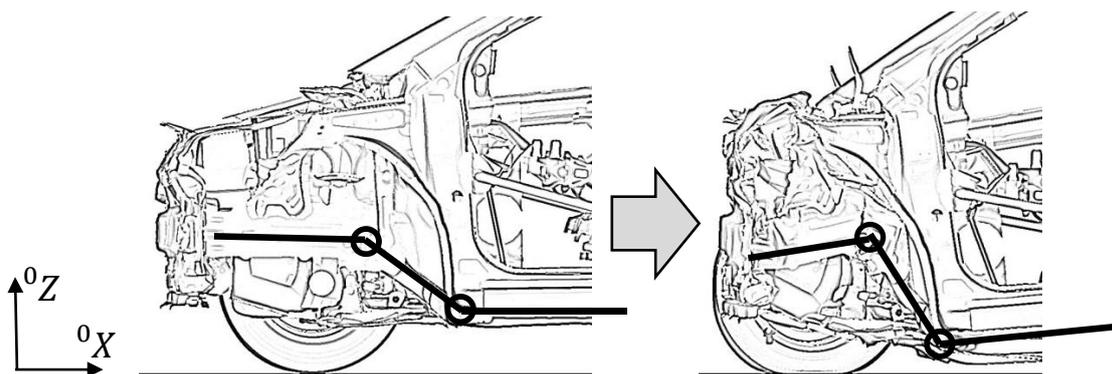


Abbildung 17 Deformationsverhalten der vorderen Längsträger beim Frontalcrash, Simulation des veröffentlichten Toyota Yaris FE-Modells [26, 52]

Diese Bauweise wird bei vielen Fahrzeugen angewandt und führt im Frontalcrash zu einem Knicken der Längsträger im Vorderwagenbereich (Abbildung 17). Dadurch entstehen vertikale Austauschkräfte zwischen Vorderwagen und Fahrgastzelle, was wiederum zu einer Nickbewegung führt.

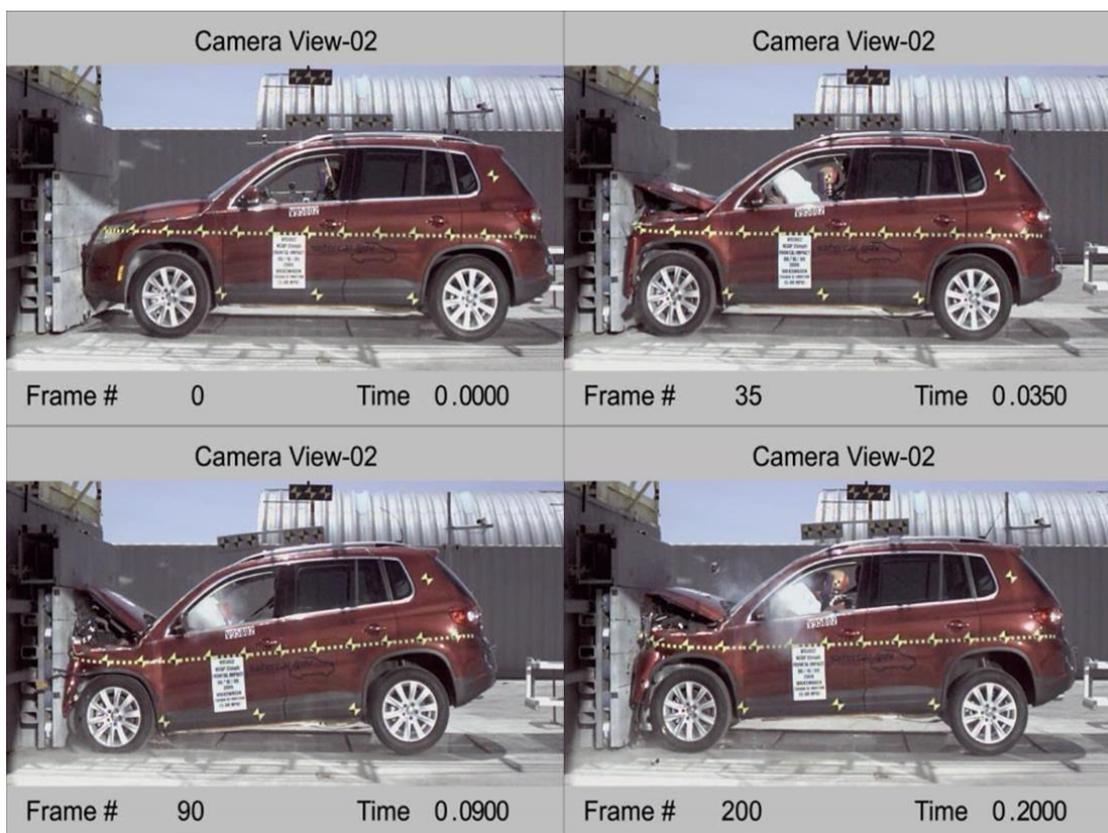


Abbildung 18 Fahrzeugbewegung VW Tiguan USNCAP Test der NHTSA [29]

In Abbildung 18 ist eine Sequenz eines USNCAP-Versuchs zu sehen. Die Nickbewegung setzt erst zu einem bestimmten Versuchszeitpunkt ein. Dieser bestimmt sich über das Erreichen der kritischen Knickkraft in den Längsträgern. Nach dem maximalen Einnicken bewegt sich das Fahrzeug aufgrund elastischer Deformationsanteile und Federkräfte der Radaufhängungen nach oben und es kommt zum sogenannten Rebound.

Entstehung der Gierbewegung

Relevante Gierbewegungen entstehen bei asymmetrischen Lastfällen, wie ODB, 30°-Barriere und dem „Small Overlap“ Test.

ODB

Eine ODB wird im Lastfall EuroNCAP eingesetzt.

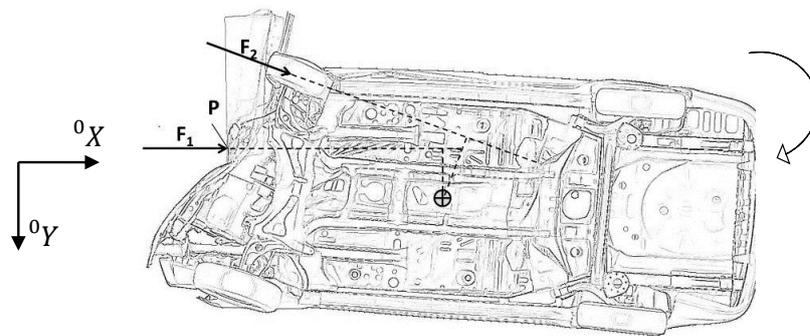


Abbildung 19 Kraftsituation beim ODB Crash, Simulation mit dem veröffentlichten Toyota Yaris FE-Modell [26, 52]

Abbildung 19 zeigt eine Simulation eines ODB Crash-Tests. In der ersten Phase wird die relativ weiche Barriere bei einem geringen Kraftlevel deformiert. Hier entsteht noch keine nennenswerte Gierbewegung. Bei vollständiger Deformation entsteht ein Drehpunkt P und die Kraft F_1 bewirkt ein Giermoment auf das Fahrzeug. Mit zunehmender Deformation gewinnt ein zweiter Lastpfad über F_2 an Bedeutung, der ebenfalls ein Giermoment erzeugt. Mit zunehmendem Gierwinkel wachsen die Hebelarme, was die Gierrate weiter erhöht.

30°-Barriere

Der Crashtest nach der Testvorschrift FMVSS 208 30° wird an einer um 30° schräg gestellten Barriere durchgeführt [46].

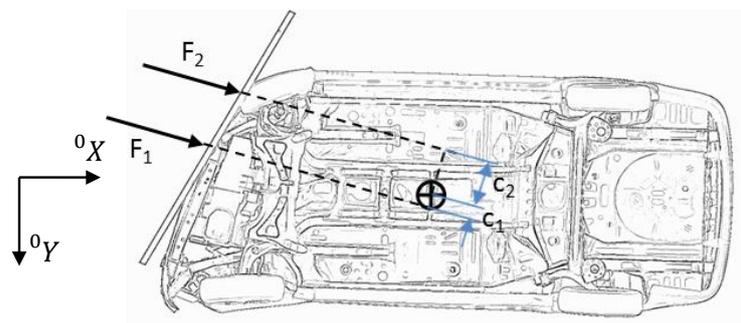


Abbildung 20 Kraftsituation beim FMVSS 208 30° Crash, Simulation mit dem veröffentlichten Toyota Yaris FE-Modell [26]

Die Gierbewegung hängt hierbei stark von der Schwerpunktslage ab. Die schrägen Lastpfade können sowohl positive als auch negative Rotationen auslösen (Abbildung 20). Durch die Relativbewegung zur Barriere hat hier auch die Reibungssituation einen Einfluss. Da die

Kraftrichtungen aber meist in die Nähe des Schwerpunktes zeigen, ist nicht die Rotation, sondern die Querverschiebung in 0Y -Richtung hier der Haupteffekt.

Small Overlap

Bei diesem Lastfall kommt eine fahrzeugseitig abgerundete, starre Barriere zum Einsatz.

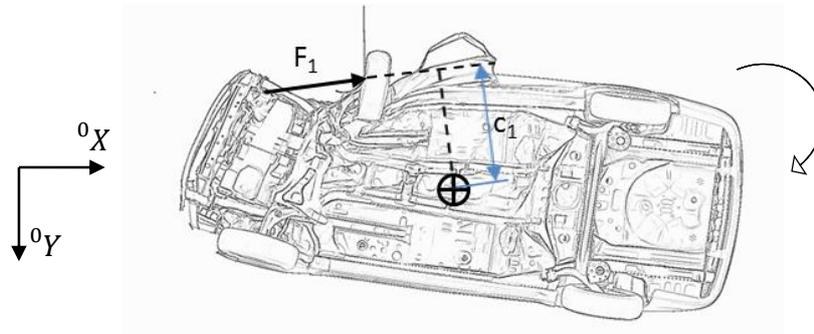


Abbildung 21 Kraftsituation beim Small Overlap Crash, Simulation mit dem veröffentlichten Toyota Yaris FE-Modell [26]

Beim Small Overlap Test mit nur 25 % Überdeckung können verschiedene Kinematiken auftreten. Da der Test erst 2012 eingeführt wurde, ist anzunehmen, dass sich die Bewegungen durch gezielte Modifikationen an den Fahrzeugen noch ändern werden. Es gibt derzeit Einhakkollisionen, bei denen sich das Fahrzeug um die Barriere dreht, was zu einer sehr großen Gierbewegung führt (Abbildung 21). Diese beginnt aber erst spät, wenn über die Radaufhängung oder die Spritzwand große Kräfte aufgebaut werden. Außerdem kann durch gezielten Einsatz von Strukturen auch eine Abgleitkollision entstehen, was zu einer sehr geringen Gierbewegung führt. Wie in Abbildung 21 ersichtlich, werden hier die Längsträger kaum deformiert. Dadurch entstehen bei diesem Test vergleichsweise geringe Nickbewegungen.

Entstehung der Rollbewegung

Auch ein Rollen des Fahrzeugs ist nur bei asymmetrischen Lastfällen in relevantem Ausmaß zu beobachten. Es entsteht entweder durch einseitige, vertikale Austauschkräfte in der Deformationszone (ODB) oder durch einen Hebelarm zwischen Fahrzeugschwerpunkt und Kraftangriffspunkt in der Projektion der Kräfte auf die 0Y 0Z -Ebene (FMVSS 208 30°).

Da diese Bewegung keine wesentlichen Trägheitskräfte auf Fahrzeuginsassen bewirkt, wird ihr für die Fragestellungen dieser Arbeit eine geringe Bedeutung zugemessen. Der Einfluss auf die translatorische 0Z -Bewegung wird fallweise berücksichtigt.

Fazit

Für die Entstehung von Nickbewegungen wurden Mechanismen beschrieben, die von den Lastfällen weitgehend unabhängig sind. Gierbewegungen hingegen entstehen je nach Lastfall deutlich differenzierter. Das bedeutet, dass Methoden zur Abbildung von Gierbewegungen bei unterschiedlichen Lastfällen unterschiedlich gute Resultate bewirken können.

5.1.3 Auftretende Bewegungsbandbreiten

Die Untersuchung von Bewegungsbandbreiten dient einerseits zur Abschätzung von Randbedingungen für mögliche Schlittenanlagen und andererseits zur Identifizierung der kritischen Lastfälle jeder Bewegungskomponente.

Nickbewegung

Für das Nicken können Bereiche des möglichen Ausmaßes der Bewegungen aktueller Fahrzeuge angegeben werden. Dazu wurden veröffentlichte Hochgeschwindigkeitsvideos von NHTSA [29] für die Lastfälle USNCAP und FMVSS 208 0° von verschiedenen Fahrzeugmodellen vom Kleinfahrzeug (Fiat 500) bis zum SUV (Land Rover Range Rover) ausgewertet.

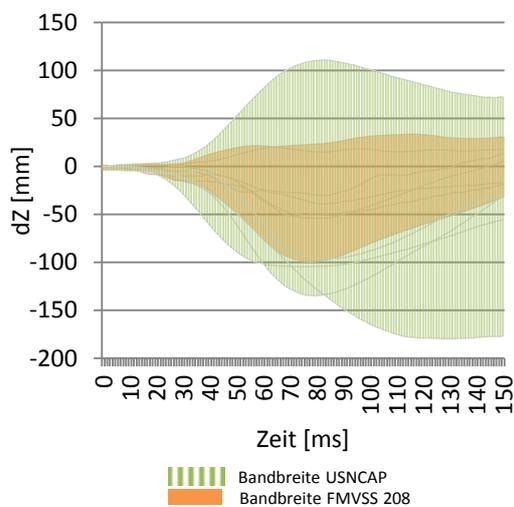


Abbildung 22 Translatorische 0Z -Verschiebung des Fahrzeugsystems gegenüber dem globalen System für die Lastfälle USNCAP und FMVSS 208 0° bei unterschiedlichen Fahrzeugen, Datenbasis: NHTSA [29, 52]

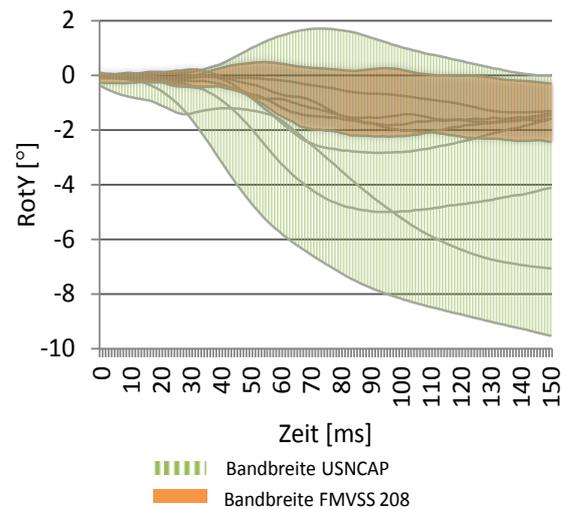


Abbildung 23 Rotation um 0Y für die Lastfälle USNCAP und FMVSS 208 0° bei unterschiedlichen Fahrzeugen, Datenbasis: NHTSA [29, 52]

Die meisten Fahrzeuge führen eine Nickbewegung wie in Abbildung 18 dargestellt mit negativem dZ sowie negativem $rotY$ aus. Es können aber auch Bewegungen mit positiven Werten auftreten (Abbildung 22, Abbildung 23). Die Spannweite ist bei USNCAP durch die höhere Versuchsgeschwindigkeit wesentlich größer als beim FMVSS-Test.

Charakteristisch ist, dass die Bewegung erst bei 20 bis 40 ms einsetzt. Während dZ im weiteren Versuchsverlauf wieder abnimmt, bleibt $rotY$ lange konstant oder erhöht sich weiter. Das ist im Hinblick auf Schlittenanlagen wichtig, denn es bedeutet, dass die beiden Bewegungsanteile unabhängig sind und nicht zu einem einzigen zusätzlichen Freiheitsgrad gekoppelt werden können.

Gierbewegung

Die Datenbasis für Bandbreiten asymmetrischer Versuche beschränkt sich auf Bewegungen verschiedener Fahrzeugklassen eines Herstellers.

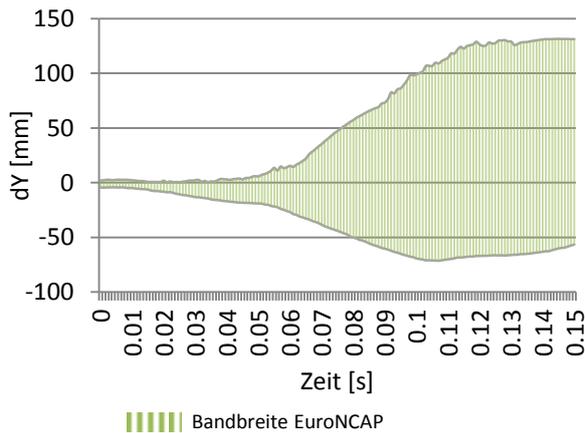


Abbildung 24 Typische translatorische 0Y -Verschiebungen des Fahrzeugsystems gegenüber dem globalen System für den Lastfall EuroNCAP bei unterschiedlichen Fahrzeugen

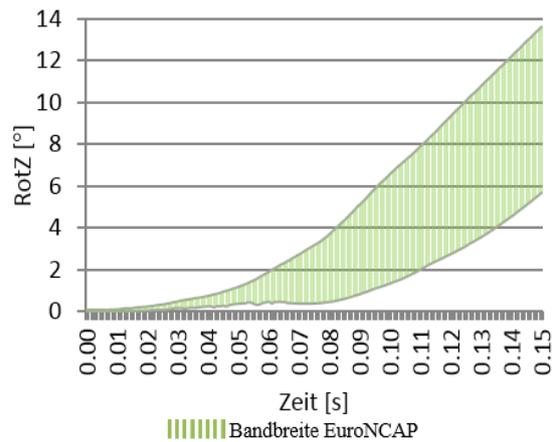


Abbildung 25 Typische Rotationen um 0Z für den Lastfall EuroNCAP bei unterschiedlichen Fahrzeugen

Der Koordinatenursprung in dem die Bewegung betrachtet wird ist ein fiktiver Punkt, der starr mit der Fahrgastzelle verbunden ist. So kann die Translation je nach Fahrzeug in beide Richtungen orientiert sein.

Rotationen sind bei Versuchen mit linksseitiger Barriere immer positiv und spannen ein breites Band auf, bei dem leichte Fahrzeuge bei 150 ms mehr als den doppelten Gierwinkel erreichen können als schwere Fahrzeuge.

5.1.4 Zusammenfassung

Eine Einteilung der unterschiedlichen Frontalcrash-Lastfälle in eindeutige Kategorien der Fahrzeugbewegungen ist nicht möglich. Die Unterteilung in symmetrische (geringe Gier- und Rollbewegungen) und asymmetrische Lastfälle erscheint sinnvoll. Asymmetrische Lastfälle unterscheiden sich untereinander so stark in ihrer Gierbewegung, dass sie separat behandelt werden müssen. Tabelle 7 gibt einen Überblick über Relevanz und Größe der Bewegungsanteile.

Tabelle 7 Einteilung der Frontalcrashlastfälle und Ausmaß der einzelnen Bewegungsanteile

Klassifizierung	Versuch	Nickbewegung		Gierbewegung		Rollbewegung
		Nicken	Verschiebung 0Z	Gieren	Verschiebung 0Y	
symmetrisch	USNCAP	+++	+++	-	-	-
	FMVSS 208 0°	++	++	-	-	-
asymmetrisch	EuroNCAP	++	++	++	+	+
	FMVSS 208 30°	++	++	+	++	+
	Small Overlap	+	+	+++	+++	+

5.2 Einfluss der Fahrzeugbewegungsanteile auf die Kräftesituation von Insassen beim Crashversuch

Um den Nutzen einer komplexen Anlage mit mehreren Freiheitsgraden gegenüber 1DOF-Anlagen bestimmen und Methoden für einen verbesserten Betrieb dieser Anlagen entwickeln zu können,

müssen zuerst die wesentlichen Unterschiede zwischen einem 6DOF-Crashversuch und einem 1DOF-Schlittenversuch für den Dummy analysiert werden. Für ein Verständnis der Unterschiede zwischen herkömmlichen Schlittentests und Gesamtfahrzeugversuchen wird die Kraftsituation am Dummy beschrieben.

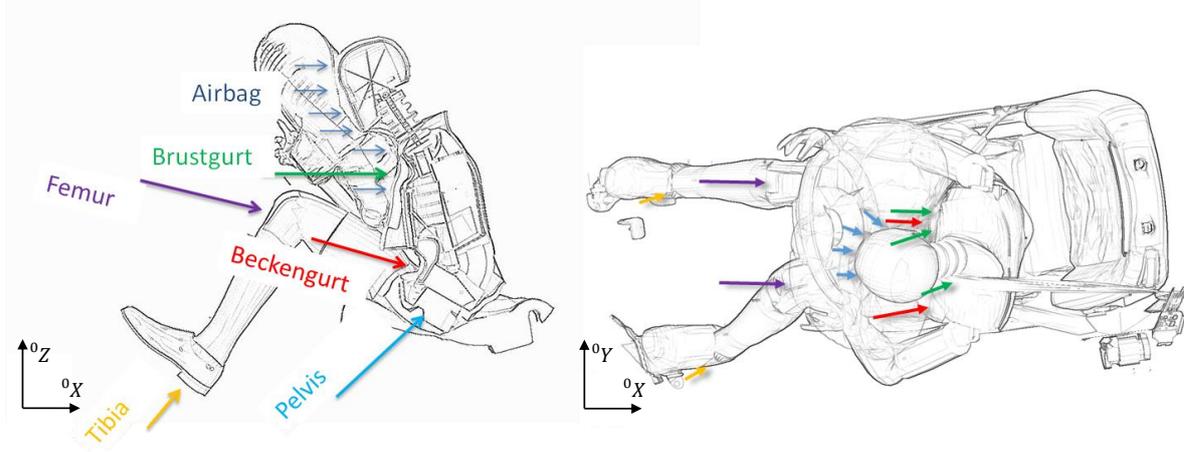


Abbildung 26 Allgemeine Kraftsituation am Dummy bei Frontalkollisionen

Es gibt verschiedene Lastpfade, die den Trägheitskräften des Dummies bei einer Frontalkollision entgegenwirken (Abbildung 26). Ziel der Fahrzeugsicherheitsentwicklung sind moderate Verzögerungen des Insassen, um Verletzungsrisiken zu minimieren und das Verhältnis sowie die Größe der Kräfte biomechanisch günstig zu gestalten. Eine künstliche Verschiebung dieses Verhältnisses für Entwicklungszwecke, wie es auf einer Schlittenanlage der Fall ist, da gewisse Fahrzeugbewegungsanteile nicht abgebildet werden, führt natürlich auch zu veränderten Dummybelastungen.

5.2.1 Airbag-Kraft

Der Airbag wirkt beim Frontalanprall hauptsächlich auf Kopf und Brust und hat die Aufgabe, die Relativgeschwindigkeit über eine große Kontaktfläche und einen möglichst langen Zeitraum mit moderater Kraft abzubauen. Aus diesem Grund besitzt der Airbag ein Vent, aus dem das Füllgas wieder entweicht. Das Volumen nimmt (nach vollständiger Entfaltung) während der Versuchsdauer ab.

Bei einer Nickbewegung rotiert das Fahrzeug, und so reduziert sich zwischenzeitlich die Relativgeschwindigkeit zwischen Lenkrad/Airbag und Dummykopf. Das bedeutet, dass dieselbe Eintauchtiefe des Kopfes in den Airbag durch Nickbewegung später erreicht ist als ohne Nickbewegung. Dieser Zeitverzug bedeutet, dass das Airbagvolumen weiter gefallen ist, und die Kraft vom Airbag auf den Dummykopf geringer ist.

Hinsichtlich Gierbewegungen ist zu beachten, dass vor allem Fahrerairbags in der Mitte die größte Dicke aufweisen. Eine Gierbewegung führt aber zu einem in F^Y -Richtung abweichenden Kontaktpunkt und dadurch zu einer Abrollbewegung des Kopfes. So erklären sich deutliche Unterschiede in der Kopfbelastung bei einem Vergleich zwischen Simulationen mit einem, bzw. sechs Freiheitsgraden.

5.2.2 Brustgurt

Die Brustgurtkraft wirkt auf den oberen Torso. Sie ist üblicher Weise durch den Gurtkraftbegrenzer limitiert und somit nicht sensitiv auf Nick- oder Gierbewegungen. Der Messwert Brusteingdrückung hängt aber nicht nur von der Gurtkraft, sondern unter anderem auch von der Lage des Gurtbandes am Torso und von der Lage des Dummys im Fahrzeug ab.

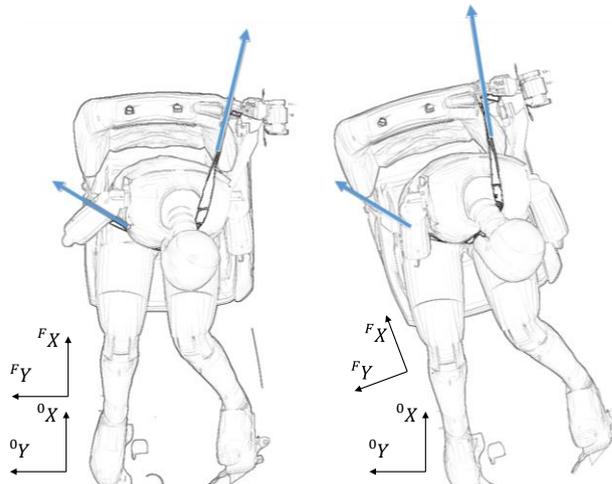


Abbildung 27 Kräfte an Brustgurt mit und ohne Gierbewegung

Die Kräfte an Brustgurt mit und ohne Gierbewegung in Abbildung 27 machen ersichtlich, dass trotz der durch den Gurtkraftbegrenzer definierten Kraft am Schultergurt, die Verletzungskriterien im Brustbereich von der Gierbewegung abhängen.

5.2.3 Kräfte auf den Beckenbereich

Auf das Becken wirken vier Kräfte:

1. Beckengurtkraft
2. Femurkraft
3. Sitzkraft
4. Schnittkraft der Lendenwirbelsäule.

All diese Kräfte hängen stark voneinander ab. Die Kraft vom Sitz auf das Becken ist sensitiv auf Nickbewegung. Nickbewegungen verursachen meist ein Absenken des Fahrzeugs im Bereich des Dummys während des Versuchs, sowie ein Anheben im Rebound. Das Absenken vermindert die Kraft vom Sitz auf das Becken, was zu einer Erhöhung von Beckengurt- und Femurkräften führt.

In der Reboundphase erhöht sich die Kraft vom Sitz durch eine Nickbewegung. Das erhöht die z-Komponenten der Dummybeschleunigungen im entsprechenden Zeitintervall.

Eine Gierbewegung kann vor allem zu einer Verschiebung zwischen den beiden Femur-Lastpfaden führen. Außerdem bewirken laterale Bewegungen in der Zeit vor dem Kontakt zwischen Knie und Instrumententafel eine Verschiebung des Kontaktpunktes. Auch das kann die Kräfteituation ändern.

5.2.4 Tibia-Kraft

Tibia-Kräfte beeinflussen die Femurkräfte und damit letztlich auch das Verhältnis der Rückhaltekräfte auf den Torso. Die Tibiakraft verändert sich bei unterschiedlichen Fahrzeugbewegungen vor allem bei veränderten Bedingungen im Fußbereich (Abrutschen vom Pedal, etc.).

5.3 Abbildung von 6DOF-Crashversuchen auf 1DOF-Schlittenanlagen

Die Fahrzeugbewegungen wurden wie in Kapitel 4.5 beschrieben aufgebracht. Einstellungen der Rückhaltesysteme sind in den jeweiligen zusammengehörigen Modellen mit sechs Freiheitsgraden (6DOF) bzw. einem Freiheitsgrad (1DOF) ident.

5.3.1 Ergebnis für ein Fahrzeug der Mittelklasse

USNCAP H350 Fahrer

Bei einem untersuchten Fahrzeug tritt im Lastfall USNCAP eine deutliche Nickbewegung mit einem minimalen dZ (vgl. Abbildung 7) von -110 mm im Koordinatenursprung und einem maximalen Nickwinkel von ca. 4° auf. Es ist keine nennenswerte Gierbewegung vorhanden. Auch der maximale Rollwinkel ist mit 0,8° sehr gering. Durch die einfache Bewegung eignet sich dieser Lastfall gut für die Diskussion von Einflüssen der Nickbewegung.

Die berechneten Verletzungswerte [9] wurden für Darstellungszwecke normiert, wobei dem Verletzungswert der 6DOF-Simulation (Referenz) der Wert eins zugeordnet wird. Für die Entwicklung sind Werte, die zu gering prognostiziert werden als kritisch zu beurteilen. Natürlich sind aber auch überprognostizierte Werte ungünstig, da die Senkung verschiedener Verletzungswerte oft einen Zielkonflikt bedeutet und so Potentiale nicht erkannt werden.

Das Ergebnis für diesen Fall zeigt große Abweichungen zwischen 1DOF und 6DOF. Manche Verletzungswerte werden durch eine 1DOF-Anlage zu gering prognostiziert, andere sind dagegen viel zu hoch (Abbildung 28).

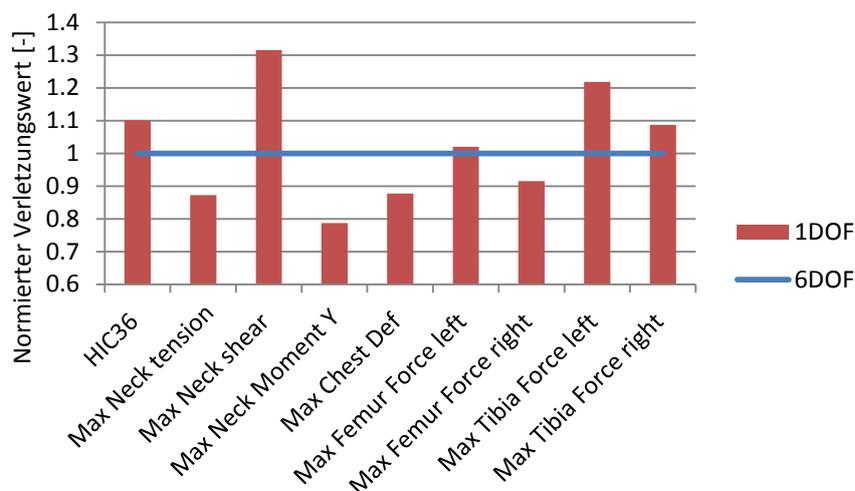


Abbildung 28 Vergleich der Verletzungswerte zwischen 6DOF und 1DOF für die Mittelklasse im Lastfall USNCAP H350

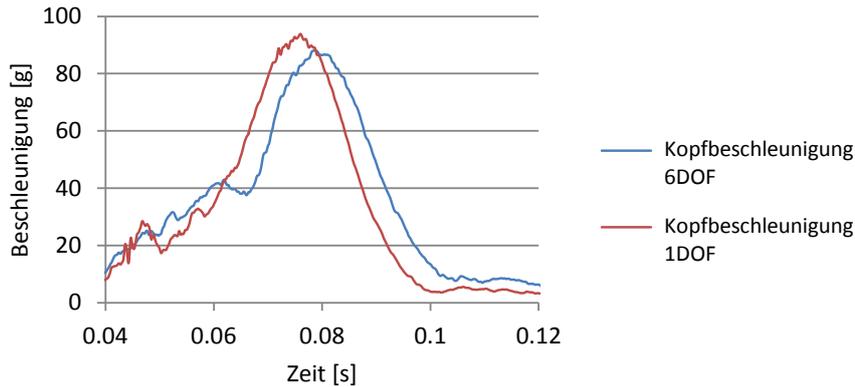


Abbildung 29 Vergleich der resultierenden Kopfbeschleunigungen zwischen 6DOF und 1DOF für die Mittelklasse im Lastfall USNCAP H350

Wie oben beschrieben, entsteht im Schlittenversuch durch den Entfall der Rotation der Nickbewegung eine frühere und höhere Kopfbeschleunigung (Abbildung 29). Erhöhte HIC-Werte sind also systematisch bei Schlittenversuchen, wenn im Gesamtfahrzeugversuch eine negative 0Y -Rotation auftritt (das ist bei allen untersuchten Fahrzeugen und Lastfällen der Fall). Die Erhöhung des HIC36 beträgt hier 10 %.

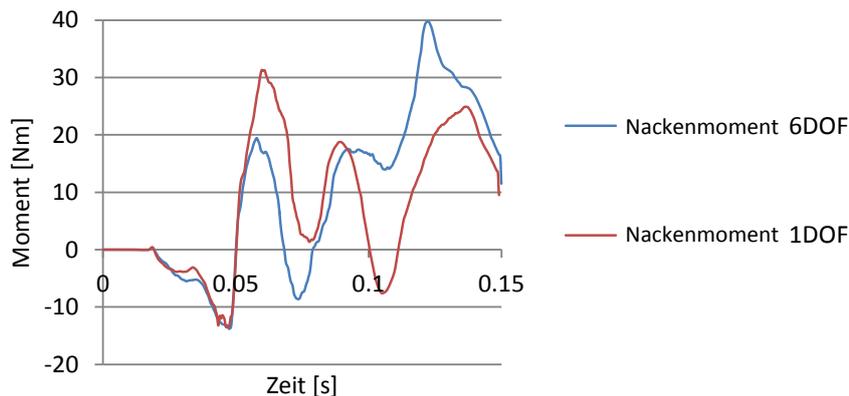


Abbildung 30 Vergleich des Nackenmoments in Richtung y zwischen 6DOF und 1DOF für die Mittelklasse im Lastfall USNCAP H350

Die drei Nackenwerte Zug-/Druckkraft, Scherkraft und Moment reagieren unterschiedlich auf die eingeschränkte Fahrzeugbewegung. Die Zugkraft (z) (vgl. Abbildung 9) nimmt durch den Entfall der Nickbewegung ab, da sie in der Einnickphase am größten ist und dort die Zugkraft durch das Rückhaltesystem am Dummy in z -Richtung ohne Nicken geringer ist. Die Scherkraft ist an die Kopfbeschleunigung gekoppelt und steigt bei 1DOF an. Das Nackenmoment kann in der Reboundphase ein Maximum erreichen (Abbildung 30). Hier entstehen bei Nickbewegungen durch die Kraft vom Sitz größere Werte. Im gezeigten Fall wird der Zeitpunkt des maximalen Moments auf einer herkömmlichen Schlittenanlage nicht richtig prognostiziert. Die Verläufe der drei genannten Messkurven werden bei USNCAP zu einem Kriterium, dem NIJ zusammengefasst. Offensichtlich kann durch die unterschiedlichen Einflüsse auf die Einzelkanäle der Verlauf des NIJ

nicht mehr abgebildet werden, wenngleich der Maximalwert in diesem Fall nur um wenige Prozent abweicht.

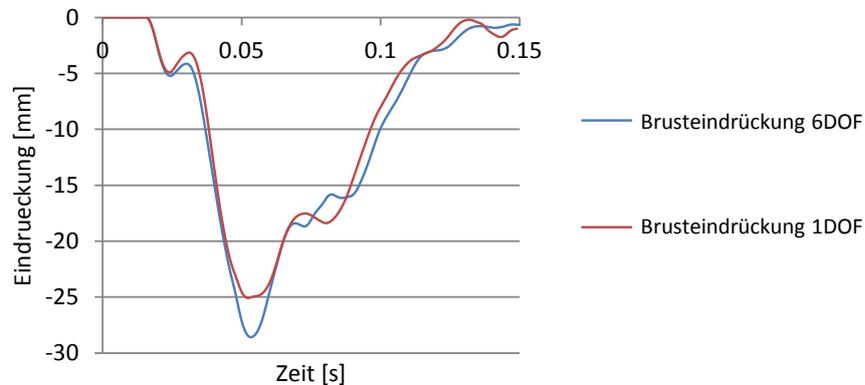


Abbildung 31 Vergleich der Brusteindrueckung zwischen 6DOF und 1DOF für die Mittelklasse im Lastfall USNCAP H350

Wie oben beschrieben, sind die Brustbeschleunigungen der Simulationen durch den Gurtkraftbegrenzer auch bei veränderten Fahrzeugbewegungen sehr ähnlich. Die Brusteindrueckung ist hingegen stark von der Gurtbandlage abhängig. In der Entlastungsphase des Dummys aufgrund einer Nickbewegung bewegt sich das Gurtband relativ zum Dummy etwas nach unten (ca. 10 mm). Im gezeigten Fall entsteht eine deutliche Differenz des Maximalwerts der Brusteindrueckung von 3,5 mm (Abbildung 31). Die zu geringe Prognose wird für unterschiedliche Fahrzeuge und auch andere Lastfälle bestätigt und ist somit systematisch.

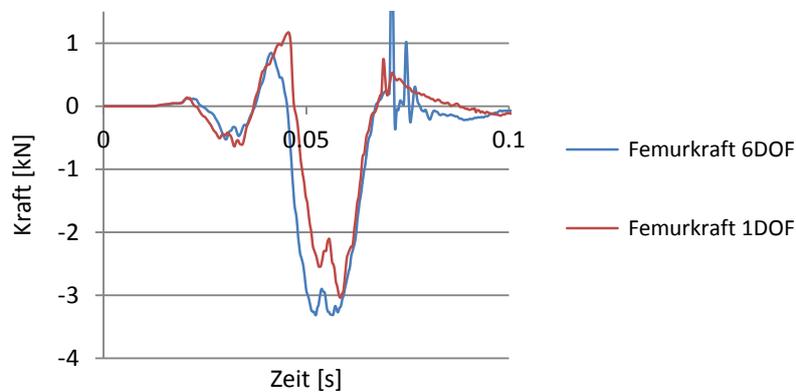


Abbildung 32 Vergleich der rechten Femurkräfte zwischen 6DOF und 1DOF für die Mittelklasse im Lastfall USNCAP H350

In diesem Fall ist die rechte Femurkraft die dominante Beinkraft (Abbildung 32). Der Maximalwert unterscheidet sich nur geringfügig, die Abbildung des Verlaufes ist aber schlecht. Differenzen von fast 1 kN treten während der Hauptbelastung auf. Auch die bei 1DOF verringerte Femurkraft ist systematisch.

Neben den Femurkräften ist auch die Beckengurtkraft, die in einem indirekten Verhältnis mit der Sitz-Pelvis-Kraft steht, bei 1DOF in ihrem Maximum um ca. 1 kN zu gering.

Auch im Bereich der Dummykinematik und der einhergehenden Kontakt Risiken sind große Unterschiede feststellbar. Nachfolgend werden die Projektionen von lokalen Trajektorien in die ${}^F X {}^F Z$ -Ebene des Fahrzeugkoordinatensystems gezeigt.

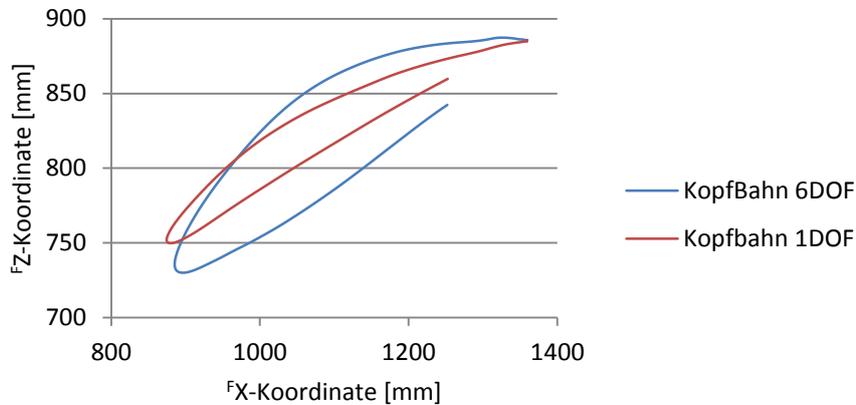


Abbildung 33 Vergleich der Kopftrajektorien (Kopfbeschleunigungssensorpunkt, ${}^F X {}^F Z$ -Ebene) im Fahrzeugkoordinatensystem zwischen 6DOF und 1DOF für die Mittelklasse im Lastfall USNCAP H350

Abbildung 33 zeigt, dass die Kopftrajektorie der Simulation mit sechs Freiheitsgraden zu Beginn einen deutlich höheren Verlauf (+16 mm) hat. In diesem Bereich befindet sich auch das Abstandsminimum zwischen Kopf und Dach (Sonnenblende). Auch wenn dieser Abstand im vorliegenden Modell keinen kritischen Wert darstellt, kann er bei anderen Fahrzeugen während der Entwicklung wichtig sein.

Trotz des früheren und höheren Kopfbeschleunigungspeaks (Abbildung 29) hat die 1DOF-Trajektorie einen kleineren minimalen ${}^F X$ -Wert (-10 mm). Aufgrund der schrägen Lenkradstellung wird zusätzlich zur Trajektorie des Kopfsensorpunktes der Restabstand zwischen Kopfkontur und Lenkradebene beurteilt.

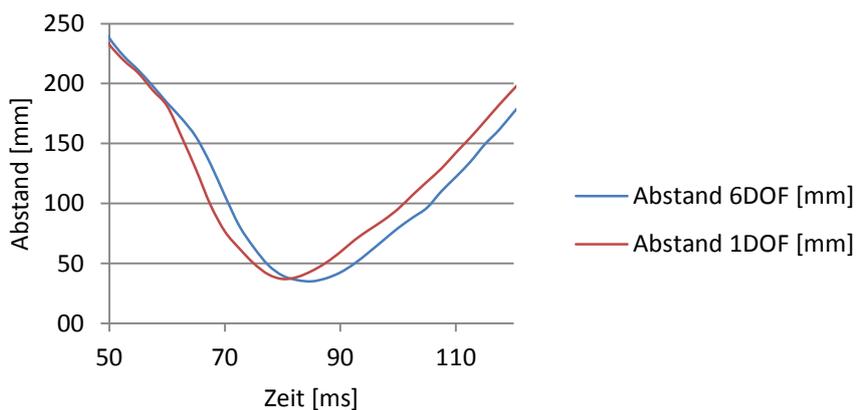


Abbildung 34 Vergleich der Kopf-Lenkrad Abstände zwischen 6DOF und 1DOF für die Mittelklasse im Lastfall USNCAP H350

Der tatsächliche Restabstand zwischen Kopfkontur und Lenkrad wird auf einer Schlittenanlage in diesem Fall gut prognostiziert (Abbildung 34). Die Differenz beträgt lediglich 2 mm. Es ist aber zu

beachten, dass weder der Zeitpunkt noch der Ort des auftretenden Minimalabstands übereinstimmen.

Ein weiterer wichtiger geometrischer Verlauf ist die Beckentrajektorie (Beckenbeschleunigungssensorpunkt, Abbildung 35). Sie veranschaulicht die Entstehung der Differenzen von Femur-, Beckengurt- und Sitzkräften.

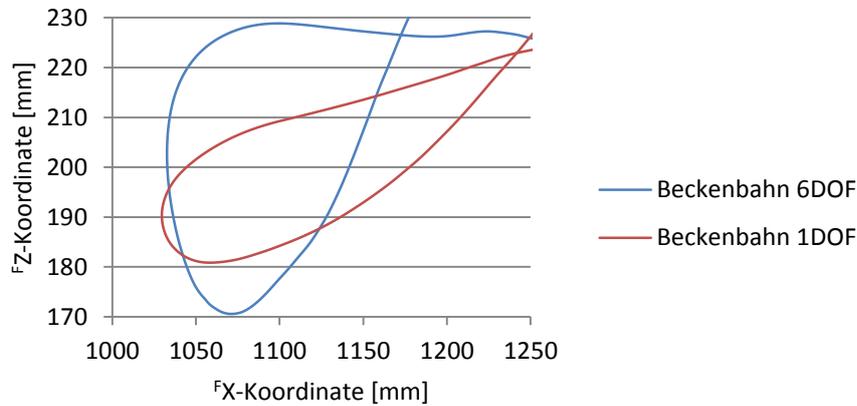


Abbildung 35 Vergleich der Beckentrajektorien (Beckenbeschleunigungssensorpunkt, $F_x F_z$ -Ebene) im Fahrzeugkoordinatensystem zwischen 6DOF und 1DOF für die Mittelklasse im Lastfall USNCAP H350

Bei 1DOF wird das Becken aufgrund der F_z -Anteile von Beckengurtkraft und Femurkräften kontinuierlich in den Sitz gedrückt, wodurch dort auch in F_x -Richtung, aufgrund von Reibung und der schrägen Sitzfläche, große Kräfte erzeugt werden können. Durch die Nickbewegung im Gesamtfahrzeugversuch verringert sich diese Kraft in dieser Phase stark. Im Fahrzeugkoordinatensystem wandert das Becken in positive F_z -Richtung. Nach dieser Entlastungsphase, die nach ca. 50 ms abgeschlossen ist, erfolgt das Eindrücken in den Sitz dafür umso stärker, was zu großen Reaktionskräften entlang der Dummylängsachse führt. Femurkräfte sind zu diesem Zeitpunkt bereits abgeklungen. Die gezeigten Unterschiede führen zu folgenden Abbildungswerten: (Tabelle 8).

Tabelle 8 Durch CORA berechnete Abbildungswerte für 1DOF bei der Mittelklasse im Lastfall USNCAP H350

<i>Abbildung 6DOF durch 1DOF</i>	<i>Belastungen</i>	<i>Trajektorien</i>
Abbildungswert	0,719	0,739

Diese Werte sind als Referenz zum Vergleich mit anderen Lastfällen zu sehen und entsprechen einer eher schlechten Abbildung.

USNCAP H305 Beifahrer

Beim USNCAP wird auch ein H3 5 % female Dummy auf der Beifahrerseite getestet. Die als systematisch angesehenen Unterschiede zwischen 6DOF und 1DOF können also mithilfe eines anderen Dummies und anderen Rückhaltesystemen verifiziert werden.

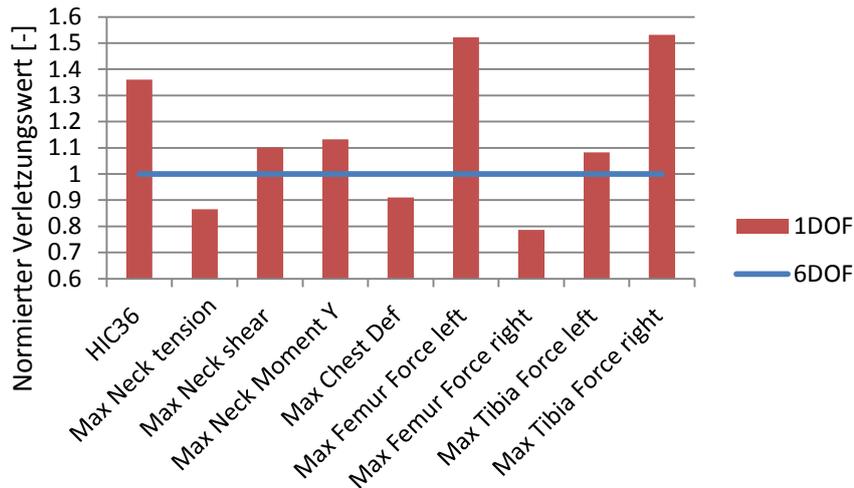


Abbildung 36 Vergleich der Verletzungswerte zwischen 6DOF und 1DOF für die Mittelklasse im Lastfall USNCAP H305

Für viele Dummybereiche kann die beschriebene Systematik (also kausal erklärbare Differenzen) durch Abbildung 36 bestätigt werden. Der Unterschied der HIC-Werte ist auf der Beifahrerseite noch sehr viel höher (H305: 36 %, H350: 10 %). Für das Nackenmoment um y kann aus Abbildung 30 entnommen werden, dass der Verlauf mit 1DOF zuerst höher, dann niedriger ist als die Referenz. Da der Maximalwert auf der Beifahrerseite viel früher auftritt als auf der Fahrerseite, wird aus der Unterprognose eine Überprognose. Die Brusteingdrückung ist auch hier bei der 1DOF-Simulation zu niedrig. Beinkräfte hingegen sind im Vergleich zum H350 verwirrend, da sie bei 1DOF geringer sein sollten. Bei diesem Lastfall tritt aber kein Kontakt zwischen Instrumentenpanel und Knie auf, was einerseits zu sehr geringen Femurkräften (nur Massenträgheit) und andererseits zu einer veränderten Verteilung der Rückhaltekräfte führt. Die Beckengurtkraft dagegen ist auch hier bei 1DOF um 0,5 kN zu gering.

Tabelle 9 Durch CORA berechnete Abbildungswerte für 1DOF bei der Mittelklasse im Lastfall USNCAP H305

Abbildung 6DOF durch 1DOF	Belastungen	Trajektorien
Abbildungswert	0,771	0,773

Die Abbildungswerte (Tabelle 9) sind für den H305 Dummy auf der Beifahrerseite etwas besser als bei dem H350 Dummy auf der Fahrerseite.

FMVSS 208 0°

Bei diesem Test ist die Nickbewegung aufgrund der Kollisionsgeschwindigkeit geringer als bei USNCAP. Die Einflüsse auf den Insassen verschieben sich aber aufgrund des fehlenden Gurts etwas. Bei dem Test können vier Varianten unterschieden werden:

1. H350 Fahrer
2. H350 Beifahrer
3. H305 Fahrer
4. H305 Beifahrer

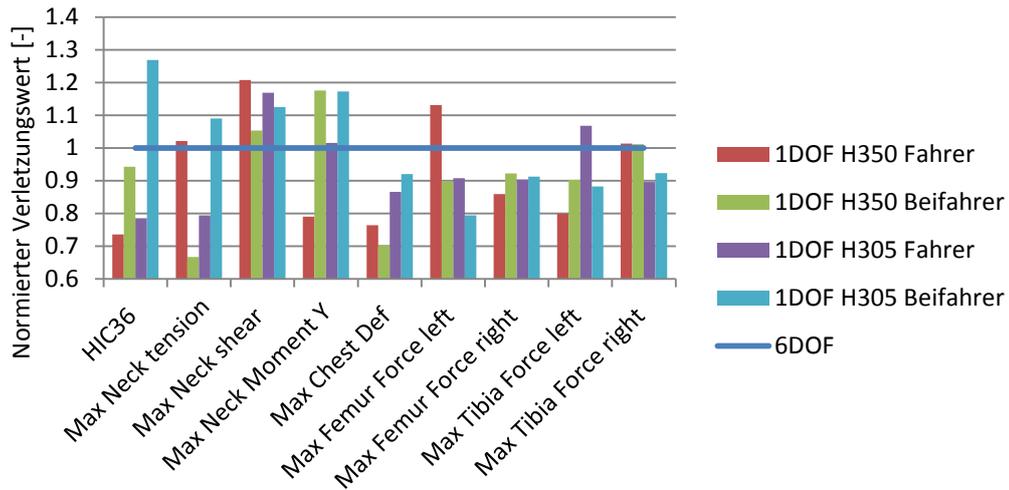


Abbildung 37 Vergleich der Verletzungswerte zwischen 6DOF und 1DOF für die Mittelklasse im Lastfall FMVSS 208 0° und unterschiedliche Konfigurationen

Bei diesem Lastfall ist nur für die Werte Nackenscherkraft, Brusteingriffsdruck und rechte Femurkraft ein durchgängiges Verhalten erkennbar. Die anderen Werte können auf einer herkömmlichen Schlittenanlage sowohl zu hoch als auch zu niedrig ausfallen. Das erklärt sich durch die Bewegungsphasen. In Abbildung 38 sind exemplarisch die Bewegungsphasen für den H350-Dummy auf der Beifahrerseite dargestellt. Im Vergleich zum USNCAP-Versuch sind diese Phasen von Dummy und Fahrzeug verschoben.

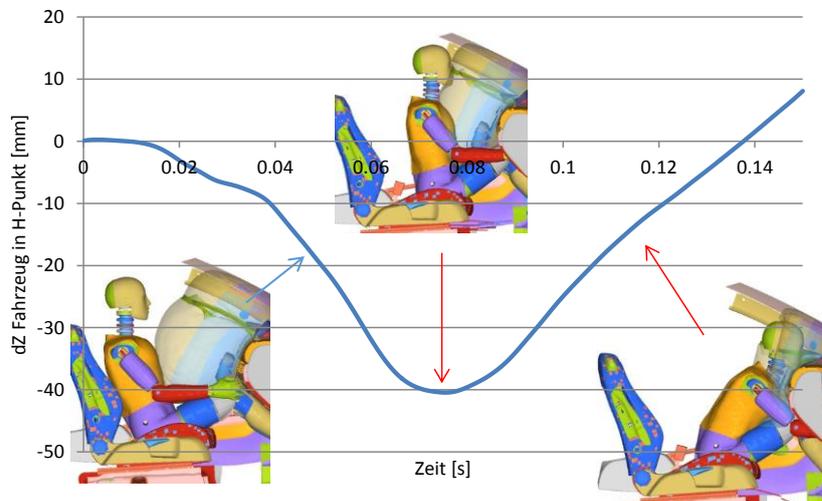


Abbildung 38 Dummypositionen während Nick-Phasen bei FMVSS 208 0° verglichen mit der Fahrzeugbewegung in 0° im H-Punkt

In der Phase des Einnickens ist der Dummy in einer aufrechten Position und der Abstand zwischen Kopf und Dach wird minimal. Durch das Fehlen des Gurtes betragen die Differenzen zwischen Simulationen mit und ohne Nickbewegung bis zu 30 mm. Der Zeitpunkt der maximalen Dummyvorverlagerung ist erst in der Reboundphase des Fahrzeugs. Die Nickbewegung begünstigt ein Durchschlagen des Kopfes auf die Instrumententafel.

Die Kombination des leichten H305 Dummies mit einem „weichen“ Rückhaltesystem führt zu einem Verhalten, das dem USNCAP ähnelt, und der HIC-Wert bei 1DOF ist deutlich zu groß. Bei allen anderen Fällen ist es umgekehrt und es überwiegt die verminderte Kraftkomponente in z-Richtung bei 1DOF (geringere HIC-Werte). Eine versuchstechnische Airbagabstimmung für diesen Lastfall ist auf einer herkömmlichen Schlittenanlage nur schwer möglich.

Brusteindrückungen hängen vor allem auf der Fahrerseite stark vom Kontaktpunkt mit dem Lenkrad ab. Das führt zu unterschiedlichen Fehlern für verschiedene Dummies. Bei beiden Dummies traten bei der 1DOF-Bewegung sowohl fahrer- als auch beifahrerseitig Unterprognosen der Brusteingdrückung auf.

Die fehlerhafte Abbildung von Beinwerten erklärt sich durch veränderte Kontaktpunkte sowie z-Komponenten von der schrägen Instrumententafel. Je nach Kontaktpunkt kann auch eine vergrößerte Femurkraft auftreten. Im Beispiel H350 Fahrer ist bei der linken Femurkraft zwar der Maximalwert vergrößert, nicht aber die Fläche unter der Kurve.

Die Abbildung dieses Lastfalls ist allgemein sehr schwierig und die Abbildungswerte können jene eines USNCAP-Versuchs deutlich unterschreiten (Tabelle 10).

Tabelle 10 Durch CORA berechnete Abbildungswerte für 1DOF bei der Mittelklasse im Lastfall FMVSS 208 0° und verschiedene Konfigurationen

<i>Abbildung 6DOF durch 1DOF</i>	<i>Dummybelastungen</i>	<i>Trajektorien</i>
H350 Fahrer	0,686	0,623
H350 Beifahrer	0,614	0,572
H305 Fahrer	0,762	0,679
H305 Beifahrer	0,762	0,625

Die berechneten Abbildungswerte sind vor allem beim H350 Dummy deutlich geringer als bei USNCAP. Im Fall des H305 Dummies, wo kaum Kontakte mit harten Teilen des Fahrzeuginnenraums entstehen, ist die Abbildung der Belastungen vergleichbar mit jener des USNCAP. Die Abbildung der Trajektorien ist aufgrund des fehlenden Gurts aber schlechter.

EuroNCAP

Dieser Lastfall ist asymmetrisch. Die Erkenntnisse der Nickbewegung sind übertragbar, jedoch gibt es hier auch einen Einfluss der Gierbewegung auf das Verhalten der Insassen.

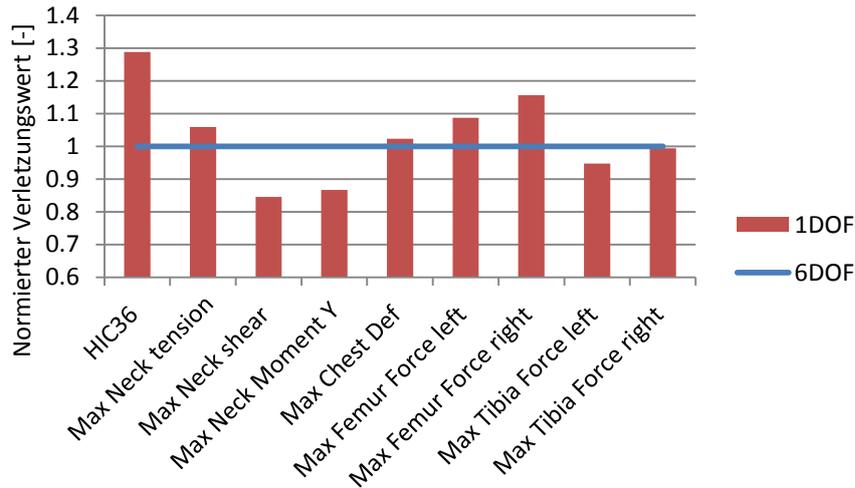


Abbildung 39 Vergleich der Verletzungswerte zwischen 6DOF und 1DOF für ein Fahrzeug der Mittelklasse im Lastfall EuroNCAP H350

Abbildung 39 zeigt, dass sich bei diesem Lastfall der Unterschied für den Kopf im Vergleich zu USNCAP ($HIC36=1,1 \times \text{Originalwert}$) verstärkt. Grund dafür ist das Abrollen des Kopfes bei 6DOF, das mit 1DOF nicht abgebildet wird. Dieses Verhalten ist auch für die Veränderungen der Nackenwerte verantwortlich. Bei der Abbildung des Nackenmoments, das sehr spät einen Maximalwert erreicht, ist zusätzlich der Zeitpunkt des Maximalwertes ein anderer.

Die gute Abbildung der Brust eindrückung wird nicht als systematisch richtig eingestuft, sondern entsteht durch gegenläufige Fehler. Im späteren Verlauf haben die Gierbewegung und die einhergehende Verlagerung des Brustgurtes (ca. 8 mm) einen wesentlichen Einfluss auf die Brust eindrückung.

Femur-Werte scheinen von bisherigen Erkenntnissen abzuweichen. Durch die Gierbewegung verschiebt sich aber das Verhältnis der beiden Femur-Werte von rechts nach links. Die Summe ist zum Zeitpunkt des Maximums an der höher belasteten rechten Seite auch bei EuroNCAP im Schlittenversuch wieder geringer als beim Gesamtfahrzeugversuch. Da auf der linken Seite bei diesem Modell kaum Kräfte entstehen, wird das Maximum in Abbildung 39 zu einem anderen Zeitpunkt dargestellt.

Tabelle 11 Durch CORA berechnete Abbildungswerte für 1DOF bei der Mittelklasse im Lastfall EuroNCAP H350

<i>Abbildung 6DOF durch 1DOF</i>	<i>Belastungen</i>	<i>Trajektorien</i>
Abbildungswert	0,594	0,556

Die Abbildung dieses Tests auf einer Schlittenanlage ist in beiden Teilbewertungen deutlich schlechter als bei symmetrischen Lastfällen (Tabelle 11). Grund dafür ist, dass durch die zusätzliche Gierbewegung (6DOF) gegenüber einem symmetrischen Lastfall weitere Einflussfaktoren entstehen.

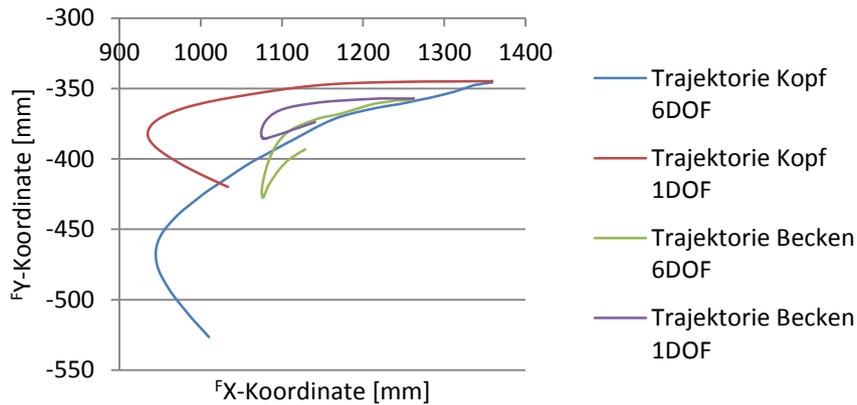


Abbildung 40 Vergleich der Kopf- und Beckentrajektorien (${}^F X$ ${}^F Y$ -Ebene) im Fahrzeugkoordinatensystem zwischen 6DOF und 1DOF für ein Fahrzeug der Mittelklasse im Lastfall EuroNCAP

Im Vergleich der Projektion der Kopf- und Beckentrajektorien in der ${}^F X$ ${}^F Y$ -Ebene wird der Grund für die schlechte Abbildung der Trajektorien ersichtlich (Abbildung 40). Der Fehler in ${}^F Y$ -Richtung zum Zeitpunkt der Bewegungsumkehr des Dummys beträgt 84 mm für den Kopf und 42 mm für das Becken.

FMVSS 208 30°

Bei diesem Versuch liegt der Fokus der Sicherheitsentwicklung auf der Kopfbelastung. Da der Dummy nicht gegurtet ist und eine sehr große laterale Fahrzeugbeschleunigung entsteht, kommt es meist zu einem Kontakt zwischen Kopf und A-Säule, bzw. dem Curtain Airbag. Dieses Verhalten lässt sich mit den bisher gesetzten Randbedingungen einer Schlittenanlage nicht zufriedenstellend nachstellen. Die Abbildungswerte liegen bei 0,68 / 0,41. Die Abbildung der Dummybelastung ist im Vergleich mit dem Abbildungswert der Trajektorien gut, was an niedrigen Belastungswerten liegt.

Small Overlap

Auch bei diesem Versuch ist ohne Vorverdrehung des Schlittens keine Kinematik möglich, die einer für die Entwicklung ausreichenden Abbildung entspricht. Die zugehörigen Abbildungswerte sind 0,67 / 0,48. Auch hier ist die schlechte Abbildung nur am Wert der Trajektorien erkennbar. Dieser Lastfall wird im nächsten Kapitel behandelt.

5.3.2 Ergebnisse für Kleinwagen und SUV

Zur Verifikation der Aussagen wurde auch das Verhalten eines Kleinwagens und eines SUVs untersucht. Die Veränderungen durch eine herkömmliche Schlittenanlage entsprechen in Richtung und Ausprägung ungefähr den Gezeigten.

Bei Kleinwagen nehmen die Differenzen durch die größere Pulshärte und die große Rotation zu. Die Unterschiede für SUV sind aber nicht, wie angenommen werden könnte, durch die deutlichere Nickbewegung wesentlich größer. Grund dafür ist, dass sich eine größere Translation (im Nullpunkt) gemeinsam mit einer größeren Rotation für den H-Punkt ausgleichen kann.

5.3.3 Zusammenfassung

Als systematisch für 1DOF-Schlittenversuche können bei den gegurteten Lastfällen USNCAP und EuroNCAP eine erhöhte Kopfbeschleunigung, eine verminderte Brusteindrückung sowie insgesamt verminderte Femurkräfte angesehen werden. Die Veränderungen der Nackenwerte sind sowohl positiv als auch negativ. Auch diese Veränderungen sind aber systematisch. Seitens der Dummykinematik sind vor allem zu große Kopf-Dach-Abstände systematisch.

Im Fall des FMVSS 208 0° Lastfalls sind etwas andere Effekte zu beachten. Als systematisch können hier nur die verringerte Brusteindrückung, verringerte Femurkräfte, zu große Kopf-Dach-Abstände sowie zu große Abstände zwischen Kopf und Instrumententafel / Lenkrad bezeichnet werden. Andere Werte hängen von der Position im Fahrzeug und vom Dummy ab.

Zusammenfassend werden in Abbildung 41 die Abbildungswerte für je eine Versuchskinetik der Fahrzeugklassen in den betrachteten Lastfällen gegenübergestellt.

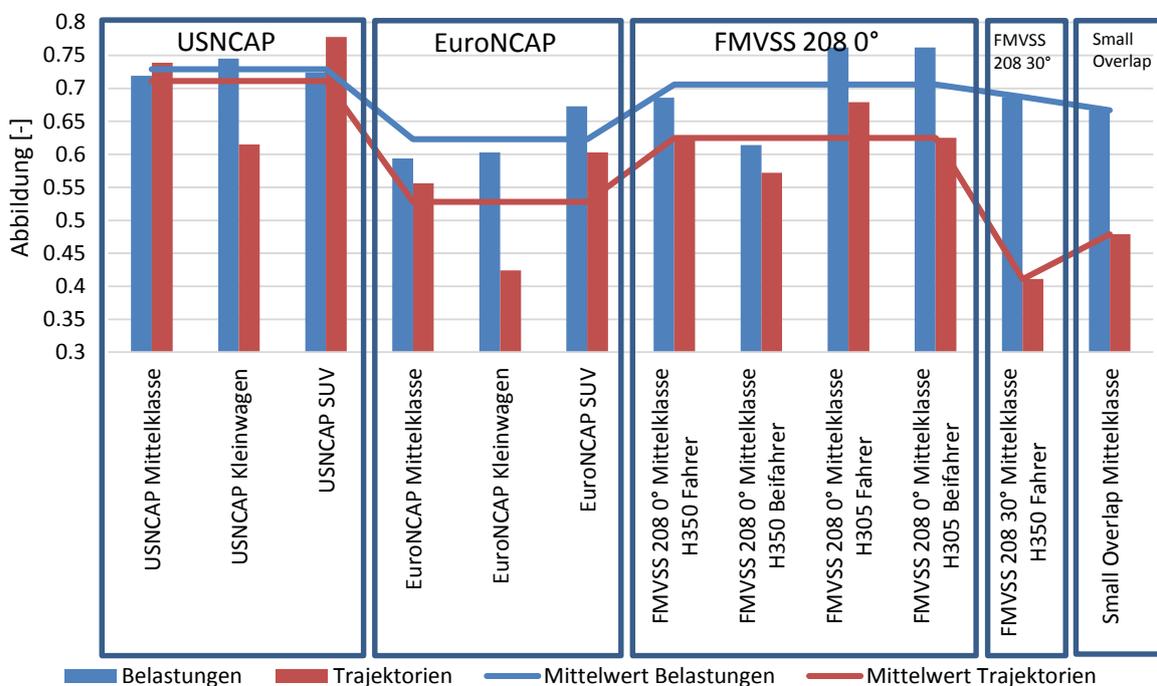


Abbildung 41 Zusammenfassung von Abbildungswerten von 1DOF-Schlittenanlagen bei unterschiedlichen Fahrzeugen und Lastfällen (Mittelwerte beziehen sich auf die Lastfälle)

Die Abbildungen liegen in vergleichbaren Bereichen, ungeachtet von der Fahrzeugklasse. Auffällig ist, dass die Trajektorienabbildung bei Kleinwagen schlecht ausfällt. Dies liegt einerseits an der baulichen Asymmetrie, die sich auch bei symmetrischen Tests deutlicher auswirkt und andererseits an hohen Gierraten beim ODB-Versuch. Die Abbildungen von asymmetrischen Tests sind generell deutlich schlechter als jene von symmetrischen Tests. Aus den gezeigten Ergebnissen wird klar, dass auch andere Bewegungsanteile außer der Translation in Fahrzeuginnenrichtung bei Frontalcrashtests einen erheblichen Einfluss auf das Verhalten und die Verletzungswerte eines Insassen haben. Die Unterschiede zwischen einem Gesamtfahrzeugversuch und einem Versuch auf einer Schlittenanlage mit nur einem Freiheitsgrad können so groß werden, dass Fragestellungen der Entwicklung mithilfe solcher Schlittenanlagen

nur bedingt beantwortet werden können. Die Lastfälle FMVSS 208 30° und Small Overlap sind durch die hier gezeigte Methode nicht darstellbar. Aus diesem Grund werden in den folgenden Kapiteln Möglichkeiten eines optimierten Betriebes herkömmlicher Schlittenanlagen sowie Verbesserungen bei Berücksichtigung zusätzlicher Freiheitsgrade behandelt.

5.4 Abbildung von 6DOF-Crashversuchen mit Vorverdrehung

In diesem Kapitel wird eine neue Methode zur Berechnung einer optimalen Schlittenvorverdrehung um die 0Z -Achse aus einer Gesamtfahrzeugbewegung vorgestellt. Weiters wird die dadurch erzielbare Verbesserung der Abbildung eines Gesamtfahrzeugversuchs bei asymmetrischen Crashtests behandelt.

Die Idee der Vorverdrehung betrifft bei Schlittenanlagen im Allgemeinen das Verdrehen der gesamten Karosserie gegenüber dem Schlittenaufbau um die 0Z -Achse, um Effekte der lateralen Bewegungsanteile darstellen zu können. Durch den gegenüber dem lokalen Fahrzeugkoordinatensystem verdrehten Geschwindigkeitsvektor des Dummys bei t_0 ist eine präzise Wahl des Drehwinkels erforderlich, um eine verbesserte Abbildung zu erzielen. Eine korrekte Berechnung des Winkels im Vorfeld, basierend auf einer Versuchsbewegung war bisher schwierig. Natürlich kann eine optimale Vorverdrehung auch durch eine Reihe von Finite-Elemente-Berechnungen ermittelt werden. Das bedeutet aber einen großen zeitlichen Aufwand, der durch eine einfache Berechnungsmethode leicht umgangen werden kann.

Smyth und Smith [42] stellten eine allgemeingültige Methode zur Berechnung von Vorverdrehungswinkeln für Schlittenversuche vor. Diese Methode beruht auf der Bestimmung der „Principal Direction of Force“ (PDOF). Dies ist die momentane Krafrichtung, die vom Kollisionspartner auf ein Fahrzeug wirkt. Sie kann aus Beschleunigungsdaten berechnet werden. Die Krafrichtung wird über den kritischen Zeitbereich der Kollision gemittelt. Die Definition dieses kritischen Zeitbereichs kann aber zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Simulationen eines EuroNCAP-Versuchs mit Vorverdrehungswinkeln, die mit der PDOF-Methode ermittelt wurden, führten nicht zu zufriedenstellenden Resultaten. Aus diesem Grund wurde ein eigenes Verfahren entwickelt.

5.4.1 Regressionsmethode - Berechnung der optimalen Vorverdrehung um die 0Z -Achse

Prinzip

Die vorgestellte Methode basiert auf der Überlagerung konstanter Geschwindigkeiten. Überlagert man einen Crashtest mit einer konstanten Geschwindigkeit, so ändert sich das Ergebnis nicht. Die entstehende Bewegung entspricht nur einer Betrachtung aus einem anderen Inertialsystem. In Abbildung 42 ist das System 1, das sich mit konstanter Geschwindigkeit gegen das System 0 bewegt.

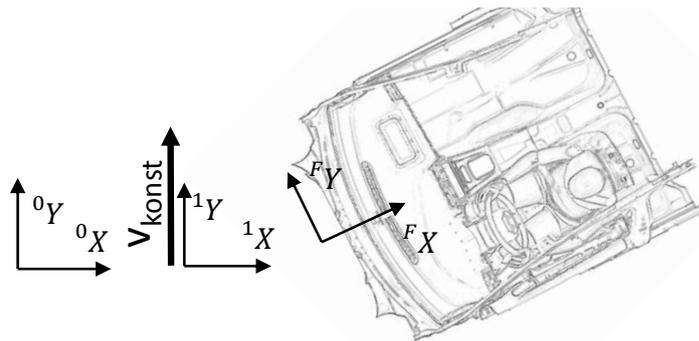


Abbildung 42 Koordinatensysteme bei der Betrachtung einer Geschwindigkeitsüberlagerung für eine Realversuchsbewegung

Der Effekt dieser Betrachtung auf Trajektorien fahrzeugfester Punkte wird in Abbildung 43 veranschaulicht. Hier ist die Projektion eines fahrzeugfesten Punktes, in diesem Fall des Lenkradmittelpunktes (fest mit der Fahrgastzelle verbunden) auf die 1X 1Y -Ebene für den Lastfall EuroNCAP dargestellt.

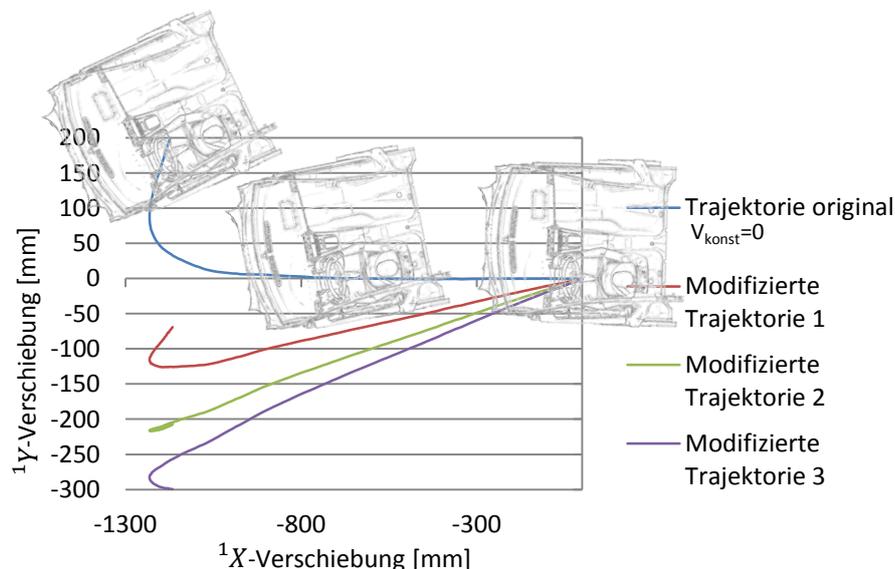


Abbildung 43 Originale und modifizierte Trajektorien des Lenkradmittelpunktes im globalen Koordinatensystem für den Lastfall EuroNCAP (Fahrzeugabbildung nicht maßstabsgetreu)

Bei der Betrachtung im globalen Koordinatensystem (0) beugt sich die Trajektorie mit zunehmender Versuchsdauer nach rechts (linksseitige Barriere). Es ist zu beachten, dass die Geschwindigkeit entlang der Trajektorie abnimmt.

Wird die Bewegung mit einer konstanten Geschwindigkeit in negativer 0Y -Richtung überlagert, verändert sich ihre Form (modifizierte Trajektorien 1-3). Dabei gibt es eine Trajektorie, die einer Geraden sehr nahe kommt. Die ideale Überlagerungsgeschwindigkeit kann durch einen iterativen Prozess berechnet werden.

Gleichen die Fahrzeugtrajektorien in der 1X 1Y -Ebene im Bereich des Dummies einer Geraden, so können Giereffekte auch auf einer Schlittenanlage mit nur einem Freiheitsgrad abgebildet werden, wie nachfolgend gezeigt wird.

Eine Trajektorie, wie in Abbildung 43 dargestellt, sagt aber nichts über den Gierwinkel des Fahrzeugs aus und könnte durch unterschiedliche Fahrzeugbewegungen entstehen. Aus diesem Grund wird von der originalen Trajektorie zu einer „virtuellen Trajektorie“ übergegangen.

Virtuelle Trajektorie

Die virtuelle Trajektorie entsteht aus dem zweifachen Integral der lokalen (im Fahrzeugkoordinatensystem dargestellten) Beschleunigungen des betrachteten Fahrzeugpunktes über der Zeit. Die Transformation zwischen lokalem und globalem System wird nicht durchgeführt. Dabei ist ${}^0\vec{r}_v$ die virtuelle Trajektorie des betrachteten Fahrzeugpunkts im globalen System (0) und ${}^F\vec{a}_p$ die Beschleunigung des betrachteten Punktes P, ins Fahrzeugkoordinatensystem gedreht.

$${}^F\vec{a}_p = \tilde{R}^{-1} {}^0\vec{a}_p \quad (5.2)$$

$${}^0\vec{r}_v = \iint {}^F\vec{a}_p dt^2 \quad (5.3)$$

Eine Rotation des Fahrzeugs wird nicht berücksichtigt, da sie bei der betrachteten Schlittenkonfiguration nicht dargestellt werden könnte. Stattdessen wird versucht, den Dummy innerhalb des Fahrzeugsystems in die richtige Position zu bringen, indem man immer den lokalen Beschleunigungszustand aufbringt. Abbildung 44 zeigt ein Beispiel eines Vergleichs zwischen tatsächlicher Trajektorie und virtueller Trajektorie.

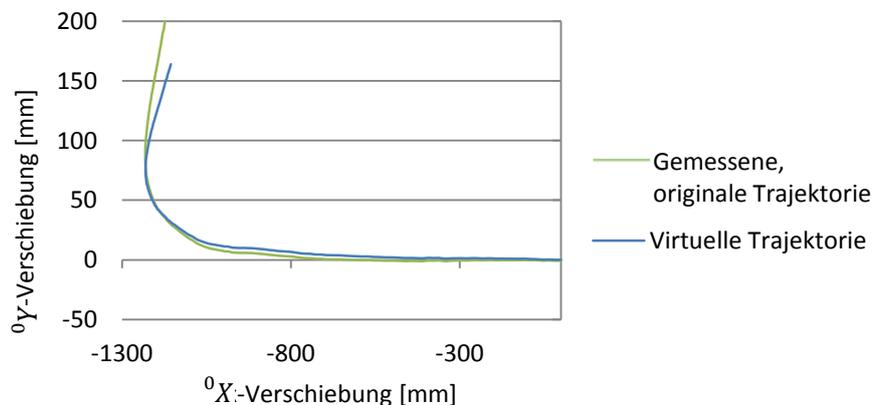


Abbildung 44 Vergleich von originaler Lenkradmittelpunktstrajektorie mit der virtuellen Trajektorie in der ${}^0X {}^0Y$ -Ebene für den Lastfall EuroNCAP

Die virtuelle Trajektorie ist der originalen Trajektorie recht ähnlich. Mit zunehmender Versuchsdauer können sie sich aber deutlich unterscheiden.

Optimierung der Überlagerungsgeschwindigkeit

Die virtuelle Trajektorie wird mit einer konstanten 0Y -Geschwindigkeit überlagert. Das entspricht dem Übergang von System 0 in das System 1 (vgl. Abbildung 42). Die entstehende Trajektorie ${}^1\vec{r}_m(t)$ wird als modifizierte Trajektorie bezeichnet.

$$\begin{pmatrix} {}^1r_{mx}(t) \\ {}^1r_{my}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^0r_{vx}(t) \\ {}^0r_{vy}(t) - v_{konst} \cdot t \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

Der modifizierten Trajektorie wird eine Regressionsgerade eingeschrieben. Da eine Verschiebung zum Zeitpunkt null nicht zulässig ist (bei Nachstellung am Schlitten nicht möglich), wird für die Regressionsgerade zusätzlich die Randbedingung gesetzt, durch den Ursprung zu gehen. Die allgemeine Form der Regressionsgeraden (5.5) vereinfacht sich zu (5.6) mit (5.7) [4], wobei x_i und y_i den berechneten Punkten der modifizierten Trajektorie entsprechen.

$$y = a_0 + a_1x \quad (5.5)$$

$$y = a_1x \quad (5.6)$$

$$a_1 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n x_i} \quad (5.7)$$

Die Ausgangsbewegung (6DOF) liegt nach einem Versuch üblicherweise in zeitparametrisierter Form vor. Das bedeutet, dass sich Punkte am Ende der Trajektorie, wo die Geschwindigkeit sehr gering ist, häufen. Fließen alle Punkte gleichgewichtet in die Berechnung der Regressionsgeraden ein, ist die Bewertung der Geradheit nicht zweckmäßig. Die Trajektorien werden daher wegparametrisiert dargestellt.

Nun wird zwischen der modifizierten Trajektorie und der eingeschriebenen Regressionsgerade die Summe der quadratischen Abweichungen berechnet.

Weiters wird postuliert, dass jene Regressionsgerade, die zu ihrer Trajektorie die geringste Summe der quadratischen Abweichungen aufweist, die optimale Richtung für die Vorverdrehung im Schlittenversuch hat. Der Winkel zwischen der Regressionsgeraden und der x-Achse ist der Winkel der einzustellenden Vorverdrehung.

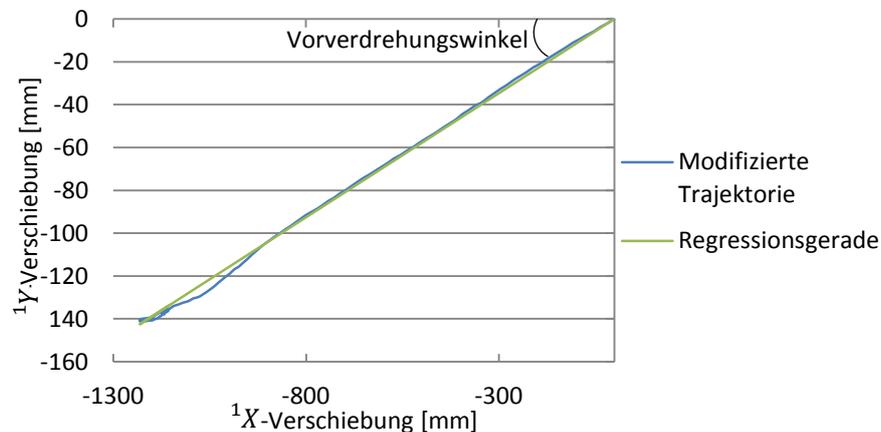


Abbildung 45 Modifizierte virtuelle Trajektorie mit zugehöriger Regressionsgerade für den Lastfall EuroNCAP

Von großer Bedeutung ist der betrachtete Punkt im Fahrzeug. Es stellt sich heraus, dass der Mittelpunkt des Lenkrades (in Initialposition) den gesamten Dummy gut repräsentiert, wobei verschiedene Positionen in der ${}^F X {}^F Z$ -Ebene in Bereichen, die vom Dummy während der Versuchsdauer eingenommen werden, untersucht wurden. Will man nur einen Bereich des Dummys gut darstellen, zeigt sich, dass im Beckenbereich höhere Vorverdrehungen nötig sind als für den Kopfbereich. Später wird anhand eines Beispiels die Verteilung der berechneten Vorverdrehungen in der ${}^F X {}^F Z$ -Ebene gezeigt (Abbildung 48). Des Weiteren wird klar, dass durch

diese Methode nicht mehrere Sitzpositionen (z.B. Fahrer + Beifahrer) durch nur einen Test exakt abgebildet werden können. Die Differenzen der berechneten Vorverdrehungswinkel zwischen Fahrer und Beifahrer sind aber moderat und betragen bis zu $0,5^\circ$. Wenn es nicht möglich ist, beide Positionen adäquat abzubilden, ist für manche Fragestellungen mit der doppelten Versuchsanzahl zu rechnen.

Aus den angestellten Überlegungen leitet sich auch die notwendige Veränderung des verwendeten Beschleunigungspulses ab. Die Überlagerung mit einer lateralen Geschwindigkeit führt nicht zu einer Veränderung eines Versuchsausganges. Um eine sinnvolle Ausgangsgeschwindigkeit sowie einen sinnvollen Beschleunigungsverlauf zu erhalten, müssen die 1Y -Komponenten vektoriell zu den bisherigen Werten des Schlittenversuchs addiert werden. So können sie in Richtung der Anlaufspur aufgeprägt werden. Das bedeutet, dass Anfahrtsgeschwindigkeit und Beschleunigungsverlauf in der lokalen FX -Richtung des Fahrzeugs gleich bleiben. Das Δv von Schlittenversuchen mit und ohne Vorverdrehung stimmt nicht überein.

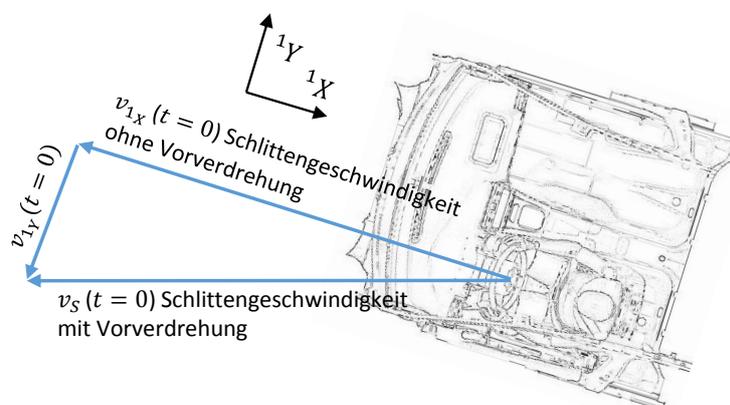


Abbildung 46 Geschwindigkeiten zu t_0 bei einem Schlittenversuch mit Vorverdrehung

Wie später gezeigt wird, führt diese Methode für die meisten Bewegungen unterschiedlicher Fahrzeuge bei den Lastfällen EuroNCAP und FMVSS 208 30° zu einer hinreichend genauen Vorhersage des idealen Vorverdrehungswinkels. In einigen Fällen der Lastfälle FMVSS 208 30° und Small Overlap kommt es aber zu Abweichungen. Durch Einführung einer weiteren Geraden kann das erklärt werden:

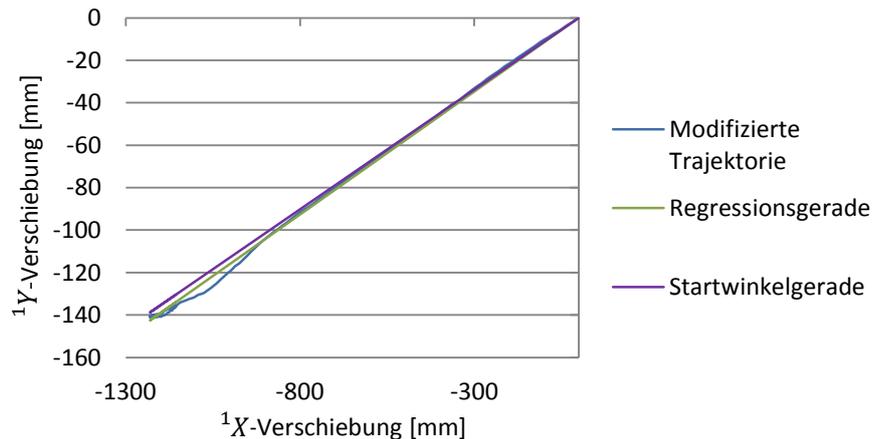


Abbildung 47 Modifizierte virtuelle Trajektorie, Regressionsgerade und Startwinkelgerade für den Lastfall EuroNCAP

In Abbildung 47 ist zusätzlich eine Startwinkelgerade dargestellt. Sie ist die Tangente an die modifizierte Trajektorie im Punkt (0|0). Weichen die Startwinkelgerade und die Regressionsgerade stark voneinander ab, so haben die beiden verglichenen Versuche (modifizierter Realversuch und vorverdrehter Schlittenversuch) zum Zeitpunkt null unterschiedliche Geschwindigkeitsvektoren. Besonders im Bereich des Dummykopfes entsteht so ein Trajektorienfehler. Bei großen Startwinkel Fehlern muss also von der Methode der kleinsten Summe der quadratischen Abweichungen abgesehen und der Startwinkel berücksichtigt werden.

Vor allem beim Lastfall FMVSS 208 30°, bei dem die Abbildung des Gesamtfahrzeugversuchs von der richtigen Lage des Trefferpunktes des Kopfes an der A-Säule (bzw. am Curtain-Airbag) abhängt, ist es sinnvoll, im kritischen Zeitpunkt die Startwinkelgerade mit der modifizierten Trajektorie schneiden zu lassen, um die richtige Vorverdrehung zu berechnen. Bei Kontakten mit kleinen Winkeln zwischen der Oberfläche der A-Säulenverkleidung und der Kopftrajektorie ist eine hohe Genauigkeit wichtig. Für eine gute Abschätzung des Trefferpunktes kommen weitere Aspekte, wie die Differenz von Kopftrajektorienlänge und der Länge der Trajektorie des Trefferpunktes sowie der Rollwinkel hinzu.

Derzeit ist die Bestimmung der korrekten Vorverdrehung für diesen Fall mit Erfahrung verbunden. Die Weiterentwicklung des gezeigten Prinzips zu einer allgemeingültigen Berechnungsmethode ist aber möglich.

5.4.2 Verbesserte Abbildung durch Vorverdrehung um die 0Z -Achse beim Lastfall EuroNCAP

Bisherige Überlegungen erklären eine physikalische „Nähe“ zwischen einem Gesamtfahrzeugversuch und einem Schlittenversuch mit Vorverdrehung im Vergleich zu einem Schlittenversuch ohne Vorverdrehung. Es erklärt aber auch, dass nicht für alle Bereiche eines Dummys die optimale Vorverdrehung gleich ist. Verwendet man einen anderen Referenzpunkt als den Lenkradmittelpunkt, verändert sich auch der berechnete Vorverdrehungswinkel. Abbildung 48 zeigt den Verlauf der berechneten Vorverdrehungswinkel bei unterschiedlichen Referenzpunkten aus einem Bereich der Dummymittelebene. Die Referenzpunkte bewegen sich im Fahrzeugsystem nicht. Punkte weiter hinten im Fahrzeug erfahren durch die Gierbewegung größere 0Y -Verschiebungen, wodurch hier größere Vorverdrehungswinkel berechnet werden.

Die Veränderung der Vorverdrehungswinkel mit der FZ -Position lässt sich sowohl auf Nick- als auch auf Wankbewegungen zurückführen.

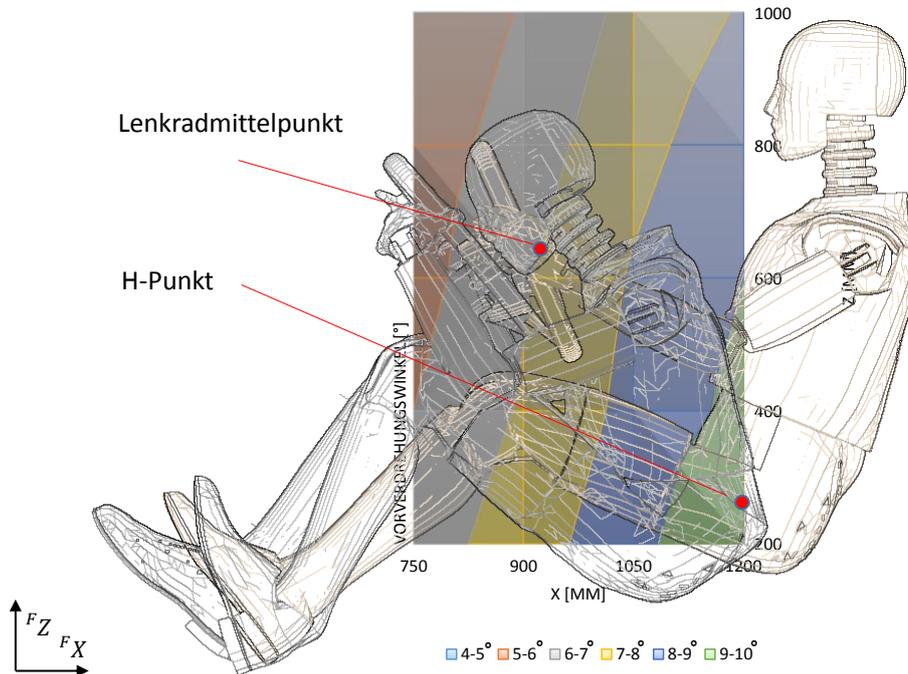


Abbildung 48 Berechnete Vorverdrehungswinkel für einen relevanten Bereich der Dummymittelebene

Die Berechnung der optimalen Vorverdrehung für einen Versuch eines ausgewählten Fahrzeugs und dem Lenkradmittelpunkt als Betrachtungspunkt ergibt $7,2^\circ$. Aufgrund der berechneten Winkel im relevanten Bereich wurden für eine Variationsrechnung FE-Analysen mit den Winkeln 6° , 7° , 8° , 9° und 10° durchgeführt (Abbildung 49, Abbildung 50).

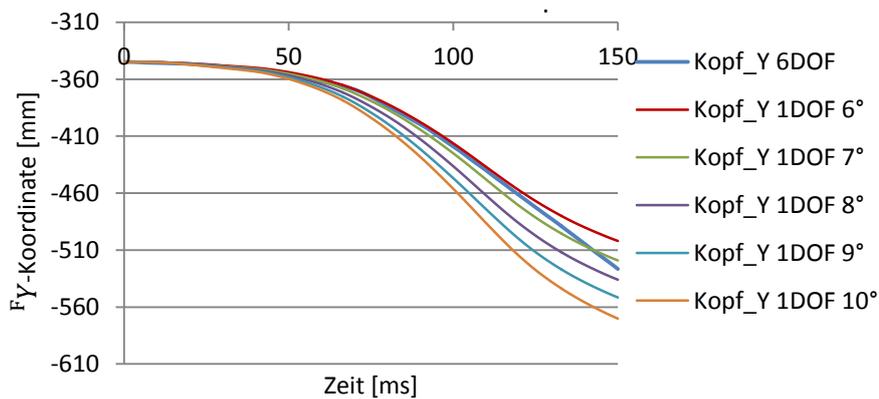


Abbildung 49 Zeitlicher Verlauf der lokalen FY -Koordinate des Kopfes bei verschiedenen Vorverdrehungswinkeln

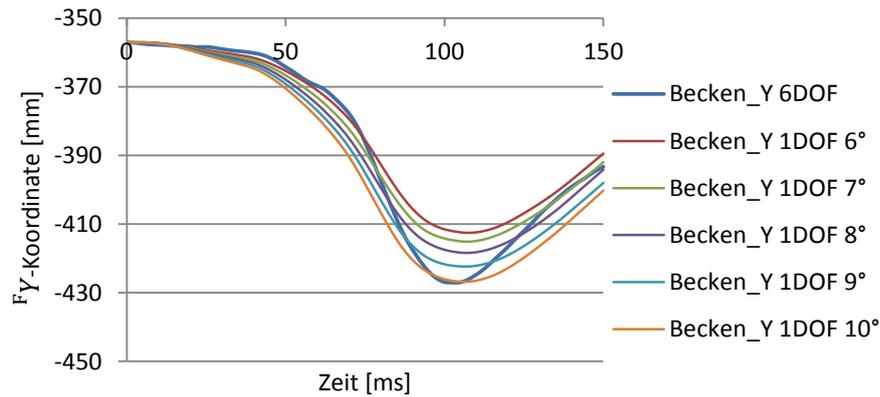


Abbildung 50 Zeitlicher Verlauf der F_Y -Koordinate des Beckens bei verschiedenen Vorverdrehungswinkeln

Beim Verlauf der F_Y -Koordinate des Kopfes liegt die originale Bahn der Simulation mit sechs Freiheitsgraden zwischen den Simulationen mit 6° bzw. 7° Vorverdrehung. Im Bereich des Beckens ist das nicht so eindeutig. Mit den Winkeln von 6° bis 10° sind aber alle sinnvollen Verläufe abgedeckt. Aufschluss über die Aussagekraft der Vorverdrehungsberechnung gibt die Analyse der Abbildungsgüten für die Dummybelastung und Trajektorienabbildung mit Hilfe des CORA-Tools (Tabelle 12).

Tabelle 12 Durch CORA berechnete Abbildungswerte für verschiedene Vorverdrehungen bei einem Versuch im Lastfall EuroNCAP

Abbildung 6DOF durch 1DOF	Belastungen	Trajektorien
0°	0,594	0,556
6°	0,763	0,813
7°	0,766	0,832
8°	0,768	0,804
9°	0,756	0,783
10°	0,736	0,744

In Tabelle 12 wird deutlich, dass die Regressionsmethode mit $7,2^\circ$ einen sehr guten Vorverdrehungswinkel errechnet. Bei Abbildungswerten der Belastungen liegt die Simulation mit 8° marginal über der mit 7° . Bei den Trajektorien wird aber mit 7° der höchste Wert erreicht.

Im Vergleich mit den Werten ohne Vorverdrehung (Kapitel 5.3) wird deutlich, dass die Vorverdrehung die Abbildung eines EuroNCAP-Gesamtfahrzeugversuchs signifikant erhöht. Die Abbildungswerte bleiben bei Abweichungen vom optimalen Winkel stabil.

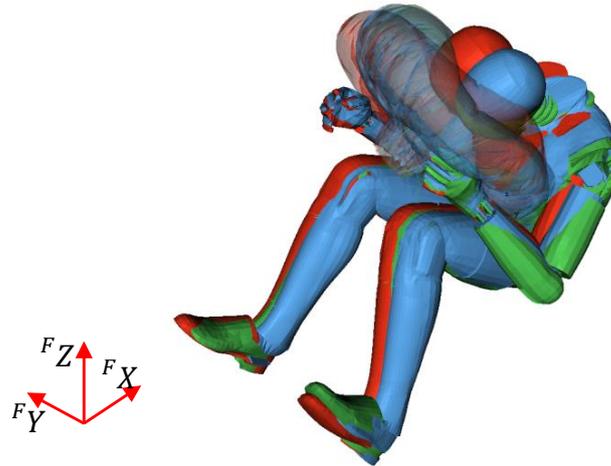


Abbildung 51 Vergleich der Dummypositionen verschiedener Simulationen für den Lastfall EuroNCAP: grün=6 Freiheitsgrade; rot=1 Freiheitsgrad ohne Vorverdrehung; blau=1 Freiheitsgrad mit Vorverdrehung

Abbildung 51 zeigt die Kompensation von gierbewegungsbedingten Dummyverlagerungen durch Vorverdrehung. Die Abbildungsgüte eines EuroNCAP Versuchs auf einer Schlittenanlage kann also durch Vorverdrehung auf das Niveau eines USNCAP Versuchs angehoben werden.

Die Anwendbarkeit der Methode der minimalen Summe der quadratischen Abweichungen zur Regressionsgerade für den Lastfall EuroNCAP bestätigt sich auch bei anderen Fahrzeugen. Die Erhöhung der Abbildungswerte im Vergleich zu Simulationen ohne Vorverdrehung ist dabei immer ähnlich groß (Tabelle 13).

Tabelle 13 Durch CORA berechnete Abbildungswerte von Schlittenversuchen mit und ohne Vorverdrehung für verschiedene Fahrzeugklassen im Lastfall EuroNCAP

<i>Abbildung 6DOF durch 1DOF</i>		<i>Belastungen</i>	<i>Trajektorien</i>
Mittelklasse	ohne Vorverdrehung	0,594	0,556
	mit Vorverdrehung	0,766 (+29 %)	0,832 (+50 %)
Kleinwagen	ohne Vorverdrehung	0,603	0,424
	mit Vorverdrehung	0,707 (+17 %)	0,642 (+51 %)
SUV	ohne Vorverdrehung	0,673	0,603
	mit Vorverdrehung	0,704 (+5 %)	0,825 (+37 %)

Bei der Anwendung von Vorverdrehung ist zu beachten, dass die optimalen Vorverdrehungswinkel für verschiedene Versuche desselben Fahrzeugmodells um mehr als ein Grad variieren können. Die Winkel für die betrachteten Modelle lagen zwischen fünf und neun Grad. Große Gierwinkel (vorwiegend bei kleinen Fahrzeugen) führen dabei nicht zu großen Vorverdrehungswinkeln. Wichtiger ist der Abstand zwischen Barriere und Dummy, der mit zunehmender Fahrzeuggröße zu einer erhöhten lateralen Verschiebung des Dummies führt.

5.4.3 Verbesserte Abbildung durch Vorverdrehung um die ⁰Z-Achse beim Lastfall FMVSS 208 30°

Bei diesem Lastfall sind wesentlich größere Vorverdrehungen vorzusehen. Die durchgeführten Untersuchungen basieren auf der Annahme, dass zwischen Kopf und A-Säule ein Kontakt

entsteht, also ohne die Berücksichtigung eines Curtain-Airbags. Für Fragestellungen der Fahrzeugentwicklung wird großer Wert auf die korrekte Abbildung dieses Kontaktes gelegt.

Am Beispiel eines Mittelklasse-Modells führt die Vorverdrehungsberechnung zu einem Verdrehwinkel von 19,0°. Wiederum wurde eine Variationsrechnung durchgeführt. Das betrachtete Intervall erstreckt sich von 13° - 21°.

Tabelle 14 Durch CORA berechnete Abbildungswerte für verschiedene Vorverdrehungen bei einem Versuch im Lastfall FMVSS 208 30°

<i>Abbildung 6DOF durch 1DOF</i>	<i>Belastungen</i>	<i>Trajektorien</i>
0°	0,687	0,411
13°	0,567	0,607
15°	0,643	0,693
17°	0,740	0,752
19°	0,715	0,758
21°	0,674	0,724

Das Maximum der Abbildung der Dummybelastung ist bereits bei 17° erreicht (Tabelle 14). Das Maximum der Trajektorien ist aber bei dem berechneten Wert von 19° zu finden. Die Abbildung der Belastungen bei 13° ist sogar geringer als ohne Vorverdrehung. Durch den sehr schlechten Wert der Trajektorienabbildung ohne Vorverdrehung ist aber der Gesamtfahrzeugversuch mit einem Schlittenversuch ohne Vorverdrehung kaum vergleichbar. Für eine genauere Beurteilung der Kopfproblematik werden die Abbildungen von Kopfbelastung und Kopftrajektorie gesondert dargestellt (Tabelle 15).

Tabelle 15 Durch CORA berechnete Abbildungswerte im Kopf-Nackbereich für verschiedene Vorverdrehungen bei einem Versuch im Lastfall FMVSS 208 30°

<i>Abbildung 6DOF durch 1DOF</i>	<i>Kopfbeschleunigung</i>	<i>Nackenscherkraft</i>	<i>Nackenzugkraft</i>	<i>Nackentmoment</i>	<i>Kopf-Trajektorie (y)</i>
0°	0,866	0,426	0,242	0,602	0,012
13°	0,681	0,203	0,371	0,355	0,580
15°	0,661	0,337	0,523	0,465	0,770
17°	0,780	0,604	0,858	0,620	0,912
19°	0,736	0,514	0,758	0,656	1,000
21°	0,659	0,482	0,616	0,757	0,906

Die Form der Kopfbeschleunigungskurve macht es bei diesem Test unmöglich, für die Berechnung der Abbildung ohne Vorverdrehung die Korridormethode anzuwenden. Die Kreuzkorrelationsmethode ergibt für 0° einen sehr guten Abbildungswert, obwohl die Kurvenverläufe nicht übereinstimmen. Bei den Simulationen mit Vorverdrehung sind die Werte vergleichbar und die Verläufe unterscheiden sich hauptsächlich in Zeitpunkt und Höhe des Hauptpeaks bei Kontakt.

Die für einen guten Trefferpunkt entscheidende $^F Y$ -Komponente der Kopftrajektorie lässt sich mit der berechneten Vorverdrehung sehr gut abbilden. Die Abbildung der Kopf- und Nackenbelastungen ist bei 17° etwas besser.

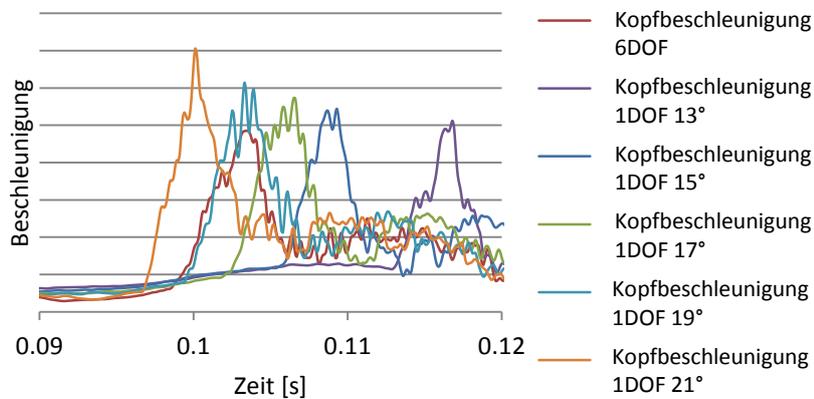


Abbildung 52 Kopfbeschleunigungen bei verschiedenen Vorverdrehungen bei einem Versuch im Lastfall FMVSS 208 30°

Abbildung 52 zeigt simulierte Kopfbeschleunigungen bei unterschiedlichen Vorverdrehungen sowie die Basis (6DOF). Durch eine nicht adäquate Abbildung der A-Säulenverkleidung im verwendeten Modell (Starrkörper) ist die Höhe der Peaks im Gegensatz zum Zeitpunkt nicht auf einen Realversuch übertragbar. Es ist ersichtlich, dass nur die Simulation mit den errechneten 19° Vorverdrehung den Zeitpunkt und damit den Ort des Kontaktes korrekt wiedergibt. Der zeitliche Fehler pro abweichendem Grad liegt bei 2-3 ms.

Die Regressionsmethode zur Berechnung der optimalen Schlittenvorverdrehung scheint also auch für den Lastfall FMVSS 208 30° zulässig zu sein. Die erreichbaren Abbildungswerte sind nicht schlechter als jene des entsprechenden symmetrischen 0° -Versuchs (FMVSS 208 0°).

Die Allgemeingültigkeit der Regressionsmethode konnte im Fall von FMVSS 208 30° nicht bestätigt werden. Bei einem anderen Fahrzeug trat eine Differenz zwischen Vorverdrehungsberechnung und dem besten Ergebnis der FE-Analyse von 2° auf. Erklären lässt sich das mit dem beschriebenen Startwinkelfehler (Abbildung 47). In folgender Abbildung ist das Dummyverhalten von Schlittenversuch und Gesamtfahrzeugversuch im globalen Koordinatensystem gegenübergestellt. Dem Gesamtfahrzeugversuch wurde aber die erforderliche Lateralgeschwindigkeit hinzugefügt (Simulation beschreibt die modifizierte Trajektorie, 6DOF im System 1).

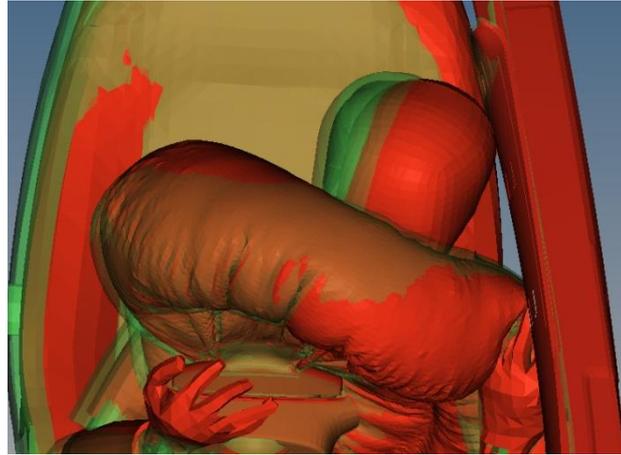


Abbildung 53 Dummypositionen bei transformiertem Gesamtfahrzeugversuch (im 1-System, grün) und vorverdrehtem Schlittenversuch (rot) im Lastfall FMVSS 208 30° bei berechneter Vorverdrehung (13°)

Wie Abbildung 53 zeigt, wurde die Berechnung der Vorverdrehung für das Fahrzeug richtig angewendet. Die A-Säulen der Fahrzeuge der Simulationen mit sechs Freiheitsgraden (+ laterale Überlagerungsgeschwindigkeit) sowie einem Freiheitsgrad und Vorverdrehung sind nahezu deckungsgleich. Die Kopfkonturen der beiden Dummies weichen aber deutlich voneinander ab. Dies liegt am Startwinkelfehler. Durch den geringen Winkel zwischen lokaler Trajektorie des Berührungspunkts auf der Kopfkontur und der Oberfläche der A-Säulenverkleidung entsteht ein sehr großer Abstand zwischen den Auftreffpunkten von ca. 130 mm.

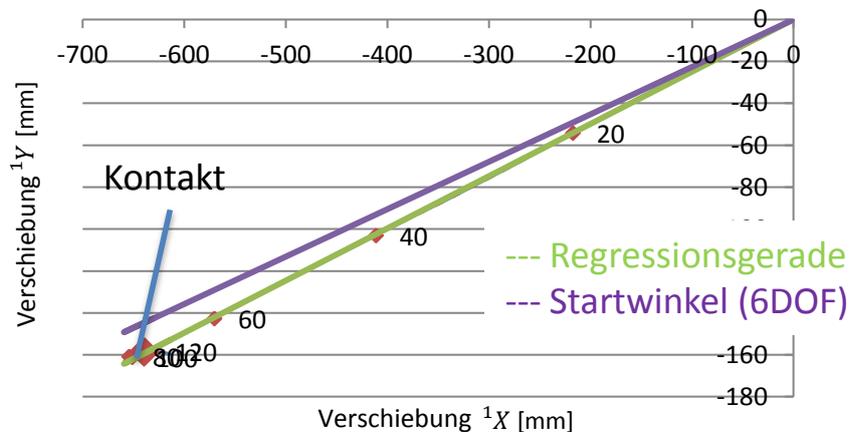


Abbildung 54 Modifizierte virtuelle Trajektorie, Regressionsgerade und Startwinkelgerade bei einem Versuch im Lastfall FMVSS 208 30° und berechneter Vorverdrehung

Dieser Versuch weist einen deutlichen Startwinkelfehler auf (ca. 1,3°, Abbildung 54). Durch den Startwinkelfehler hat der Dummykopf der mit einer lateralen Geschwindigkeit überlagerten Simulation mit sechs Freiheitsgraden zum Zeitpunkt null einen anderen Geschwindigkeitsvektor als jener in der Simulation mit einem Freiheitsgrad und Vorverdrehung. So entsteht zum Zeitpunkt des Kontaktes ein lokaler Trajektorienfehler, und das Kopfverhalten kann nicht korrekt abgebildet werden. Eine Verminderung der Vorverdrehung um 2° (entspricht nicht dem Startwinkelfehler) führt zu einer sehr guten Abbildung.

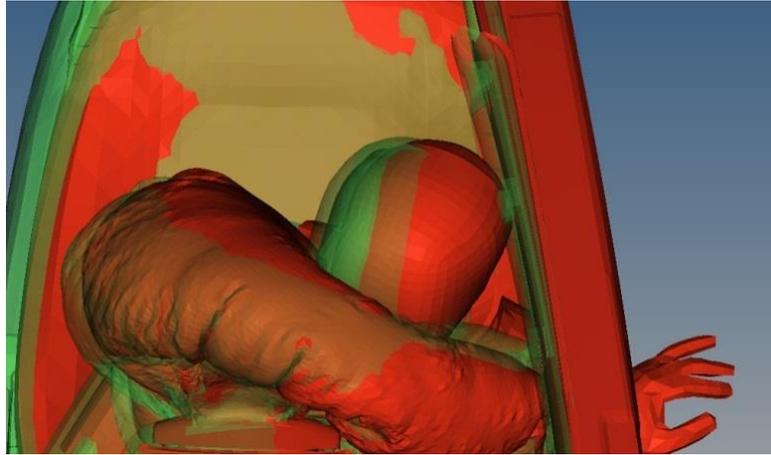


Abbildung 55 Dummypositionen bei transformiertem Gesamtfahrzeugversuch (im 1-System, grün) und vorverdrehtem Schlittenversuch (rot) im Lastfall FMVSS 208 30° bei optimaler Vorverdrehung (11°)

Bei verminderter Vorverdrehung bleibt der Abstand der Dummyköpfe erhalten. Allerdings entsteht nun auch zwischen den beiden Fahrzeugen ein Abstand derselben Größe. Der Startwinkelfehler des Dummykopfes lässt sich also durch einen Fehler der Fahrzeugbewegung ausgleichen (Abbildung 55).

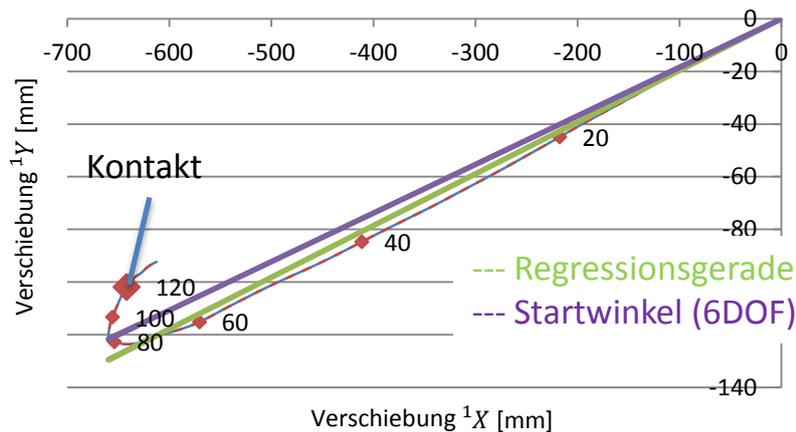


Abbildung 56 Modifizierte virtuelle Trajektorie, Regressionsgerade und Startwinkelgerade bei einem Versuch im Lastfall FMVSS 208 30° und optimaler Vorverdrehung

Die modifizierte virtuelle Trajektorie in Abbildung 56 weicht deutlich von der erzielbaren Geradheit (vgl. Abbildung 54) ab. Dafür schneidet sie im kritischen Zeitbereich die Startwinkelgerade. Der Schnittpunkt ist dem Zeitpunkt des Kontaktes nicht zugeordnet. Der Abstand zwischen modifizierter Trajektorie und Startwinkelgerade muss deutlich überkompensiert werden. Eine Methode, die das berücksichtigt wird Kontaktpunktmethode genannt.

5.4.4 Kontaktpunktmethode – Erweiterung der Regressionsmethode

Der Dummykopf legt einen deutlich längeren Weg zurück als der Kontaktpunkt des Fahrzeugs. Das führt auf folgende Überlegung, Abbildung 57.

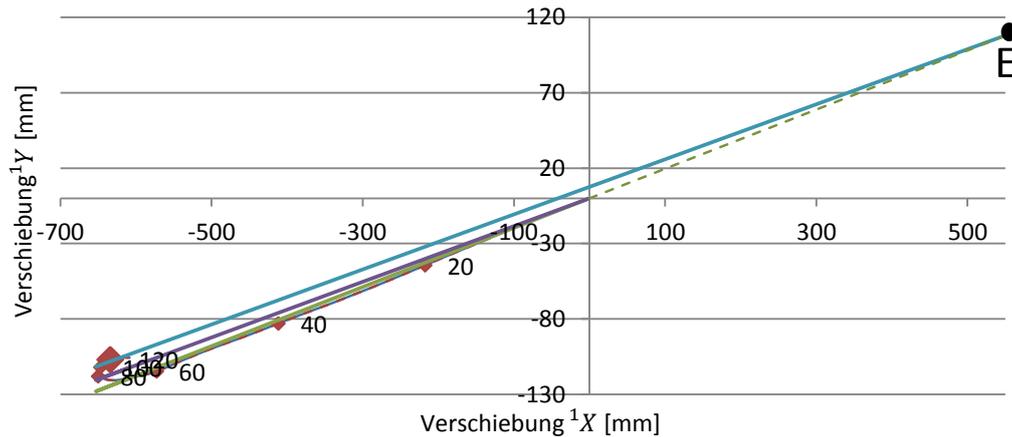


Abbildung 57 Modifizierte virtuelle Trajektorie, Regressionsgerade, Startwinkelgerade und Parallelverschiebung bei einem Versuch im Lastfall FMVSS 208 30° und optimaler Vorverdrehung

Wird die Regressionsgerade um den Abstand der Initialpositionen zwischen Kopf und Kontaktpunkt in den ersten Quadranten verlängert und die Startwinkelgerade parallel verschoben, so dass sie den entstandenen Punkt trifft, so schneidet sie die modifizierte Trajektorie genau im Kontaktpunkt. Der Punkt E ist ein Ersatzpunkt für die Kopfbewegung. Er schlägt gleichzeitig mit der Kopfkontur am Kontaktpunkt an, ohne durch externe Kräfte (Nacken, Airbag) beeinflusst zu werden. Ist dieser Punkt für sechs Freiheitsgrade sowie für einen Freiheitsgrad identisch, ist die gesuchte Vorverdrehung gefunden. Dieser Punkt ist aber von der überlagerten lateralen Geschwindigkeit unabhängig. Nun wird der Zusammenhang zwischen Regressionsgerade und Trajektorie gelöst. Die grüne Gerade beschreibt nur mehr den Schlittenwinkel.

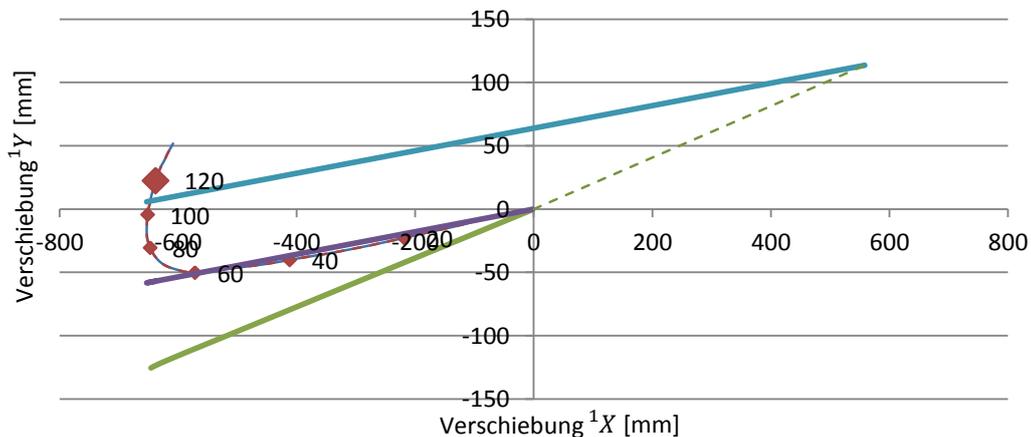


Abbildung 58 Modifizierte virtuelle Trajektorie, Schlittenwinkel, Startwinkelgerade und Parallelverschiebung bei einem Versuch im Lastfall FMVSS 208 30° bei verminderter Überlagerung

Offensichtlich ist die Bestimmung des optimalen Vorverdrehungswinkels nun mit jeder beliebigen Überlagerungsgeschwindigkeit möglich, wenn vom Kontaktpunkt aus eine Gerade mit dem Startwinkel gelegt und so nach hinten gezogen wird, dass der Abstand zwischen Kopf und Kontaktpunkt gleich dem Abstand des Endpunkts der Strecke und dem Nullpunkt ist (Abbildung 58). Die Gerade durch diesen Punkt und den Nullpunkt beschreibt die optimale Vorverdrehung.

Es ist zu beachten, dass durch die Loslösung der Schlittenwinkelgerade von der modifizierten Trajektorie Information über die Möglichkeit der Annäherung der Trajektorie an eine Gerade verloren geht. Des Weiteren wirkt sich eine fehlerhafte Bestimmung des Kontaktzeitpunktes sehr sensitiv auf die Bestimmung des Vorverdrehungswinkels aus. Es ist also die Methode nach Abbildung 57 vorzuziehen.

Die spezielle Aufgabe einer Abbildung eines Kontaktpunktes erfordert also eine genaue Betrachtung des Systems aus modifizierter virtueller Trajektorie, Regression und Startwinkelgerade des betreffenden Körperteils. Die vergleichsweise einfache Regressionsmethode ist hier nicht mehr ausreichend.

5.4.5 Verbesserte Abbildung durch Vorverdrehung um die 0Z -Achse beim Lastfall „Small Overlap“

Bei der Berechnung der optimalen Vorverdrehung für einen Small-Overlap Versuch mit der Regressionsgerade wirken sich Richtungswechsel von Bewegungsanteilen negativ aus. Meist ist die Gierwinkelgeschwindigkeit zu Beginn negativ und geht bei Kontakt der Barriere mit festen Teilen der Radaufhängung oder der Spritzwand ins Positive. Eine Annäherung einer Fahrzeugtrajektorie an eine Gerade ist dadurch nur mehr mit Einschränkungen möglich (Abbildung 59).

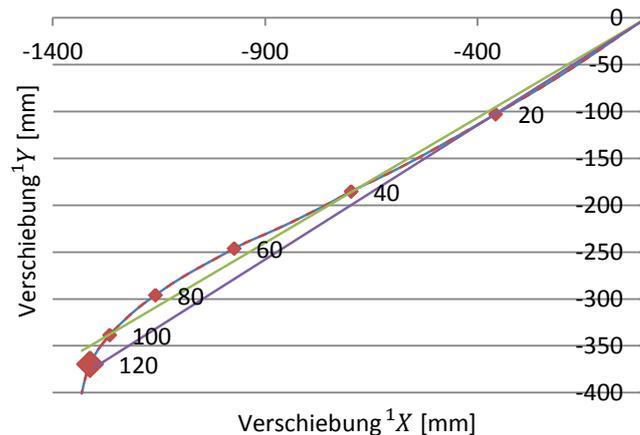


Abbildung 59 Modifizierte virtuelle Trajektorie, Regressionsgerade und Startwinkelgerade bei einem Versuch im Lastfall Small Overlap

Die modifizierte Trajektorie hat eine starke „S-Form“. Dadurch sind Abweichungen von der Regressionsgeraden unausweichlich. Der maximale Abstand zwischen Regressionsgerade und Trajektorie beträgt je nach Fahrzeug 10 bis 60 mm. Zusätzlich treten Startwinkelfehler bis zu 1° auf.

Trotz des Problems der Optimierbarkeit können auch bei diesem Test verbesserte Abbildungswerte erzielt werden. Die Berechnung der Vorverdrehung mithilfe der Regressionsmethode ergibt 13° .

Tabelle 16 Durch CORA berechnete Abbildungswerte für verschiedene Vorverdrehungen bei einem Versuch im Lastfall Small Overlap

Abbildung 6DOF durch 1DOF	Belastungen	Trajektorien
0°	0,667	0,479
13°	0,612	0,642
15°	0,639	0,709
17°	0,715	0,763
19°	0,736	0,797

Die beste Abbildung wird bei einer wesentlich größeren Vorverdrehung als den errechneten 13° erzielt (Tabelle 16). Höhere Vorverdrehungen als 19° machen hier keinen Sinn, da dann die Geschwindigkeitsvektoren der Fahrzeuge (sechs Freiheitsgrade transformiert, ein Freiheitsgrad vorverdrehen) am Ende des Versuchs so unterschiedlich werden, dass im Kopfbereich fehlerhafte Kontakte entstehen. Für eine Berechnung der großen Vorverdrehung mit 19° muss wie bei FMVSS 208 30° ein kritischer Bereich definiert werden, für den die Verhältnisse optimiert werden. Dann ist aber eine sehr gute Gesamtabbildung möglich. Leider ist hier die Homogenität der Einzelabbildungen nicht gegeben. So haben Nackenwerte eine sehr schlechte Abbildung (teilweise unter 0,4). Auch die Dummytrajektorien weichen entsprechend der Differenz zwischen Fahrzeugtrajektorie und Regressionsgerade voneinander ab, so dass eine Abstandsprognose zwischen Dummy und Fahrzeugbauteilen zeitabhängig um bis zu 40 mm abweicht. Diese Abstände sind bei dem Lastfall Small Overlap aber entscheidender als bei anderen Lastfällen.

5.4.6 Zusammenfassung

Vorverdrehung ist bei Schlittenanlagen mit einem Freiheitsgrad für alle asymmetrischen Versuchskonfigurationen ein wichtiges Hilfsmittel zur Verbesserung der Abbildung eines Gesamtfahrzeugversuchs. Bei allen Konfigurationen können die Effekte der Gierbewegung auf den Dummy weitgehend dargestellt werden (Abbildung 60).

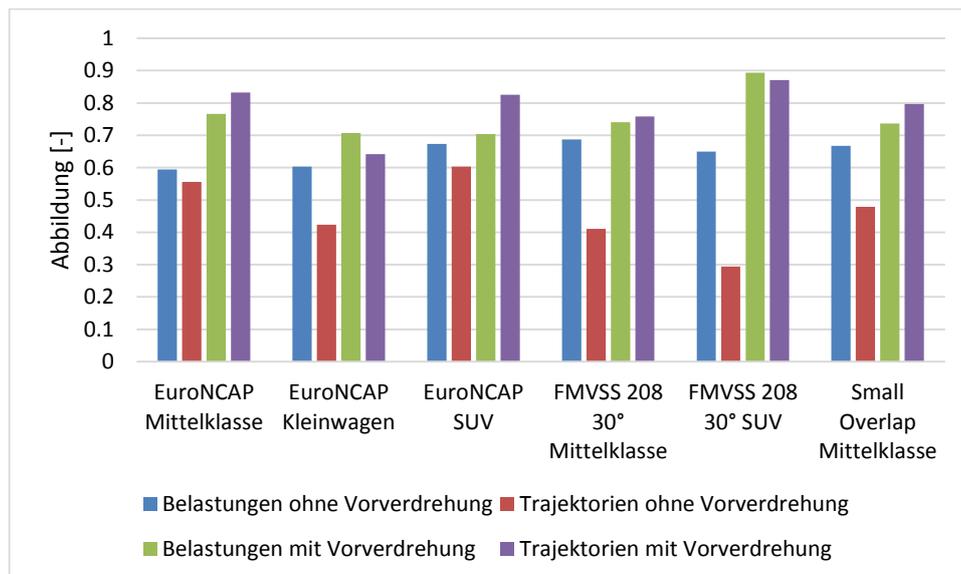


Abbildung 60 Zusammenfassung von Abbildungswerten von 1DOF-Schlittenanlagen mit und ohne Vorverdrehung bei unterschiedlichen Fahrzeugen und Lastfällen

Bei EuroNCAP Versuchen erhöht sich durch Vorverdrehung die Abbildung auf einer Schlittenanlage mit einem Freiheitsgrad auf das Niveau von USNCAP Versuchen. Die Regressionsmethode bei transformierter Bewegung für die Berechnung der Vorverdrehung ist ausreichend und liefert bei unterschiedlichsten Versuchen und Fahrzeugmodellen einen sehr guten Wert.

Auch beim Lastfall FMVSS 208 30° kann die Abbildung auf das Niveau der Konfiguration FMVSS 208 0° angehoben werden. Für die richtige Voraussage des Vorverdrehungswinkels ist aber die Betrachtung des Startwinkelfehlers notwendig, deshalb sollte hier die etwas aufwändigere Kontaktpunktmethode verwendet werden.

Gute Abbildungen können auch bei Small Overlap erzielt werden. Allerdings ist die Berechnung der optimalen Vorverdrehung aufgrund der Form der Fahrzeugtrajektorien schwierig. Von der guten Gesamtabbildung kann hier nicht auf Detailfragestellungen geschlossen werden. Einzelwerte des Nackens sowie Abstände werden teilweise nur unzureichend abgebildet.

5.4.7 Abbildung bei Vorverdrehung um die 0Y -Achse am Beispiel USNCAP

Die Möglichkeit der Abbildung von Giereffekten durch Vorverdrehung führt auf die Frage der Anwendung in der 0X 0Z -Ebene zur Abbildung von Nickeffekten. Eine Überlagerung einer Fahrzeugbewegung mit einer konstanten 0Z -Geschwindigkeit ist legitim (Abbildung 61).

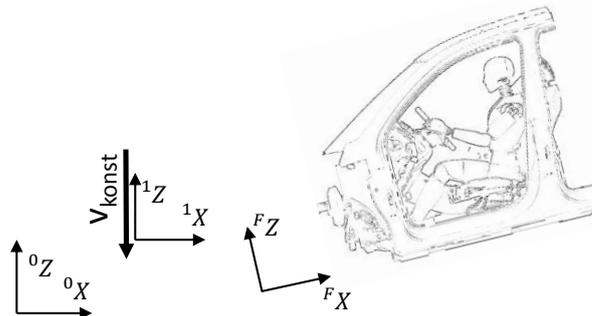


Abbildung 61 Koordinatensysteme bei der Betrachtung einer Geschwindigkeitsüberlagerung in 0Z -Richtung für eine Realversuchsbewegung

Bei der Anwendung auf einer herkömmlichen Schlittenanlage stimmt dann aber die Orientierung des Schwerfelds der Erde nicht mehr. Die Transformation der Trajektorie eines Fahrzeugpunktes in der Nähe des Insassen zeigt, dass Nickbewegungen nicht die notwendigen Eigenschaften für eine Vorverdrehung aufweisen (Abbildung 62).

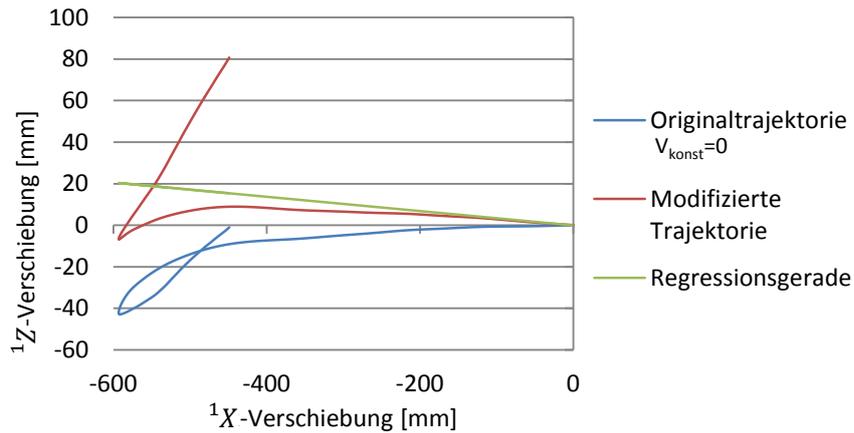


Abbildung 62 Originaltrajektorie, modifizierte Trajektorie und Regressionsgerade für einen insassennahen Fahrzeugpunkt in der 0X 0Z -Ebene im Lastfall USNCAP

Die Trajektorie hat in dieser Ebene keinen Verlauf, der eine Transformation hin zu einer Geraden wie in der 0X 0Z -Ebene zulassen würde. Das liegt am Rebound der Nickbewegung. Zwar kann der Bereich vor der Bewegungsumkehr einer Geraden angenähert werden, der Bereich danach ist dann aber umso schlechter abgebildet.

Für die weitere Verifikation wurden Simulationen mit positiven und negativen Vorverdrehungen um die 0Y -Achse durchgeführt (Abbildung 63).

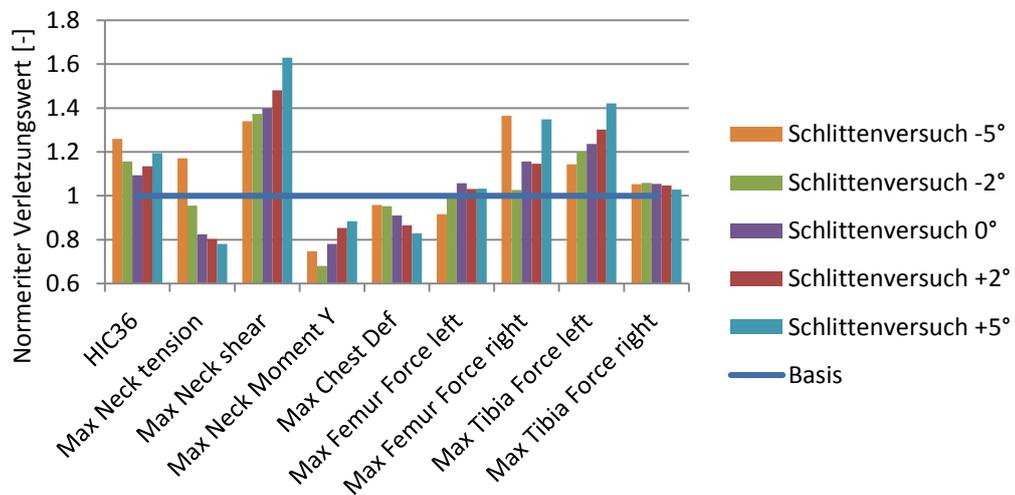


Abbildung 63 Normierte Verletzungswerte bei Vorverdrehungen um die 0Y -Achse beim Lastfall USNCAP

Im Kopfbereich tritt bei Vorverdrehungen in beide Richtungen eine Verschlechterung der Prognose der Verletzungswerte auf. Verbesserungen einzelner Werte sind natürlich möglich, die Abbildung des Verlaufs verbessert sich aber nicht.

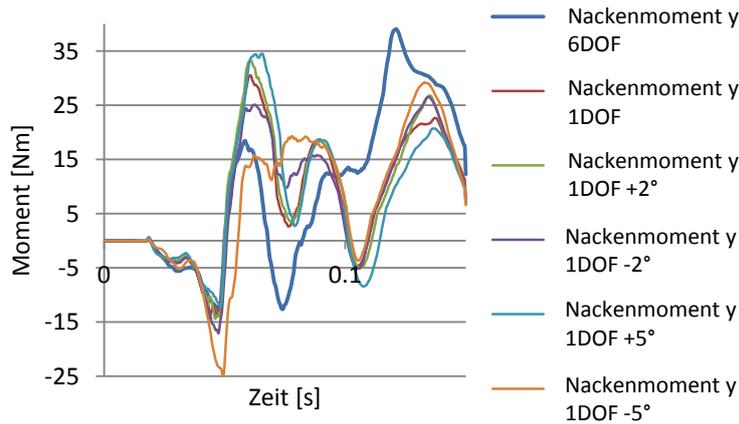


Abbildung 64 Verlauf des Nackenmoments um y bei verschiedenen Vorverdrehungen um 0Y , sowie der Basis (6DOF) im Lastfall USNCAP

Exemplarisch wird in Abbildung 64 der Verlauf des oberen Nackenmoments gezeigt. Verlaufsfehler, die durch eine Nickbewegung entstehen, können durch Vorverdrehung um y nicht reduziert werden. Eine Abbildung dieser Effekte kann also nur dynamisch erfolgen. Für eine Schlittenanlage bedeutet das, dass zusätzliche Freiheitsgrade benötigt werden.

Schlittenvorverdrehungen um die 0Z -Achse haben ein großes Potential, Giereffekte abzubilden. Das lässt sich leider nicht auf die Nickbewegung übertragen. Eine Verbesserung der Gesamtabbildung von Dummybelastungen ist im untersuchten Fall durch Vorverdrehung um die 0Y -Achse nicht erzielbar.

5.5 Abbildung von 6DOF-Crashversuchen bei kausaler Veränderung von Zündzeitpunkten

In Kapitel 5.2 wurde gezeigt, dass ein kausaler Zusammenhang zwischen den zu frühen und zu hohen Anstiegen von Kopfbeschleunigungswerten auf 1DOF-Anlagen und der Nickbewegung eines 6DOF-Crashtests besteht. Zeitdifferenzen liegen bei einer mittleren Nickbewegung bei ca. 4 ms. Der Anstieg der Gurtkraft wird hingegen gut abgebildet. Aus diesem Verhalten kann geschlossen werden, dass eine Veränderung des Zündzeitpunktes des Airbags die entstandene Differenz beim Kraftanstieg vom Airbag auf den Dummy ausgleichen kann. Es ist nicht eindeutig, ob der Zündzeitpunkt vor- oder rückverlegt werden muss. Der Anstieg der Kraft soll später erfolgen, was dafür spricht, den Airbag später zu zünden. Allerdings steht dann weniger Zeit zur Verfügung, um den Airbag zu entlüften, was ihn zu steif macht. Um das Kraftniveau auf den Dummy zu senken, ist eine frühere Zündung nötig.

Eine Anpassung des Airbagverhaltens für die Schlittenanlage ist natürlich nicht legitim, da das Testen von bestimmten Airbagmodulen Teil des Aufgabenbereiches von Schlittenanlagen ist.

Am Beispiel eines USNCAP-Versuchs wurden Simulationen durchgeführt, bei denen der Airbagzündzeitpunkt um 4 ms bzw. 10 ms vor-, sowie um 4 ms zurückverlegt wurde. Die der Überlegung zu Grunde liegenden Kopfbeschleunigungen zeigen, dass ein späterer Zündzeitpunkt nicht zielführend ist (Abbildung 65). Während bei einem späteren Zündzeitpunkt die

Kopfbeschleunigung weiter ansteigt, ist bei einer früheren Zündung fast kein Unterschied erkennbar.

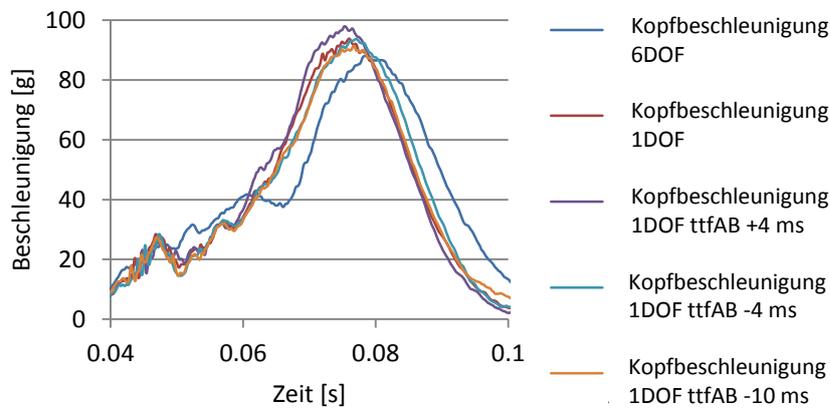


Abbildung 65 Vergleich der resultierenden Kopfbeschleunigungen zwischen 6DOF, 1DOF und 1DOF mit veränderten Airbagzündzeitpunkten für die Mittelklasse im Lastfall USNCAP

Die Auswirkungen auf andere Bereiche des Dummies als den Kopf sind sehr gering. Die Kopftrajektorie spricht gegen eine Verlegung der Zündzeitpunkte (Abbildung 66).

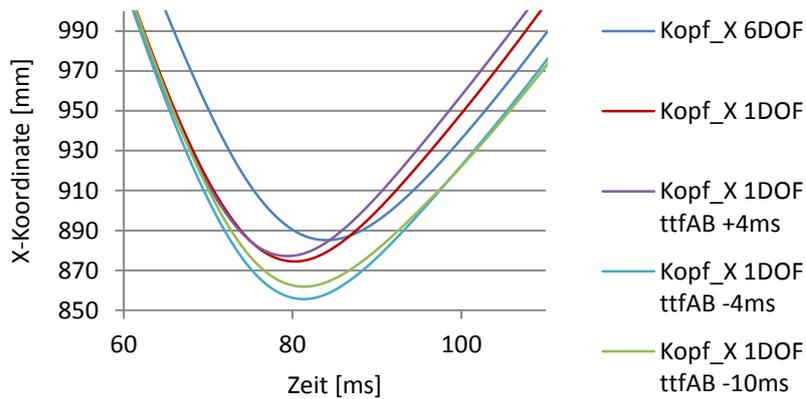


Abbildung 66 Vergleich der ⁵X-Anteile der Kopftrajektorien im Fahrzeugkoordinatensystem zwischen 6DOF, 1DOF und 1DOF mit veränderten Zündzeitpunkten für die Mittelklasse im Lastfall USNCAP

Durch die Verschiebung des Airbagzündzeitpunktes verschieben sich die Phasen des Energieabbaus für den Kopf. Das führt bei einer zu frühen Zündung zu fehlerhaften Kopftrajektorien.

Tabelle 17 Durch CORA berechnete Abbildungswerte für verschiedene Airbagzündzeitpunkte bei 1DOF-Schlitterversuchen für ein Fahrzeug im Lastfall USNCAP

Abbildung 6DOF durch 1DOF	Belastungen	Trajektorien
1DOF	0,719	0,739
TTF +4 ms	0,679	0,702
TTF -4 ms	0,741	0,746
TTF -10 ms	0,769	0,759

Bei der gesamten Abbildung des Dummys ist zwar durch frühe Zündung eine leichte Verbesserung möglich (Tabelle 17), durch die Veränderung der Kopftrajektorie ist diese Methode aber nicht empfehlenswert.

5.6 Abbildung von 6DOF-Crashversuchen auf Anlagen mit drei Freiheitsgraden zur Applikation der Nickbewegung

In diesem Abschnitt wird untersucht, wie sehr sich die Abbildungen bei den Lastfällen USNCAP und EuroNCAP durch reines Nicken ($dZ+rotY$) verbessern lassen. Andere Lastfälle wurden hier nicht betrachtet, da die Abbildung der 6DOF-Simulation durch diese Konfiguration sehr schlecht ist (FMVSS 208 30°, Small Overlap) oder die Datenbasis nicht ausreicht (FMVSS 208 0°). Eine zusätzliche Vorverdrehung des Schlittens wird in diesem Kapitel nicht berücksichtigt. Diese wird in Kapitel 5.8 behandelt.

5.6.1 USNCAP

Vergleiche der originalen Kinematik mit Simulationen mit drei Freiheitsgraden, die die Nickbewegung beschreiben (Berechnung der Kinematik siehe Kapitel 4.5) ergaben folgende Abbildungswerte (Tabelle 18).

Tabelle 18 Durch CORA berechnete Abbildungswerte für 1DOF und 3DOF Nicken bei verschiedenen Fahrzeugklassen im Lastfall USNCAP

<i>Fahrzeugklasse</i>	<i>Freiheitsgrade</i>	<i>Belastungen</i>	<i>Trajektorien</i>
Mittelklasse	1DOF	0,719	0,739
	3DOF Nicken	0,943 (+31 %)	0,996 (+35 %)
Kleinwagen	1DOF	0,745	0,615
	3DOF Nicken	0,880 (+18 %)	0,946 (+54 %)
SUV	1DOF	0,724	0,778
	3DOF Nicken	0,966 (+33 %)	0,998 (+28 %)

Die Abbildungswerte sind sowohl im Bereich der Dummybelastungen als auch im Bereich der Trajektorien signifikant höher als jene mit einem Freiheitsgrad. Offensichtlich nimmt der Grad der Abbildung mit der Fahrzeuggröße zu. Kleinwagen können durch ihr Gewicht und die asymmetrische Bauweise der Antriebseinheit bei diesem Lastfall einer höheren Querdynamik unterliegen, was sich in den Abbildungswerten bemerkbar macht. Die Verbesserung der Verläufe wird an einigen Beispielen veranschaulicht.

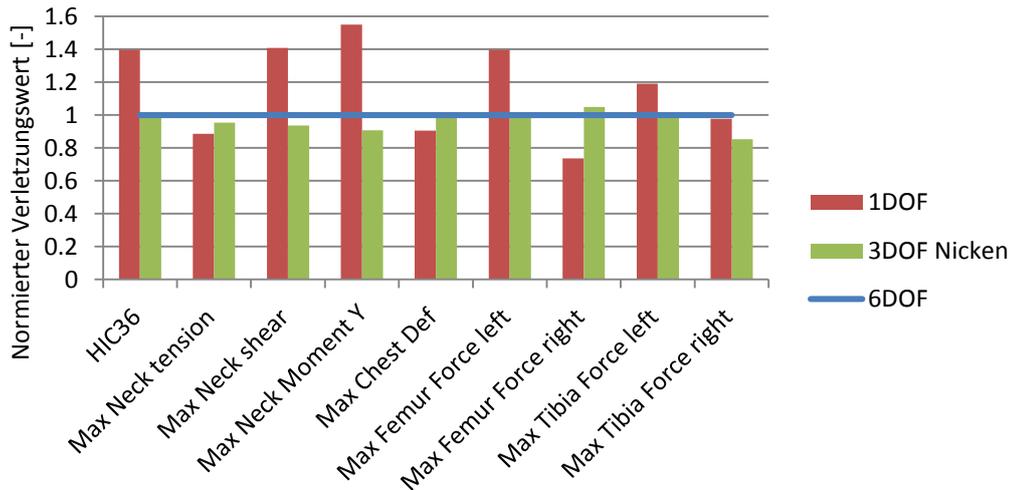


Abbildung 67 Vergleich der Verletzungswerte zwischen 6DOF, 1DOF und 3DOF-Nicken für SUV im Lastfall USNCAP

In Abbildung 67 sind die Verletzungswerte am Beispiel eines SUV beschrieben. Durch eine reine Nickbewegung treten nur mehr sehr geringe, akzeptable Abweichungen vom Realversuch auf.

Die wesentlichen systematischen Fehler einer Schlittenanlage mit einem Freiheitsgrad können durch zwei weitere Freiheitsgrade für die Abbildung der Nickbewegung beim Lastfall USNCAP fast vollständig kompensiert werden. Der Vergleich der relevanten Verläufe zwischen 6DOF und der Nickbewegung zeigt keine nennenswerten Differenzen.

5.6.2 EuroNCAP

Im Fall des asymmetrischen EuroNCAP-Versuchs hat natürlich auch die Gierbewegung einen Einfluss auf die Dummyabbildung. Tabelle 19 zeigt, dass die Erhöhung der Abbildungen durch reine Nickbewegung ähnlich groß ist wie bei USNCAP-Versuchen, auch wenn die absoluten Abbildungswerte nicht an jene des USNCAP-Versuchs heranreichen.

Tabelle 19 Durch CORA berechnete Abbildungswerte für 1DOF und 3DOF Nicken bei verschiedenen Fahrzeugklassen im Lastfall EuroNCAP

Fahrzeugklasse	Freiheitsgrade	Belastungen	Trajektorien
Mittelklasse	1DOF	0,594	0,556
	3DOF Nicken	0,851 (+43 %)	0,672 (+21 %)
Kleinwagen	1DOF	0,603	0,424
	3DOF Nicken	0,862 (+42 %)	0,707 (+67 %)
SUV	1DOF	0,673	0,603
	3DOF Nicken	0,762 (+13 %)	0,746 (+24 %)

Die Abbildung der Nickbewegung wirkt sich positiv auf die korrekte Prognose von Dummybelastungen sowie Trajektorien aus. Dieses Verhalten beruht darauf, dass der Insasse in der fZ -Richtung von unten her stark an das Fahrzeug gebunden ist (Sitz). Der korrigierte Krafteintrag vom Sitz auf den Dummy wirkt sich positiv auf die Abbildungswerte aus. Zusätzlich kann, wie in Kapitel 5.2 beschrieben, durch die Abbildung des Nickens die Kraftsituation am Kopf

sowie im Femurbereich verbessert werden. Seitens der Trajektorien kann nur der Fehleranteil in F_Z -Richtung verbessert werden.

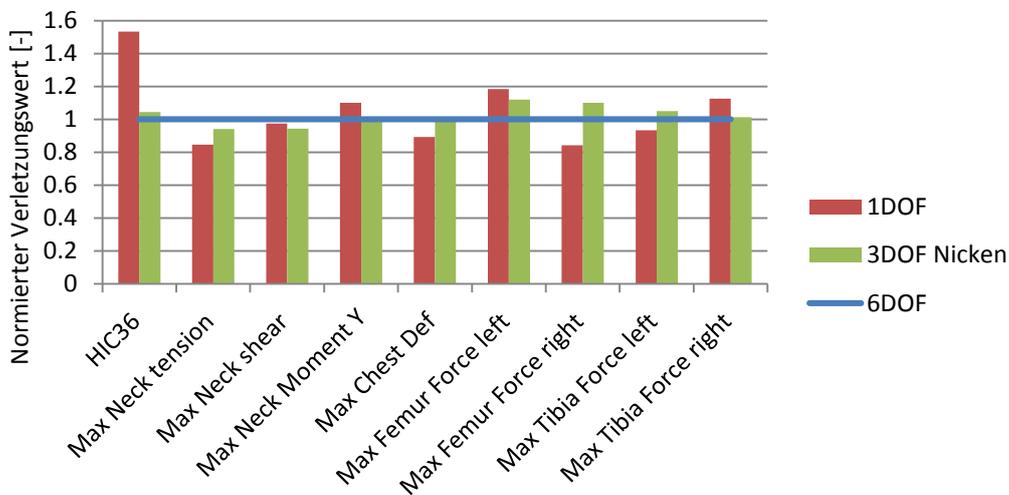


Abbildung 68 Vergleich der Verletzungswerte zwischen 6DOF, 1DOF und 3DOF-Nicken für Kleinwagen im Lastfall EuroNCAP

In Abbildung 68 sind beispielhaft Verletzungswerte beim EuroNCAP Versuch eines Kleinwagens dargestellt. Die Nickbewegung führt zu einer sehr viel besseren Prognose von Belastungswerten. Der maximale Fehler der Nickbewegung ist in diesem Beispiel eine Überprognose von 12 % gegenüber einem Maximalfehler von über 50 % bei 1DOF.

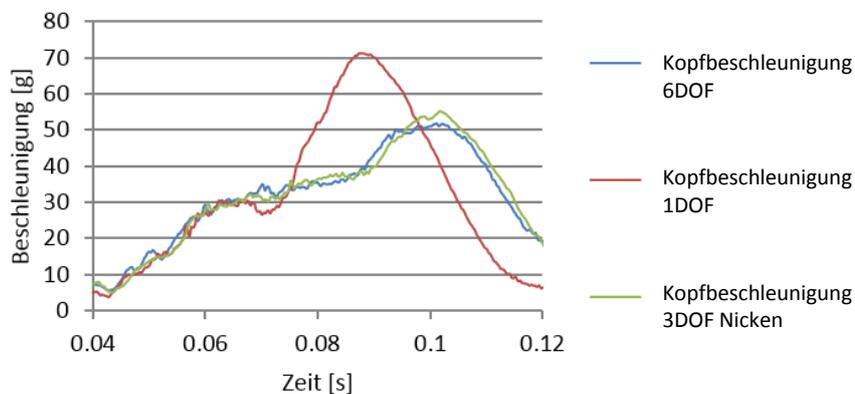


Abbildung 69 Vergleich von resultierenden Kopfbeschleunigungsverläufen zwischen 6DOF, 1DOF und 3DOF-Nicken für Kleinwagen im Lastfall EuroNCAP

Der in Abbildung 69 gezeigte Verlauf der Kopfbeschleunigungen bei einem Kleinwagen weist sehr große Unterschiede zwischen Bewegungen mit und ohne Nicken auf. Bei 1DOF tritt hier eine Überhöhung von 20 g auf. Die reine Nickbewegung mit drei Freiheitsgraden kann diesen Verlauf trotz fehlerhafter F_Y -Komponente der Kopftrajektorie korrekt abbilden.

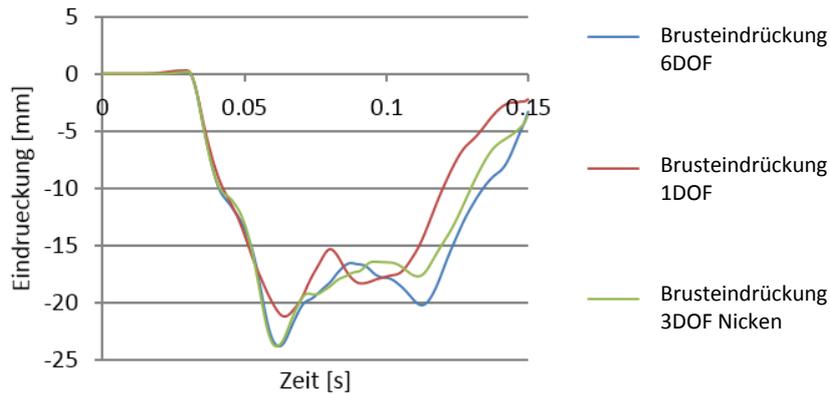


Abbildung 70 Vergleich von Brusteindrückungsverläufen zwischen 6DOF, 1DOF und 3DOF-Nicken für Kleinwagen im Lastfall EuroNCAP

Die maximale Brusteindrückung ist ein Beispiel für einen Wert, der durch die reine Nickbewegung nur teilweise gut abgebildet werden kann (Abbildung 70). Im gezeigten Fall sind bei 6DOF zwei Spitzenwerte zu sehen. Es gibt Fälle, bei denen das zweite lokale Maximum größer ist als das erste. Für die Entwicklung ist also die Abbildung des gesamten Verlaufs wichtig. Während die erste Spitze mithilfe der Nickbewegung sehr gut abgebildet werden kann, tritt im weiteren Verlauf ein Fehler auf. Dieser Fehler entsteht dadurch, dass sich durch die gierbedingte Bewegung des Dummies ein verändertes Kräfteverhältnis einstellt (vgl. Abbildung 27).

Betrachtet man die geometrische Versuchsabbildung genauer, stellt sich heraus, dass auch hier die Nickbewegung einen wichtigen Einfluss hat. Einer der wichtigsten Abstandswerte bei diesem Versuch ist der Minimalabstand zwischen der Kopfkontur und dem Lenkrad zu jedem Zeitpunkt. Die Nickbewegung beeinflusst diesen aufgrund des oben beschriebenen Verhaltens des Kopfes am Airbag.

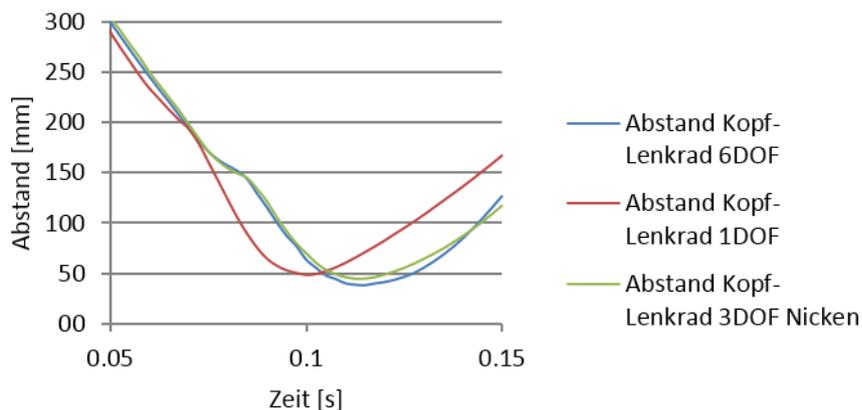


Abbildung 71 Vergleich von Verläufen der Abstände zwischen Kopf und Lenkradebene bei 6DOF, 1DOF und 3DOF-Nicken für Kleinwagen im Lastfall EuroNCAP

Abbildung 71 zeigt deutlich, dass auch für geometrische Auslegungskriterien die Nickbewegung sehr wichtig sein kann.

5.6.3 Zusammenfassung

In Tabelle 20 sind die jeweils niedrigsten erzielten Abbildungswerte für alle Lastfälle in den Konfigurationen 1DOF, 1DOF + Vorverdrehung sowie 3DOF Nicken gegenübergestellt. Eine Untersuchung der Konfiguration FMVSS 208 0° ist, wie bereits erwähnt, auf den Unterschied zwischen 6DOF und 1DOF beschränkt, da die Bewegungsdaten nur eine ebene Bewegung beschreiben (6DOF=3DOF). Es sind auch die Abbildungswerte für die Lastfälle FMVSS 208 30° sowie Small Overlap aufgeführt. Die Trajektorienabbildungen bei 1DOF sowie 3DOF Nicken sind unter 0,5. Diese Werte stellen keine sinnvollen Abbildungen mehr dar.

Tabelle 20 Zusammenfassung der niedrigsten Abbildungswerte für die Konfigurationen 1DOF, 1DOF + Vorverdrehung und 3DOF Nicken

	1 DOF	1DOF + Vorverdrehung	3DOF Nicken
USNCAP	0,72 / 0,62	- / -	0,88 / 0,95
EuroNCAP	0,59 / 0,42	0,71 / 0,64	0,76 / 0,67
FMVSS208 0°	0,61 / 0,57	- / -	- / -
FMVSS208 30°	0,68 / 0,41	0,68 / 0,60	0,66 / 0,49
Small Overlap	0,67 / 0,48	0,73 / 0,79	0,63 / 0,43

Es werden folgende Schlüsse gezogen:

- Beim Lastfall USNCAP lassen sich durch die Konfiguration 3DOF Nicken hervorragende Abbildungswerte erzielen.
- Durch die ähnlichen Bewegungen kann vom Lastfall USNCAP auf sehr gute Abbildungen beim Lastfall FMVSS 208 0° geschlossen werden.
- Eine deutliche Verbesserung der Abbildungen gegenüber einer 1DOF-Anlage kann auch für den Lastfall EuroNCAP erzielt werden. Ähnliche Abbildungswerte können teilweise aber auch durch Vorverdrehung erreicht werden.
- Die hochgradig asymmetrischen Lastfälle FMVSS 208 30° und Small Overlap können durch reine Nickbewegung nicht besser abgebildet werden als durch Vorverdrehung.

5.7 Abbildung von 6DOF-Crashversuchen auf Anlagen mit drei Freiheitsgraden zur Applikation der Gierbewegung

In diesem Abschnitt wird untersucht, wie sehr sich die Abbildungen bei den Lastfällen EuroNCAP, FMVSS 208 30° und Small Overlap durch reines Gieren (dY+rotZ) verbessern lassen.

5.7.1 EuroNCAP

In Kapitel 5.4 wurde gezeigt, dass sich Giereffekte im Lastfall EuroNCAP sehr gut durch Vorverdrehung darstellen lassen. Tabelle 21 zeigt, dass sich die Abbildungswerte zwischen einer Anlage mit Gierbewegung und einer Anlage mit einem Freiheitsgrad und Vorverdrehung mit Ausnahme des Trajektorienwerts bei Kleinwagen gleichen. Ein realer Mehrwert einer solchen Anlage konnte für diesen Lastfall nicht festgestellt werden.

Tabelle 21 Durch CORA berechnete Abbildungswerte für 1DOF, 1DOF + Vorverdrehung, und 3DOF Gieren bei verschiedenen Fahrzeugklassen im Lastfall EuroNCAP

<i>Fahrzeugklasse</i>	<i>Freiheitsgrade</i>	<i>Belastungen</i>	<i>Trajektorien</i>
Mittelklasse	1DOF	0,594	0,556
	3DOF Gieren	0,757 (+27 %)	0,817 (+47 %)
	1DOF mit Vorverdrehung	0,766 (+29 %)	0,832 (+50 %)
Kleinwagen	1DOF	0,603	0,424
	3DOF Gieren	0,732 (+21 %)	0,801 (+89 %)
	1DOF mit Vorverdrehung	0,707 (+17 %)	0,642 (+51 %)
SUV	1DOF	0,673	0,603
	3DOF Gieren	0,697 (+4 %)	0,893 (+48 %)
	1DOF mit Vorverdrehung	0,704 (+5 %)	0,825 (+37 %)

5.7.2 FMVSS 208 30°

Auch für den Lastfall FMVSS 208 30° sind Giereffekte sehr gut durch Vorverdrehung darstellbar. Wie Tabelle 22 zeigt, sind durch die Gierbewegung nur leichte Veränderungen gegenüber 1DOF mit Vorverdrehung feststellbar. In diesem Fall gibt es eine geringfügige Verbesserung der Belastungsabbildung, aber eine Verschlechterung der Trajektorienabbildung. Da für eine Anlage mit Gierbewegung auch für diesen Lastfall kein Mehrwert festgestellt werden konnte, wurde die Analyse für SUV nicht wiederholt.

Tabelle 22 Durch CORA berechnete Abbildungswerte für 1DOF + Vorverdrehung und 3DOF Gieren für die Mittelklasse im Lastfall FMVSS 208 30°

<i>Fahrzeugklasse</i>	<i>Freiheitsgrade</i>	<i>Belastungen</i>	<i>Trajektorien</i>
Mittelklasse	1DOF + Vorverdrehung	0,715	0,758
	3DOF Gieren	0,762 (+7 %)	0,704 (-7 %)

5.7.3 Small Overlap

Dieser Lastfall ist der einzige, bei dem eine Vorverdrehung nicht zu einer genauen Abbildung der Giereffekte führt. Der Vergleich der Abbildungswerte zwischen den Konfigurationen 1DOF + Vorverdrehung, sowie 3DOF Gieren in Tabelle 23 zeigt, dass eine Anlage mit Gierbewegung leicht erhöhte Abbildungswerte liefern kann. Das hängt aber von der derzeitigen Kinematik einer Einhakkollision ab, die sich bei künftigen Fahrzeugen zu einer generellen Abgleitkollision entwickeln könnte.

Tabelle 23 Durch CORA berechnete Abbildungswerte für 1DOF + Vorverdrehung und 3DOF Gieren für die Mittelklasse im Lastfall Small Overlap

<i>Fahrzeugklasse</i>	<i>Freiheitsgrade</i>	<i>Belastungen</i>	<i>Trajektorien</i>
Mittelklasse	1DOF + Vorverdrehung	0,736	0,797
	3DOF Gieren	0,798 (+8 %)	0,838 (+4 %)

Wie bereits erwähnt, sind die Einzelabbildungswerte der Belastungen bei diesem Lastfall in der Konfiguration 1DOF + Vorverdrehung inhomogen. Ein schlecht abgebildeter Wert ist beispielsweise die Nackenscherkraft (Abbildungswert bei 1DOF + Vorverdrehung = 0,447). Bei

einer Gierbewegung sind die Abbildungswerte homogener. Die Abbildung der Nackenscherkraft liegt auch hier unter jener von anderen Kanälen, ist mit 0,617 aber deutlich besser (Abbildung 72).

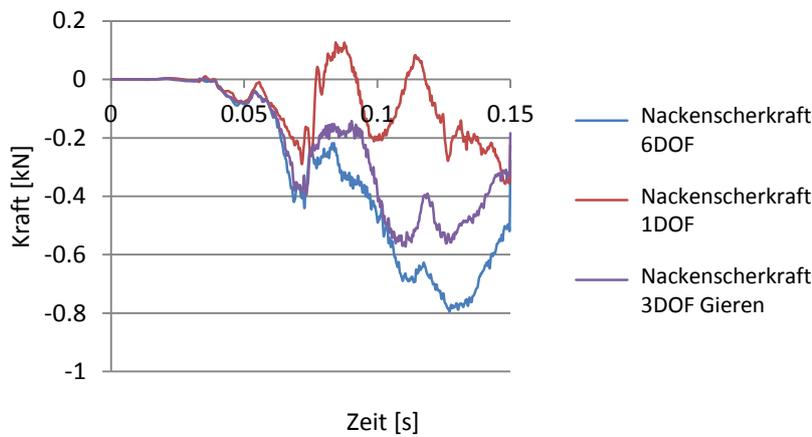


Abbildung 72 Vergleich der Nackenscherkräfte bei den Konfigurationen 1DOF + Vorverdrehung, 3DOF Gieren und 6DOF für ein Fahrzeug der Mittelklasse im Lastfall Small Overlap

Betrachtet man die Verletzungswerte (Abbildung 73), ist ein Vorteil der Gierbewegung nur teilweise gegeben. Generell waren die Verletzungswerte bei diesen Simulationen, verglichen mit anderen Lastfällen, aber geringer.

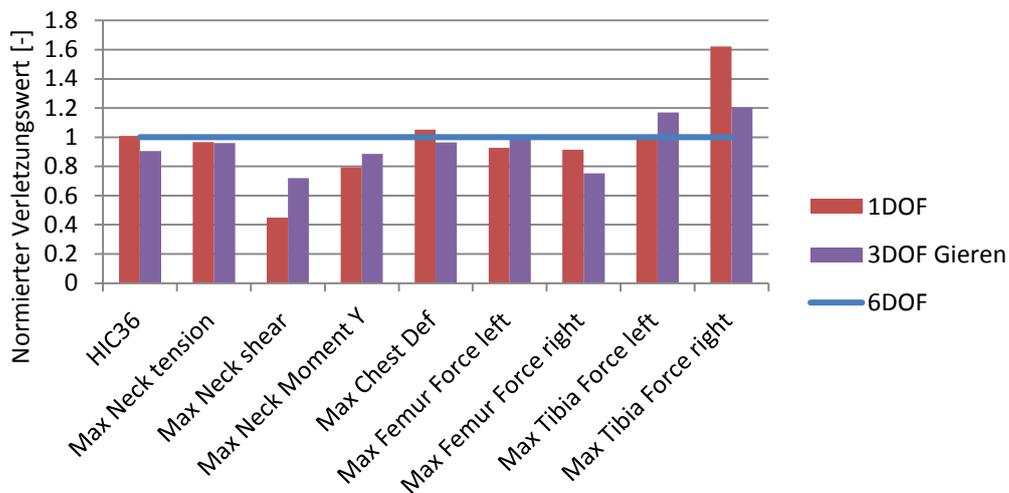


Abbildung 73 Vergleich der Verletzungswerte zwischen 6DOF, 1DOF+Vorverdrehung und 3DOF-Gieren für ein Fahrzeug der Mittelklasse im Lastfall Small Overlap

Wichtiger als die Abbildung der Verletzungswerte dürfte bei diesem Lastfall die geometrische Abbildung der lokalen Dummytrajektorien sein, um beispielsweise Sicherheiten gegen Bauteilkontakte bestimmen zu können.

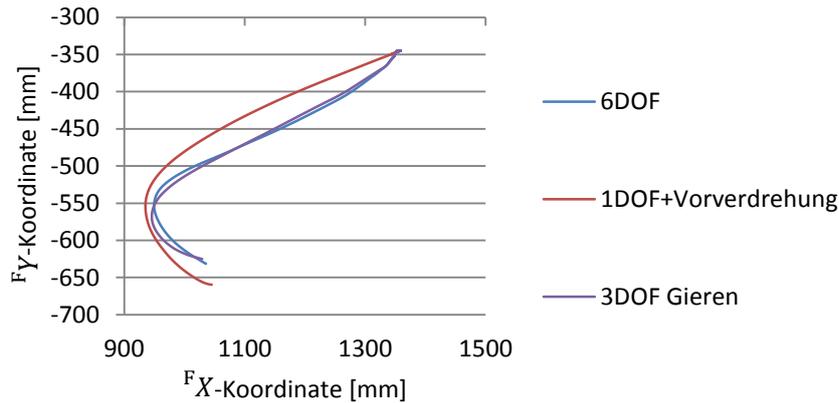


Abbildung 74 Kopftrajektorie in die $F_X F_Y$ -Ebene projiziert für die Mittelklasse im Lastfall Small Overlap und unterschiedliche Bewegungskonfigurationen

Abbildung 74 zeigt die Projektion der lokalen Kopftrajektorie in die $F_X F_Y$ -Ebene. Hier zeigt sich, dass die Gierbewegung gegenüber einer Vorverdrehung eine deutlich bessere Trajektorienabbildung erzielt.

5.7.4 Zusammenfassung

Tabelle 24 zeigt die niedrigsten aufgetretenen Abbildungswerte für verschiedene Konfigurationen und Lastfälle aus Kapitel 5.6.3, erweitert um die Konfiguration 3DOF Gieren.

Tabelle 24 Niedrigste Abbildungswerte für die Konfigurationen 1DOF, 1DOF + Vorverdrehung, 3DOF Nicken und 3DOF Gieren

Lastfall / DOF	1 DOF	1DOF + Vorverdrehung	3DOF Nicken	3DOF Gieren
USNCAP	0,72 / 0,62	- / -	0,88 / 0,95	- / -
EuroNCAP	0,59 / 0,42	0,71 / 0,64	0,76 / 0,67	0,70 / 0,80
FMVSS208 0°	0,61 / 0,57	- / -	- / -	- / -
FMVSS208 30°	0,68 / 0,41	0,68 / 0,60	0,66 / 0,49	0,76 / 0,70
Small Overlap	0,67 / 0,48	0,73 / 0,79	0,63 / 0,43	0,80 / 0,84

Betrachtet man die niedrigsten aufgetretenen Abbildungswerte, hat diese Konfiguration für asymmetrische Lastfälle durchaus Verbesserungspotential gegenüber 1DOF-Anlagen. Der Großteil der Simulationen zeigt aber für die Lastfälle EuroNCAP und FMVSS 208 30° kein Verbesserungspotential gegenüber einem Freiheitsgrad und Vorverdrehung.

Es werden folgende Schlüsse gezogen:

- Eine exakte Abbildung der Gierbewegungen ist nur bei asymmetrischen Lastfällen sinnvoll.
- Beim Lastfall EuroNCAP können vor allem Trajektorienabbildungen bei Kleinwagen gegenüber bisherigen Konfigurationen stark gesteigert werden. Die Verbesserung der Belastungsabbildung ist durch Abbildung einer Nickbewegung höher. Die geringsten Werte im Lastfall FMVSS 208 30° lassen auf eine Verbesserung gegenüber einer

Vorverdrehung schließen, im Durchschnitt der betrachteten Versuche war das aber nicht der Fall.

- Lediglich im Lastfall Small Overlap können deutlich bessere Abbildungen als mit den Schlittenkonfigurationen 3DOF-Nicken, 1DOF und 1DOF+Vorverdrehung erreicht werden.

5.8 Abbildung von asymmetrischen 6DOF-Crashversuchen auf nickfähigen Anlagen mit Vorverdrehung

In diesem Abschnitt werden die Möglichkeiten der Abbildung unterschiedlicher asymmetrischer Crashtests auf einer nickfähigen Anlage, auf der eine Vorverdrehung realisiert werden kann, dargestellt. Dabei wird auch auf die Ausrichtung der Nickachse eingegangen (Abbildung 75).

Die Nickachse kann normal zur Fahrzeuglängsachse ausgerichtet sein. Das entspricht in logischer Konsequenz einer Kombination der Vorteile von Vorverdrehung (Kapitel 5.4) und Nickbewegung (Kapitel 5.6). Das würde aber eine sehr spezielle Bauweise der Schlittenanlage erfordern. Ein wesentlich einfacherer Aufbau könnte sich bei einer Ausrichtung der Nickachse normal zur Schlittenbewegungsrichtung ergeben. Hier müsste die Nickachse nicht drehbar gegen den Schlittenaufbau vorgesehen werden. Eine feste Orientierung der Drehachse bewirkt in der Bewegung aber einen Fehler, da im Fahrzeugkoordinatensystem Wank- und Gierbewegungen entstehen. Die so resultierenden Fehler für den Dummy werden in diesem Kapitel beschrieben.

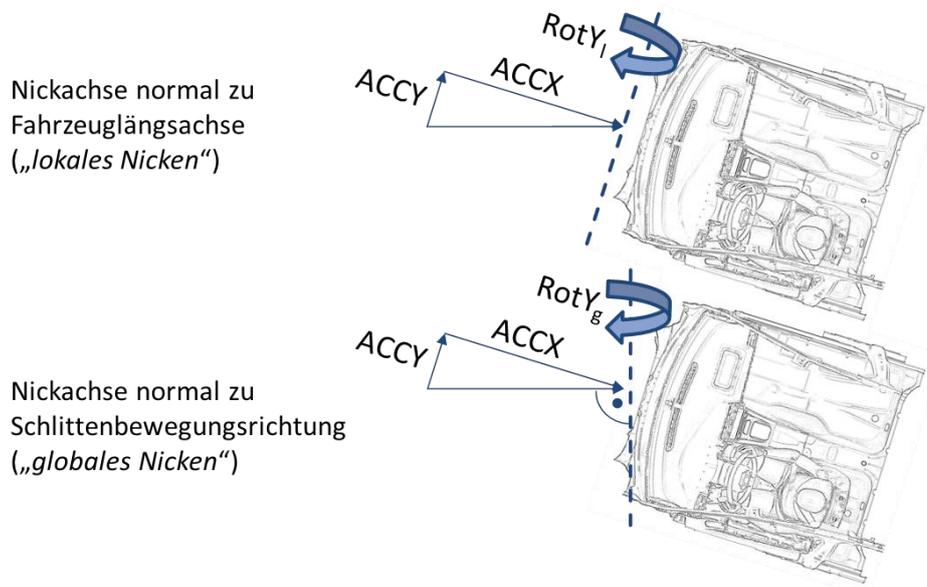


Abbildung 75 Vergleich der möglichen Ausrichtungen der Nickachse bei der Konfiguration Nicken + Vorverdrehung

Die Bezeichnungen „lokales Nicken“ und „globales Nicken“ leiten sich vom jeweiligen System ab, in dem die Nickachse immer gleich ausgerichtet ist, unabhängig von der Vorverdrehung.

5.8.1 Bewegungsberechnung für nickfähige Anlagen mit Vorverdrehung und Optimierung für einzelne Insassenpositionen

Berechnung der Bewegung für „lokales Nicken“

Die Berechnung der Nickbewegung erfolgt gemäß Kapitel 4.5. Diese Fahrzeugbewegung wird mit einer konstanten 0Y -Geschwindigkeit überlagert, wodurch die notwendige Erhöhung der Anfangsgeschwindigkeit des Schlittens (vgl. Abbildung 46) gewährleistet ist. Die Beschleunigung des Koordinatenursprungs des Fahrzeugsystems in 1Y -Richtung ist demnach ein skaliertes Verlaufs der Beschleunigung in 1X -Richtung. Der Skalierungsfaktor ist der Tangens des Vorverdrehungswinkels.

Methoden zur optimierten Beschleunigungsberechnung für einzelne Insassen

Die Wahl des Beschleunigungsverlaufs für die Schlittenanlage führt bei dieser Bewegungskonfiguration nicht mehr notwendiger Weise zur bestmöglichen Abbildung. Die Abbildungsergebnisse machen eine genauere Betrachtung nicht notwendig. Eine Ausnahme ist aber der Fall EuroNCAP für Kleinwagen. Für diesen Fall wurden veränderte Berechnungsverfahren für den Beschleunigungsverlauf untersucht, um die Abbildungswerte an jene der übrigen Fahrzeuge anzunähern. Folgende Methoden wurden dabei untersucht:

- Methode 1: Betrachtung des Betrags der resultierenden Fahrzeugbeschleunigung entlang einer Dummytrajektorie
- Methode 2: Resultierende Beschleunigung des Lenkradmittelpunktes
- Methode 3: Betrachtung der FX -Anteile der Fahrzeugbeschleunigung entlang einer Dummytrajektorie
- Methode 4: Betrachtung der Projektion der resultierenden Fahrzeugbeschleunigung entlang einer Dummytrajektorie in Richtung der Schlittenbewegung

Methode 1:

Diese Methode war zielführend und wird deshalb genauer vorgestellt. Sie erfasst den Mittelpunkt der Strecke zwischen den Beschleunigungssensoren des Dummykopfes und des Beckens (Abbildung 76). Dieser Punkt wird zu jedem Zeitpunkt des Versuchs ermittelt. Danach wird für jeden dieser Punkte an drei Zeitpunkten die Position im globalen Koordinatensystem ermittelt. Daraus kann der Beschleunigungszustand des Fahrzeugs berechnet werden. Es wird also jedem Punkt auf der Bahn des Mittelpunktes zwischen Kopf und Becken ein Beschleunigungsvektor des Fahrzeugs zugeordnet. Der Betrag dieses Vektors ergibt die Beschleunigung, die von der Schlittenanlage erzeugt werden muss.

$$\vec{S}_K(t) = \begin{pmatrix} S_{KX}(t) \\ S_{KY}(t) \\ S_{KZ}(t) \end{pmatrix} \quad \text{Kopftrajektorie im lokalen Fahrzeugkoordinatensystem}$$

$$\vec{S}_B(t) = \begin{pmatrix} S_{BX}(t) \\ S_{BY}(t) \\ S_{BZ}(t) \end{pmatrix} \quad \text{Beckentrajektorie im lokalen Fahrzeugkoordinatensystem}$$

Die mittlere Trajektorie im lokalen Fahrzeugkoordinatensystem (siehe Abbildung 76) ist:

$$\vec{s}_M(t) = \begin{pmatrix} s_{MX}(t) \\ s_{MY}(t) \\ s_{MZ}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (s_{KX}(t) + s_{BX}(t))/2 \\ (s_{KY}(t) + s_{BY}(t))/2 \\ (s_{KZ}(t) + s_{BZ}(t))/2 \end{pmatrix} \quad (5.8)$$

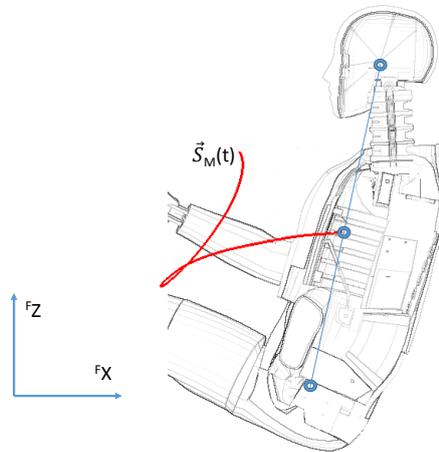


Abbildung 76 Darstellung der mittleren Dummytrajektorie $\vec{s}_M(t)$ im lokalen Koordinatensystem

Anhand dieser Trajektorie wird der Beschleunigungszustand des Fahrzeugs zu jedem Zeitpunkt t berechnet. So wird garantiert, dass der errechnete Beschleunigungspuls immer jenen Ort im Fahrzeug repräsentiert, an dem sich der Dummy gerade befindet.

In Abbildung 77 ist das numerische Berechnungsschema vereinfacht dargestellt. Da für die numerischen Ableitungen Differenzenquotienten berechnet werden, werden für einen Fahrzeugbeschleunigungsvektor zwei zugeordnete Geschwindigkeitsvektoren und drei zugeordnete Verschiebungsvektoren benötigt.

$$\vec{s}_A(t) = \begin{pmatrix} s_{AX}(t) \\ s_{AY}(t) \\ s_{AZ}(t) \end{pmatrix} \quad \text{globaler Ortsvektor des Achspunktes im Inertialsystem}$$

\tilde{R}_1 Transformationsmatrix, (4.2)

Δt Stützstellenweite (0,1 ms)

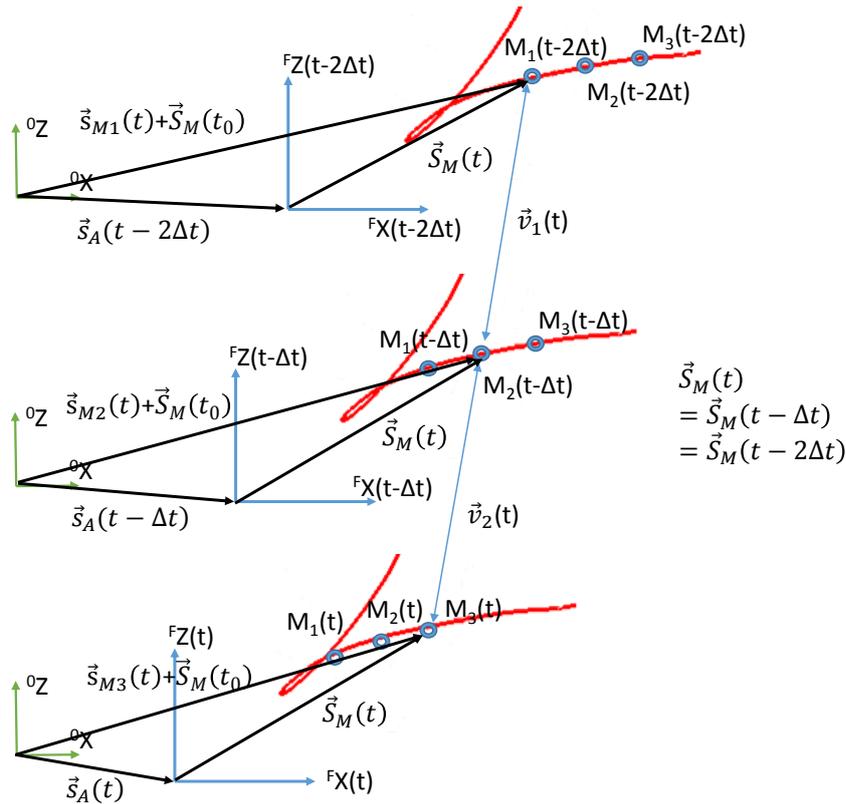


Abbildung 77 Vereinfachte Darstellung der Berechnung einer Fahrzeugbeschleunigung entlang einer Dummytrajektorie

Zur Berechnung der globalen Verschiebungsvektoren wird der Ort $\vec{S}_M(t)$ im Fahrzeug fixiert und sein globaler Ortsvektor für drei Zeitpunkte berechnet.

$$\vec{s}_{M1}(t) = \vec{R}_1(t - 2\Delta t) \cdot \vec{S}_M(t) + \vec{s}_A(t - 2\Delta t) - \vec{S}_M(t_0) \quad (5.9)$$

$$\vec{s}_{M2}(t) = \vec{R}_1(t - \Delta t) \cdot \vec{S}_M(t) + \vec{s}_A(t - \Delta t) - \vec{S}_M(t_0) \quad (5.10)$$

$$\vec{s}_{M3}(t) = \vec{R}_1(t) \cdot \vec{S}_M(t) + \vec{s}_A(t) - \vec{S}_M(t_0) \quad (5.11)$$

Man kann nun für jeden Trajektorienpunkt zwei Geschwindigkeiten angeben:

$$\vec{v}_1(t) = (\vec{s}_{M2}(t) - \vec{s}_{M1}(t))/\Delta t \quad (5.12)$$

$$\vec{v}_2(t) = (\vec{s}_{M3}(t) - \vec{s}_{M2}(t))/\Delta t \quad (5.13)$$

Die aktuelle Fahrzeugbeschleunigung für jeden Zeitpunkt am aktuellen Trajektorienpunkt ist:

$$\vec{a}(t) = (\vec{v}_2(t) - \vec{v}_1(t))/\Delta t \quad (5.14)$$

Die erhaltenen Beschleunigungsvektoren werden nun im lokalen Fahrzeugkoordinatensystem dargestellt:

$${}^F\vec{a}(t) = \vec{R}_1^{-1}(t) \cdot \vec{a}(t) \quad (5.15)$$

Es bietet sich an, bei einer Schlittenvorverdrehung um die 0Z -Achse und zusätzlich aufgebrachtener Nickbewegung für den tatsächlichen Beschleunigungspuls den Betrag aus ${}^F X$ - und ${}^F Y$ -Anteil zu bilden:

$$a_{\text{Schlitten}}(t) = |{}^F \vec{a}(t)| \quad (5.16)$$

Methode 2:

Der Lenkradmittelpunkt erwies sich für die Berechnung der idealen Vorverdrehung als ein Punkt, der für den Dummy sehr repräsentativ ist. Der Schluss, ihn als Referenzpunkt für die Ermittlung der Schlittenbeschleunigung heranzuziehen, liegt daher nahe. Durch diese Methode wurde aber keine Verbesserung der Abbildung erzielt.

Methode 3:

Das Aufbringen der resultierenden Beschleunigung ergibt in Bewegungsrichtung zu große Werte, wenn die lateralen Anteile sehr hoch sind. Die Reduktion auf den ${}^F X$ -Anteil bewirkt aber zu geringe Beschleunigungen.

Methode 4:

Die vorangehende Überlegung führt in der Konsequenz dazu, dass der resultierende Beschleunigungsvektor betrachtet, aber in die Bewegungsrichtung des Schlittens projiziert wird. Abbildungswerte der Belastungen und Trajektorien lagen um 4,6 bzw. 1,3 Prozentpunkte unter denen der empfohlenen Methode 1.

Berechnung der Bewegung für „globales Nicken“

Die Berechnung einer solchen Bewegung ist durch Transformation der Koordinaten aller Knotenpunkte zum Beginn der Simulation leicht möglich, aber vergleichende Auswertungen und die Darstellbarkeit der fehlerhaften Abbildung der Rotationen werden erschwert.

Aus diesen Gründen bleibt das globale Koordinatensystem ident mit dem Fahrzeugkoordinatensystem zum Zeitpunkt null. Die translatorische Bewegungsrichtung ist gegen dieses Koordinatensystem verdreht, hat also Komponenten in ${}^1 X$ - und ${}^1 Y$ -Richtung, und die drei Freiheitsgrade der Orientierung müssen transformiert werden.

Die Drehachse ist um einen bestimmten Winkel ε um die ${}^0 Z$ -Achse gedreht. Man kann die Rotation also durch Angabe der Orientierung der Drehachse und des Drehwinkels leicht definieren. Die Drehachse ist \vec{n} (4.5). Dabei gilt:

$$n_X = -\sin(\varepsilon) \quad (5.17)$$

$$n_Y = \cos(\varepsilon) \quad (5.18)$$

$$n_Z = 0 \quad (5.19)$$

Alle Parameter von \tilde{R}_3 (4.6) sind für das vorliegende Problem im zeitlichen Verlauf bekannt. Die beiden Drehmatrizen \tilde{R}_1 der Drehung um feste Achsen (4.2) und der Drehung um eine Gerade im

Raum (4.6) müssen für eine Bewegung gleich sein. Durch Koeffizientenvergleich (an den Positionen r_{31} , r_{21} und r_{32}) erhält man die neuen Drehwinkel um feste Achsen:

$$\psi = \arcsin\left(\frac{\sin\delta \cdot n_x}{\cos\varphi}\right) \quad (5.20)$$

$$\varphi = \arcsin(\sin\delta \cdot n_y) \quad (5.21)$$

$$\kappa = \arcsin\left(\frac{(1 - \cos\delta) \cdot n_x \cdot n_y}{\cos\varphi}\right) \quad (5.22)$$

Der gewählte Verlauf von δ entspricht dabei einer Projektion des berechneten Nickwinkels φ und es folgt aus(5.18) und (5.21):

$$\delta = \arcsin\left(\frac{\sin\varphi}{\cos\varepsilon}\right) \quad (5.23)$$

5.8.2 Nickachse normal zur Fahrzeuginnenachse (lokales Nicken)

Bei den Untersuchungen der Lastfälle mit der Bewegungskonfiguration 3DOF Nicken + Vorverdrehung wird zuerst von einer Nickachse ausgegangen, die normal auf die Fahrzeuginnenrichtung steht.

EuroNCAP

Bei diesem Lastfall konnten durch diese Bewegung in allen Fahrzeugklassen weitere Verbesserungen der Abbildungswerte erzielt werden. Das Ergebnis entspricht hier in allen Teilaspekten sehr genau dem des Gesamtfahrzeugversuchs. Bei idealen Vorverdrehungswerten wurden folgende Abbildungswerte erreicht (Tabelle 25):

Tabelle 25 Durch CORA berechnete Abbildungswerte für 1DOF, 3DOF Nicken und 3DOF lokales Nicken + Vorverdrehung bei verschiedenen Fahrzeugklassen im Lastfall EuroNCAP

<i>Fahrzeugklasse</i>	<i>Freiheitsgrade</i>	<i>Belastungen</i>	<i>Trajektorien</i>
Mittelklasse	1DOF	0,594	0,556
	3DOF Nicken	0,851 (+43 %)	0,672 (+21 %)
	3DOF lokales Nicken + Vorverdrehung	0,884 (+49 %)	0,947 (+70 %)
Kleinwagen	1DOF	0,603	0,424
	3DOF Nicken	0,862 (+43 %)	0,707 (+67 %)
	3DOF lokales Nicken + Vorverdrehung	0,866 (+44 %)	0,861 (+103 %)
SUV	1DOF	0,673	0,603
	3DOF Nicken	0,762 (+13 %)	0,746 (+24 %)
	3DOF lokales Nicken + Vorverdrehung	0,872 (+30 %)	0,969 (+61 %)

Bei den Belastungswerten werden bei allen Fahrzeugklassen moderate Verbesserungen der Abbildungswerte gegenüber einer Nickbewegung ohne Vorverdrehung erzielt (0,4-11 Prozentpunkte). Im Fall des SUV tritt ein großer Sprung auf. In diesem Fall wurde eine fiktive Kinematik im Entwicklungsprozess betrachtet, bei der im Gesamtfahrzeugversuch ein Kontakt zwischen Kopf und Lenkradkranz auftritt. Da dieser Kontakt erst mit der Kombination von Nickbewegung und Vorverdrehung dargestellt werden kann, tritt hier ein deutlicher Anstieg auf.

Diese Betrachtung unterstreicht die Relevanz für Fragestellungen des Entwicklungsprozesses, auch Giereffekte bei diesem Lastfall abzubilden.

Bei den Abbildungswerten der Trajektorien wird bei allen Untersuchungen durch Vorverdrehung eine sehr große Verbesserung erreicht (15-27 Prozentpunkte). Da die Trajektorien sowohl von Nick- als auch Gierbewegungen abhängen, sind die Werte in dieser Konfiguration auch sehr viel höher als bei reiner Gierbewegung.

Durch das Diagramm der Verletzungswerte wird die Verbesserung der Abbildungen vorerst nicht bei allen Fahrzeugklassen bestätigt. Im Fall von Kleinwagen entstehen sogar leicht verschlechterte Verletzungswerte (Abbildung 78).

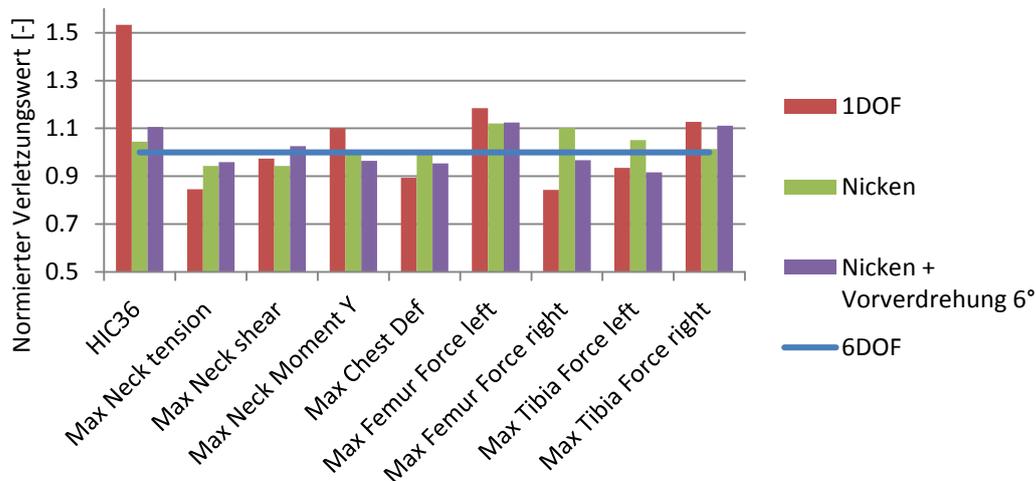


Abbildung 78 Vergleich der Verletzungswerte zwischen 6DOF, 1DOF, 3DOF-Nicken sowie 3DOF lokales Nicken + Vorverdrehung (6°) für Kleinwagen im Lastfall EuroNCAP

In diesem Fall tritt im Bereich der Beinkräfte eine Verschlechterung im Vergleich zur Nickbewegung ohne Vorverdrehung auf. Wie bereits in Kapitel 5.4 beschrieben, entstehen bei Vorverdrehung Startwinkelfehler. Diese Fehler bewirken im Beinbereich, dass die Knie etwas veränderte Kontaktpunkte haben und die Füße im Simulationsmodell von Pedal oder Fußauflage abrutschen können (Abbildung 79).



Abbildung 79 Vergleich von Beinpositionen mit 6DOF (grün) und 3DOF lokales Nicken + Vorverdrehung (rot) bei einem Fahrzeug der Mittelklasse im Lastfall EuroNCAP (t=112,5 ms)

Für diesen Fall wurde aufgrund der Verletzungswerte eine Pulsoptimierung entsprechend Methode 1 durchgeführt.

Pulsoptimierung für einen einzelnen Insassen im Lastfall EuroNCAP, Kleinwagen

Die Abbildungswerte erhöhen sich durch die Pulsoptimierung wie in Tabelle 26 beschrieben:

Tabelle 26 Durch CORA berechnete Abbildungswerte für 1DOF, 3DOF Nicken, 3DOF Nicken + Vorverdrehung und 3DOF Nicken + Vorverdrehung + Pulsoptimierung in der Fahrzeugklasse Kleinwagen im Lastfall EuroNCAP

Fahrzeugklasse	Freiheitsgrade	Belastungen	Trajektorien
Kleinwagen	1DOF	0,603	0,424
	3DOF Nicken	0,862 (+43 %)	0,707 (+67 %)
	3DOF lokales Nicken + Vorverdrehung	0,866 (+44 %)	0,861 (+103 %)
	3DOF lokales Nicken + Vorverdrehung optimiert	0,881 (+46 %)	0,933 (+120 %)

Die Abbildung der Belastungswerte kann durch die vorgestellte Pulsoptimierung weiter erhöht werden. Der Abbildungswert der Trajektorien wird sogar sehr deutlich erhöht und befindet sich jetzt im selben Bereich wie die Werte der Fahrzeugklassen Mittelklasse und SUV.

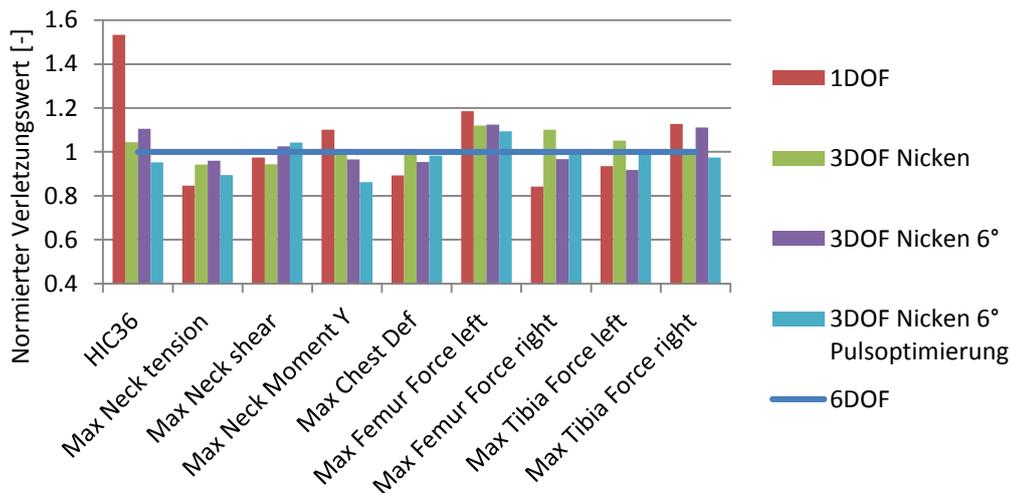


Abbildung 80 Vergleich der Verletzungswerte zwischen 6DOF, 1DOF, 3DOF-Nicken, 3DOF-Nicken + Vorverdrehung (6°) und 3DOF-Nicken + Vorverdrehung + Pulsoptimierung für Kleinwagen im Lastfall EuroNCAP

Im Diagramm der Verletzungswerte wird nun die verbesserte Abbildung bestätigt (Abbildung 80). Leichte Abweichungen treten im Nackenbereich auf, Beinwerte werden dafür sehr gut abgebildet.

Pulsoptimierung ist also eine einfache Möglichkeit, um die Abbildung eines Crashversuchs auf einer Schlittenanlage dieser Konfiguration weiter zu erhöhen. Bei Kleinwagen wurde die Abbildung der Dummybelastungen um 1,7 % und die Abbildung der Trajektorien um 8,3 % verbessert. Bei anderen Fahrzeugklassen ergaben sich allerdings keine signifikanten Verbesserungen.

Die geometrische Abbildung funktioniert bei dieser Konfiguration sehr gut. Sowohl in vertikaler als auch in lateraler Richtung werden die Effekte ausreichend beschrieben, so dass die Dummytrajektorien sehr exakt den Vorgaben entsprechen.

Tabelle 27 zeigt, dass Methode 1 zur Anhebung der Abbildungswerte für Kleinwagen im Lastfall EuroNCAP zielführend ist. Auch die anderen Methoden führten zu einer Verbesserung der Trajektorienabbildung, teilweise aber zu einer minimalen Verschlechterung der Abbildung der Dummybelastungen.

Tabelle 27 Durch CORA berechnete Abbildungswerte für 3DOF Nicken + Vorverdrehung + Pulsoptimierung für verschiedene Pulsberechnungsverfahren in der Fahrzeugklasse Kleinwagen im Lastfall EuroNCAP

<i>Methode</i>	<i>Pulsermittlung</i>	<i>Belastungen</i>	<i>Trajektorien</i>
-	Ausgangsbasis ohne Optimierung	0,866	0,861
1	Betrag der resultierenden Fahrzeugbeschleunigung entlang einer Dummytrajektorie	0,881 (+1,7 %)	0,933 (+8,4 %)
2	Resultierende Beschleunigung des Lenkradmittelpunktes	0,873 (+0,8 %)	0,918 (+6,6 %)
3	F^X -Anteile der Fahrzeugbeschleunigung entlang einer Dummytrajektorie	0,842 (-2,7 %)	0,908 (+5,4 %)
4	Projektion der resultierenden Fahrzeugbeschleunigung entlang einer Dummytrajektorie in Richtung der Schlittenbewegung	0,835 (-3,5 %)	0,920 (+6,8 %)

FMVSS 208 30°

Wie bereits beschrieben wurde, ist im Lastfall FMVSS 208 30° eine Berücksichtigung von Giereffekten durch die Bewegung selbst oder durch Vorverdrehung essentiell. Für Kleinwagen sind bei diesem Lastfall keine Daten vorhanden. Die Untersuchungen wurden an einem Fahrzeug der Mittelklasse sowie einem SUV durchgeführt. Die Problematik der Vorverdrehungsberechnung ist in Kapitel 5.4.3 beschrieben und lässt sich auf die Konfiguration Nicken + Vorverdrehung übertragen. Es konnten folgende Abbildungswerte erzielt werden (Tabelle 28).

Tabelle 28 Durch CORA berechnete Abbildungswerte für 1DOF + Vorverdrehung, 3DOF Gieren und 3DOF Nicken + Vorverdrehung bei verschiedenen Fahrzeugklassen im Lastfall FMVSS 208 30°

<i>Fahrzeugklasse</i>	<i>Freiheitsgrade</i>	<i>Belastungen</i>	<i>Trajektorien</i>
Mittelklasse	1DOF + Vorverdrehung	0,715	0,758
	3DOF Gieren	0,762 (+7 %)	0,704 (-7 %)
	3DOF lokales Nicken + Vorverdrehung	0,800 (+12 %)	0,950 (+25 %)
SUV	1DOF + Vorverdrehung	0,679	0,599
	3DOF lokales Nicken + Vorverdrehung	0,893 (+32 %)	0,871 (+45 %)

Aufgrund der bisher schlechten Abbildungswerte wurde die Konfiguration 3DOF Gieren für SUV nicht mehr berechnet. Im Bereich der Dummybelastungen reichen die Abbildungen des Lastfalls FMVSS 208 30° nicht ganz an die Werte von EuroNCAP- oder USNCAP-Versuchen heran, es ist

aber durch die Kombination von Nicken und Vorverdrehung immer noch ein sehr gutes Gesamtergebnis erzielbar. Die Dummytrajektorien lassen sich ähnlich gut wie bei den anderen Lastfällen abbilden, was für diesen Lastfall besonders wichtig ist (Kontaktproblem Kopf-A-Säule/Curtain-Airbag).

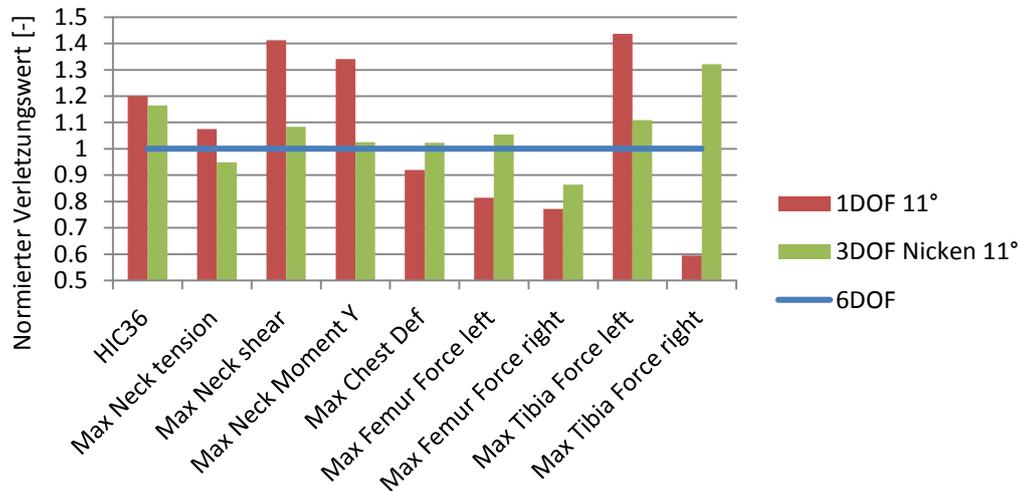


Abbildung 81 Vergleich der Verletzungswerte zwischen 6DOF, 1DOF + Vorverdrehung (11°) und 3DOF-Nicken + Vorverdrehung (11°) für SUV im Lastfall FMVSS 208 30°

Das Diagramm der Verletzungswerte (Abbildung 81) zeigt nur eine gering verbesserte Prognose des HIC36. Bei der sehr großen Sensibilität dieses Werts können beide Prognosen als akzeptabel angesehen werden. Deutliche Verbesserungen können aber in allen anderen Dummybereichen erzielt werden.

Der Vorteil der zusätzlichen Nickbewegung kann im Vergleich der Kopfpositionen im Kontaktzeitpunkt veranschaulicht werden (Abbildung 82).

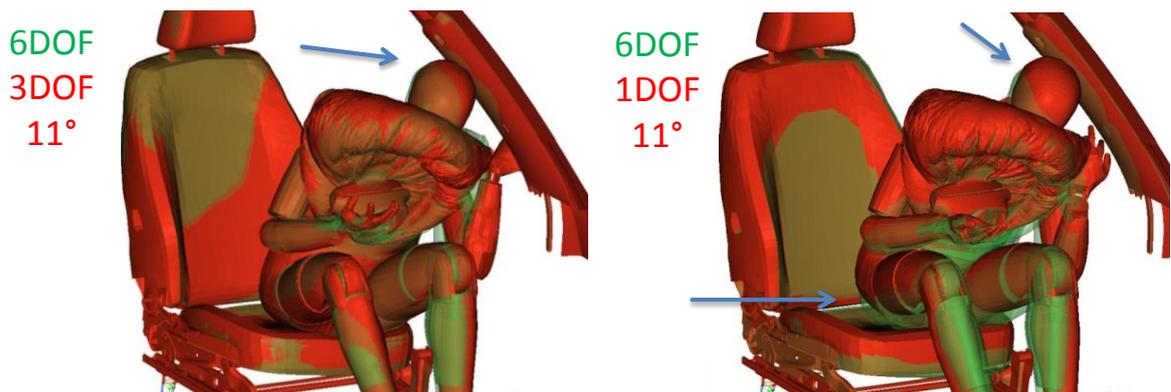


Abbildung 82 Vergleich der Dummypositionen im Lastfall FMVSS 208 30° für verschiedene Bewegungsmuster eines SUV

Mit der Nickbewegung kann die Kopfposition im Kontaktzeitpunkt sehr exakt nachgestellt werden. Mit nur einem Freiheitsgrad entsteht ein Fehler der Kopftrajektorie in z-Richtung von ca. 20 mm.

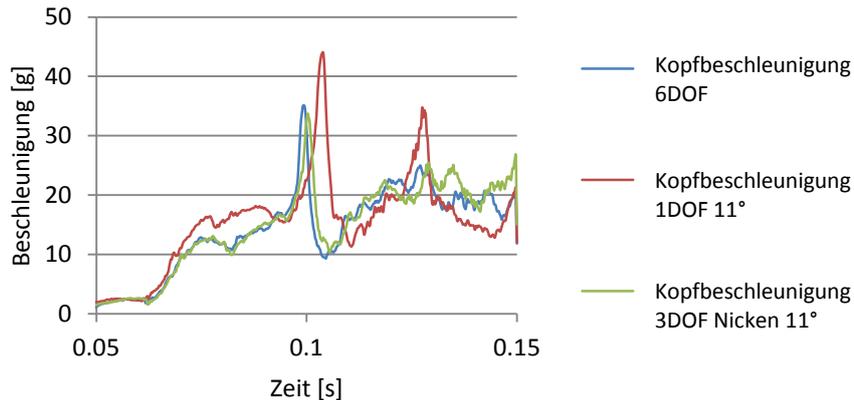


Abbildung 83 Vergleich der Kopfbeschleunigungsverläufe im Lastfall FMVSS 208 30° für verschiedene Bewegungsmuster eines SUV

Das Diagramm der Kopfbeschleunigungen (Abbildung 83) unterstreicht den Vorteil der Nickbewegung. Durch die Konfiguration Nicken + Vorverdrehung kann bei richtiger Wahl des Vorverdrehungswinkels die Kopfbeschleunigung exakt abgebildet werden. Bei nur einem Freiheitsgrad entsteht ein falscher zweiter Kontakt mit einem Fahrzeugbauteil (Lenkrad).

Small Overlap

Beim Lastfall Small Overlap treten teils geringe Nickbewegungen auf. Grund dafür ist, dass bei der Deformation die Last nicht direkt in einen Längsträger eingeleitet wird. Die Translation von dummynahen Fahrzeugpunkten (Bsp. H-Punkt) in ⁰Z-Richtung liegt aber nur geringfügig unter jener von anderen Lastfällen. Deshalb verbessert die Nickbewegung auch hier die Abbildung deutlich. Das Problem der schlechten Annäherung der Fahrzeugtrajektorien an eine Gerade bleibt natürlich bestehen. Untersuchungen zu Small Overlap wurden nur für ein Fahrzeug der Mittelklasse durchgeführt. Tabelle 29 zeigt die erzielten Abbildungswerte.

Tabelle 29 Durch CORA berechnete Abbildungswerte für 1DOF + Vorverdrehung, 3DOF Gieren und 3DOF Nicken + Vorverdrehung bei der Mittelklasse im Lastfall Small Overlap

<i>Fahrzeugklasse</i>	<i>Freiheitsgrade</i>	<i>Belastungen</i>	<i>Trajektorien</i>
Mittelklasse	1DOF + Vorverdrehung	0,715	0,763
	3DOF Gieren	0,798 (+12 %)	0,838 (+10 %)
	3DOF lokales Nicken + Vorverdrehung	0,793 (+11 %)	0,900 (+18 %)

In diesem Fall ergibt die reine Gierbewegung eine gleich gute Abbildung von Dummybelastungswerten wie die Konfiguration lokales Nicken + Vorverdrehung. Das ist bisher einzigartig und zeigt, wie wichtig hier die korrekte Abbildung der Gierbewegung ist. Kurzzeitige Abweichungen der Trajektorie ergeben noch keine schlechte Trajektorienabbildung, können sich aber auf die Dummybelastung stark auswirken (z.B. Verhalten des Kopfes am Lenkrad). So kann die Trajektorienabbildung in der Konfiguration Nicken + Vorverdrehung trotz der gleichen Belastungsabbildung besser ausfallen.

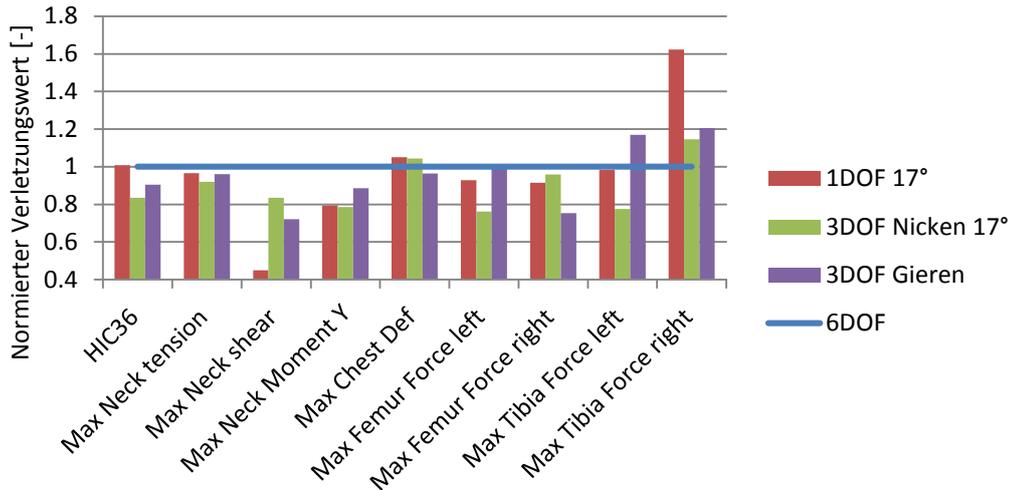


Abbildung 84 Vergleich der Verletzungswerte zwischen 6DOF, 1DOF + Vorverdrehung (17°) und 3DOF-Nicken + Vorverdrehung (17°) für die Mittelklasse im Lastfall Small Overlap

Die Verletzungswerte in Abbildung 84 machen deutlich, wie schwierig die Abbildung dieses Lastfalls auch mit Aufbringen der Nickbewegung bleibt. Wie bereits in Kapitel 5.4.5 beschrieben, ist die hinreichende Transformation der Bewegung in eine Bewegung, die mit Nicken + Vorverdrehung darstellbar ist, nicht möglich. Das Problem wird in der Projektion der lokalen Kopftrajektorien in die $F_X F_Y$ -Ebene sichtbar (Abbildung 85).

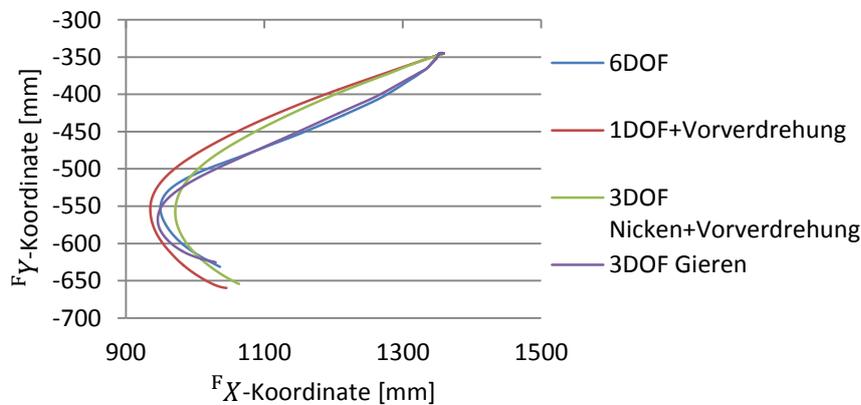


Abbildung 85 Kopftrajektorie in die $F_X F_Y$ -Ebene projiziert für die Mittelklasse im Lastfall Small Overlap und unterschiedliche Bewegungskonfigurationen

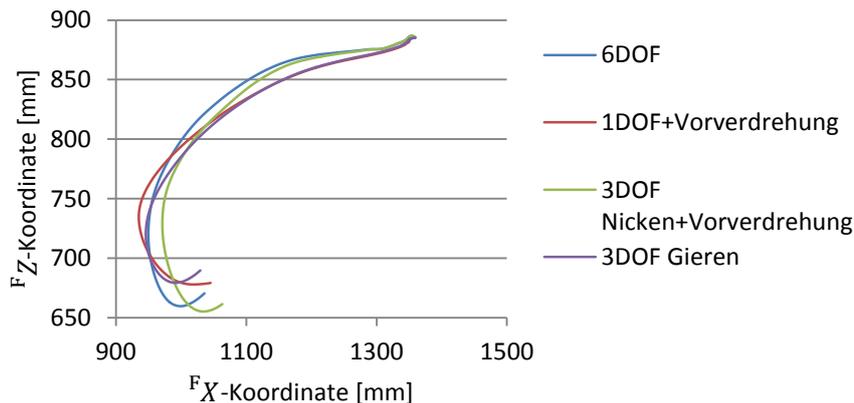


Abbildung 86 Kopftrajektorie in ${}^F X$ ${}^F Z$ -Ebene projiziert für die Mittelklasse im Lastfall Small Overlap und unterschiedliche Bewegungskonfigurationen

Durch die exakte Abbildung der Gierbewegung ist es hier möglich, die Kopftrajektorie mit einer Genauigkeit von weniger als 25mm abzubilden. Mit Vorverdrehung bleiben deutliche Unterschiede bis zu 40 mm erhalten. Das kann natürlich auch durch die Nickbewegung nicht verbessert werden, wenngleich die Trajektorie in ${}^F Z$ -Richtung etwas besser abgebildet ist (Abbildung 86). Die Differenzen in ${}^F Z$ -Richtung liegen im Bereich von 25 mm wenn die Nickbewegung nicht abgebildet wird. Auch das verhindert die exakte Prognose von Restabständen.

Bei diesen Versuchen sind das Verhalten des Kopfes am Airbag und dessen Abstände zu Bauteilen des Innenraums von großem Interesse. Diese entwicklungsrelevanten Kriterien können nur grob abgebildet werden. Es ist mit deutlich höheren Abweichungen als bei anderen Lastfällen zu rechnen. Small Overlap ist der einzige Lastfall, bei dem eine tatsächliche Abbildung der Gierbewegung einen Vorteil gegenüber der Konfiguration Nicken + Vorverdrehung bringt.

5.8.3 Nickachse normal zur Bewegungsrichtung (globales Nicken)

Alle bisherigen Ergebnisse beziehen sich auf lokales Nicken, also eine Nickachse, die normal auf die Fahrzeuglängsachse steht. Das bedeutet, dass für unterschiedliche Vorverdrehungen diese Nickachse auf der Schlittenanlage um die ${}^1 Z$ -Achse drehbar sein muss. Eine solche Vorrichtung ist komplexer als eine Anlage, bei der die Nickachse im globalen System immer gleichbleibt, also normal auf die Bewegungsrichtung des Schlittens steht, und nur die Panzerkarosse am Schlitten verdreht wird.

Fahrzeugbewegungen bei globalem Nicken

Die berechneten Vorverdrehungswinkel liegen bei den untersuchten Fällen immer unter 20° und die bei globalem Nicken entstehenden Gierwinkel sind gering (Bsp. FMVSS 208 30° -Versuch mit 11° Vorverdrehung: maximale Rotation um ${}^1 Z$ bei $0,006^\circ$). Die Rotation um ${}^1 X$ hingegen ist deutlich (ca. $0,4^\circ$ bis 1°). Es ist aber zu berücksichtigen, dass auch bei den Gesamtfahrzeugversuchen Wankwinkel auftreten. Durch globales Nicken muss sich die Abbildung also nicht zwangsweise verschlechtern. Im Fall eines EuroNCAP-Versuchs geht die durch globales Nicken hervorgerufene Wankbewegung in die richtige Richtung (Abbildung 87).

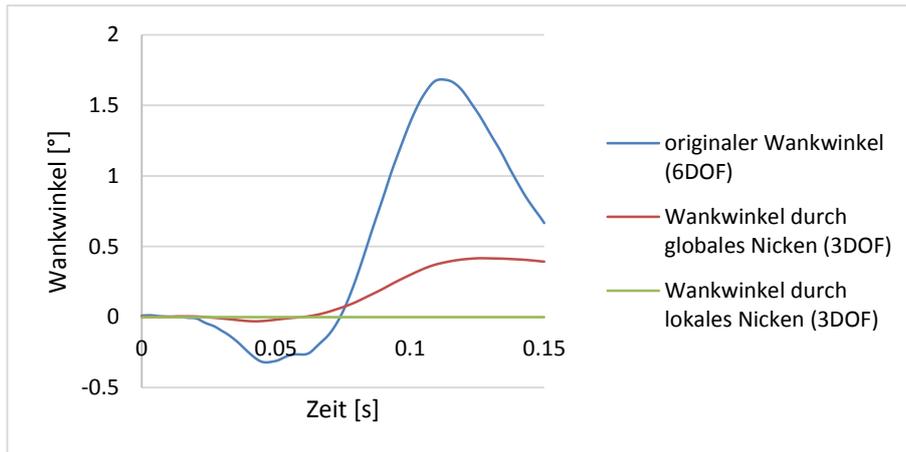


Abbildung 87 Vergleich von originalem Wankwinkel (6DOF) und Wankwinkel, der durch globales Nicken entsteht (3DOF) für den Lastfall EuroNCAP

Die sich einstellende Bewegung entspricht also sogar besser jener des Gesamtfahrzeugversuchs. Da die auftretenden Wankwinkel bisher nicht berücksichtigt und trotzdem gute Abbildungen erreicht wurden, sollte sich die Abbildung keinesfalls verschlechtern, solange die Wankwinkel positiv sind. Im Fall des FMVSS 208 30°-Versuchs verhält es sich aber anders (Abbildung 88).

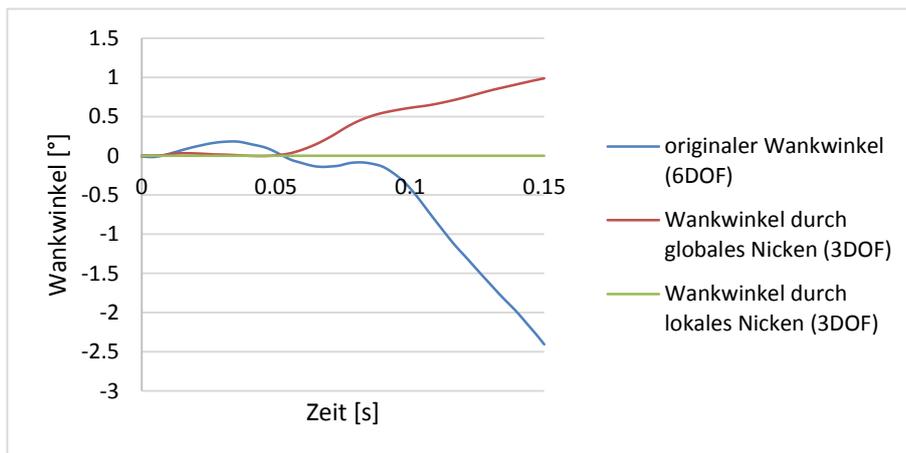


Abbildung 88 Vergleich von originalem Wankwinkel (6DOF) und Wankwinkel, der durch globales Nicken entsteht (3DOF) für den Lastfall FMVSS 208 30°

In diesem Fall vergrößert sich der Fehler der Wankbewegung um 1° (bei 150 ms). Ein deutlicher Fehler tritt aber erst sehr spät (ab 100 ms) auf.

Bei jeder Starrkörperdrehung lässt sich zu jedem Zeitpunkt eine Achse im Raum finden, um die die augenblickliche Rotation erfolgt. Sie wird Momentandrehachse genannt und ist parallel zum Winkelgeschwindigkeitsvektor. Durch Koeffizientenvergleich der Drehmatrizen (siehe Kapitel 4.5.3) lässt sich auch der Verlauf des Winkels der Projektion der Momentandrehachse auf die 1X 1Y -Ebene berechnen. Diese wird gegenüber dem Fahrzeugkoordinatensystem dargestellt. Eine Lage bei -90° entspricht einer exakten Einnickbewegung (negative 1Y -Richtung, Abbildung 89).

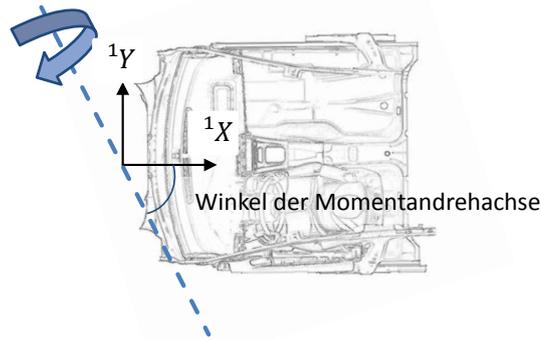


Abbildung 89 Orientierung der Momentandrehachse gegenüber dem Fahrzeugkoordinatensystem bei einer 6DOF-Bewegung

Ein beispielhafter Verlauf der Orientierung der Momentandrehachse im Lastfall EuroNCAP ist in Abbildung 90 dargestellt.

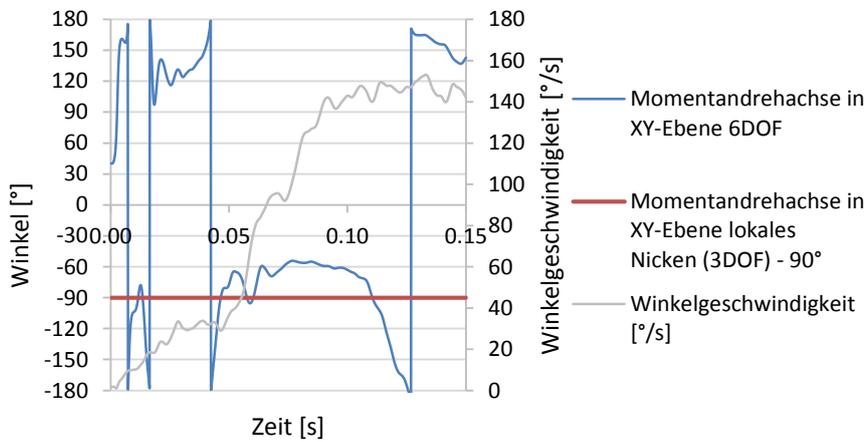


Abbildung 90 Orientierung der Momentandrehachsenlage in der $F_X F_Y$ -Ebene für ein Fahrzeug der Mittelklasse im Lastfall EuroNCAP sowie Winkelgeschwindigkeit der Starrkörperbewegung

Signifikante Drehraten treten erst bei ca. 50 ms auf. Ab diesem Zeitpunkt bis ca. 110 ms ist im Gesamtfahrzeugversuch der Winkel der Momentandrehachse deutlich höher als -90° . Dadurch entspricht eine globale Nickbewegung bis ca. 110 ms eher der Realität.

Für einen FMVSS 208 30° -Versuch der Mittelklasse ergibt sich folgender Verlauf (Abbildung 91):

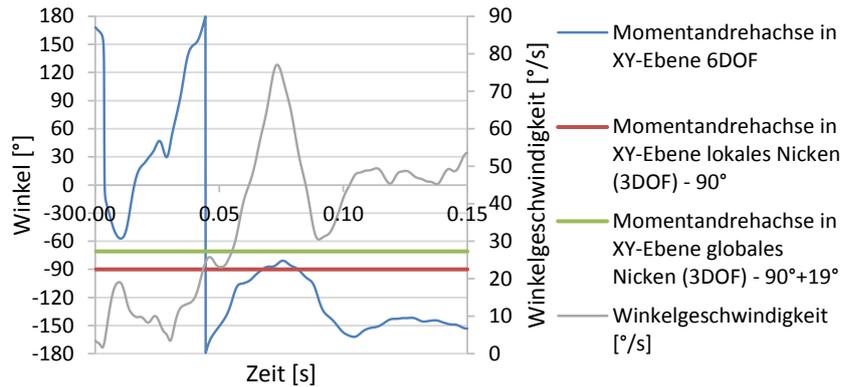


Abbildung 91 Orientierung der Momentandrehachsenlage in der $F_X F_Y$ -Ebene für ein Fahrzeug der Mittelklasse im Lastfall FMVSS 208 30° sowie Winkelgeschwindigkeit der Starrkörperbewegung

Wieder treten signifikante Drehraten erst ab ca. 50 ms auf. Bei diesem Versuch spricht die Lage der Momentandrehachse gegen eine globale Nickbewegung. Der Winkel müsste hier sogar noch geringer sein. Es zeigt sich aber, dass beim Auftreten besonders großer Drehraten die Orientierung der Momentandrehachse bei 6DOF gut mit der Nickachse bei globalem Nicken übereinstimmt.

Unterschiede im Bereich des Dummys

Zur Untersuchung der Veränderungen in der Abbildung des Dummyverhaltens durch globales Nicken wurden Berechnungen für den EuroNCAP Versuch (Tabelle 30) und für den FMVSS 208 30°-Versuch (Tabelle 31) in jeweils zwei Fahrzeugklassen durchgeführt.

Bei keiner Variante konnten signifikante Unterschiede zwischen lokalem und globalem Nicken festgestellt werden. Die Abweichungen der Trajektorien betragen weniger als 5 mm. Es ergaben sich folgende Abbildungswerte:

Tabelle 30 Durch CORA berechnete Abbildungswerte für lokales und globales Nicken bei unterschiedlichen Fahrzeugklassen im Lastfall EuroNCAP

Fahrzeugklasse	Freiheitsgrade	Belastungen	Trajektorien
Mittelklasse	lokales Nicken	0,884	0,947
	globales Nicken	0,883 (-0,1 %)	0,952 (+0,5 %)
Kleinwagen	lokales Nicken	0,866	0,861
	globales Nicken	0,865 (-0,1 %)	0,907 (+5,3 %)

Bei EuroNCAP tritt in den Abbildungswerten der Dummybelastungen keine Veränderung auf. Bei den Abbildungswerten der Trajektorien wurden leichte Verbesserungen verzeichnet.

Tabelle 31 Durch CORA berechnete Abbildungswerte für lokales und globales Nicken bei unterschiedlichen Fahrzeugklassen im Lastfall FMVSS 208 30°

<i>Fahrzeugklasse</i>	<i>Freiheitsgrade</i>	<i>Belastungen</i>	<i>Trajektorien</i>
Mittelklasse	lokales Nicken	0,800	0,950
	globales Nicken	0,820 (+2,5 %)	0,931 (-2 %)
SUV	lokales Nicken	0,893	0,871
	globales Nicken	0,891 (-0,2 %)	0,866 (-0,6 %)

Im Lastfall FMVSS 208 30° wurde bei den Belastungswerten in einem Fall sogar eine Verbesserung der Abbildung verzeichnet. Diese ist genau wie der leichte Rückgang bei Trajektorienabbildungswerten aber unspezifisch. Zwischen lokalem und globalem Nicken gibt es keine merklichen Unterschiede, die in Entwicklungsfragen entscheidend sein könnten.

5.8.4 Fazit

Die Untersuchungen zeigen, dass eine Kombination einer nickfähigen Anlage mit Vorverdrehung zu guten Abbildungen asymmetrischer Tests führt. Im Fall von EuroNCAP- und FMVSS 208-Versuchen wird eine exakte Abbildung eines Gesamtfahrzeugversuchs erzielt.

Nur beim Small Overlap-Versuch ist mit deutlichen Einschränkungen zu rechnen. Diese Versuchskinematik lässt eine Trajektorienoptimierung hin zu einer Geraden nicht zu. Die Zukunft der Entwicklung hinsichtlich Small Overlap auf Schlittenanlagen ist aus heutiger Sicht aber unklar, da hier ergebnisrelevante Effekte wie Fußraumintrusionen oder Lenkradquerverschiebungen gegenwärtig nur schwer dargestellt werden können.

Bei der Untersuchung unterschiedlicher Ausrichtungen von Nickachsen wurden keine nennenswerten Unterschiede festgestellt. Lokales Nicken erzeugt ebenso gute Ergebnisse wie globales Nicken.

Tabelle 32 zeigt, dass die Konfiguration 3DOF Nicken + Vorverdrehung (lokal oder global) bei den schlechtesten erzielten Abbildungswerten bei allen Lastfällen das beste Ergebnis erzielt (bei symmetrischen Versuchen entspricht diese Konfiguration mit 0° Vorverdrehung der Konfiguration 3DOF Nicken). Im Fall Small Overlap ist aber wieder die Inhomogenität der Einzelabbildungen zu berücksichtigen.

Tabelle 32 Zusammenfassung der niedrigsten Abbildungswerte für die Konfigurationen 1DOF, 1DOF + Vorverdrehung, 3DOF Nicken. 3DOF Nicken + Vorverdrehung und 3DOF Gieren

<i>Lastfall / DOF</i>	<i>1 DOF</i>	<i>1DOF + Vorverdrehung</i>	<i>3DOF Nicken</i>	<i>3DOF Nicken + Vorverdrehung</i>	<i>3DOF Gieren</i>
<i>USNCAP</i>	0,72 / 0,62	- / -	0,88 / 0,95	- / -	- / -
<i>EuroNCAP</i>	0,59 / 0,42	0,71 / 0,64	0,76 / 0,67	0,87 / 0,91	0,70 / 0,80
<i>FMVSS208 0°</i>	0,61 / 0,57	- / -	- / -	- / -	- / -
<i>FMVSS208 30°</i>	0,68 / 0,41	0,68 / 0,60	0,66 / 0,49	0,82 / 0,87	0,76 / 0,70
<i>Small Overlap</i>	0,67 / 0,48	0,73 / 0,79	0,63 / 0,43	0,79 / 0,90	0,80 / 0,84

Es werden folgende Aussagen abgeleitet:

1. Durch eine Nickbewegung in Kombination mit Vorverdrehung kann ein EuroNCAP-Versuch ebenso gut abgebildet werden wie der symmetrische USNCAP-Versuch. Die niedrigsten Abbildungswerte der Dummybelastungen und Dummytrajektorien liegen bei 0,87 / 0,91.
2. Durch eine Nickbewegung in Kombination mit Vorverdrehung kann ein FMVSS 208 – 30° Versuch sehr gut abgebildet werden. Dabei ist die korrekte Einstellung der Vorverdrehung wichtiger als die Nickbewegung.
3. Beim Small Overlap Versuch führt die Nickbewegung zu verbesserten Abbildungen. Die Abbildung von Giereffekten ist aber sehr wichtig und kann durch Vorverdrehung nur mit Einschränkungen erzeugt werden.

6 Abbildung von Gesamtfahrzeugversuchen auf Schlittenanlagen unter Einschränkungen im realen Einsatz

Dieses Kapitel untersucht Gegebenheiten in realen Entwicklungsprozessen, die das Potential von Schlittenanlagen mehrdimensionaler Bewegungen verändern. Das sind Einschränkungen bei der technischen Umsetzung von Anlagen, zeitliche Veränderungen von Bewegungsvorgaben im Entwicklungsprozess und die Versuchsstreuung der Gesamtfahrzeugversuche.

6.1 Einfluss der Anlagendynamik auf Abbildungen von Realtests

Bisher wurden zur Bewertung unterschiedlicher Anlagenkonfigurationen die Freiheitsgrade zwar eingeschränkt, nicht aber die Anlagendynamik. Bei den Untersuchungen wurde davon ausgegangen, dass die verbleibenden Freiheitsgrade die Vorgabebewegung perfekt umsetzen können. Das ist für eine reale Anlage aus heutiger Sicht unmöglich, da alle bekannten technischen Umsetzungsprinzipien gewissen Streuungen unterliegen und dynamische Einschränkungen mit sich bringen. Zudem soll untersucht werden, ob die Anforderungen dieser perfekten Bewegungen an eine Anlage, wie Beschleunigungen, Verfahrgeschwindigkeiten oder Arbeitsfrequenzen, für die Abbildung des Dummyverhaltens überhaupt notwendig sind. Ist eine ausreichende Abbildung auch mit deutlich reduzierten Randbedingungen erzielbar, so vereinfacht sich die Umsetzung einer Anlage, was Kosten und Störanfälligkeit verringert und gleichzeitig eventuell die Bedienbarkeit verbessert.

Zu diesem Zweck wird in diesem Kapitel untersucht, wie sich das Unterdrücken hoher Beschleunigungsfrequenzen der Nickbewegung sowie das Beschränken von Maximalbeschleunigung und Maximalgeschwindigkeit auf die Abbildung des Dummyverhaltens auswirken. Für den Lastfall Small Overlap, bei dem eine Vorverdrehung nicht ausreicht, um die Giereffekte adäquat abzubilden, werden diese Untersuchungen für Verläufe der Gierbewegung durchgeführt. Des Weiteren wird untersucht, ob im Vorfeld veränderte Verläufe die Abbildung eines Gesamtfahrzeugversuchs trotz zu geringer Randbedingungen einer Anlage erhöhen können. Das Ablaufdiagramm in Abbildung 92 zeigt die durchgeführten Vergleiche.

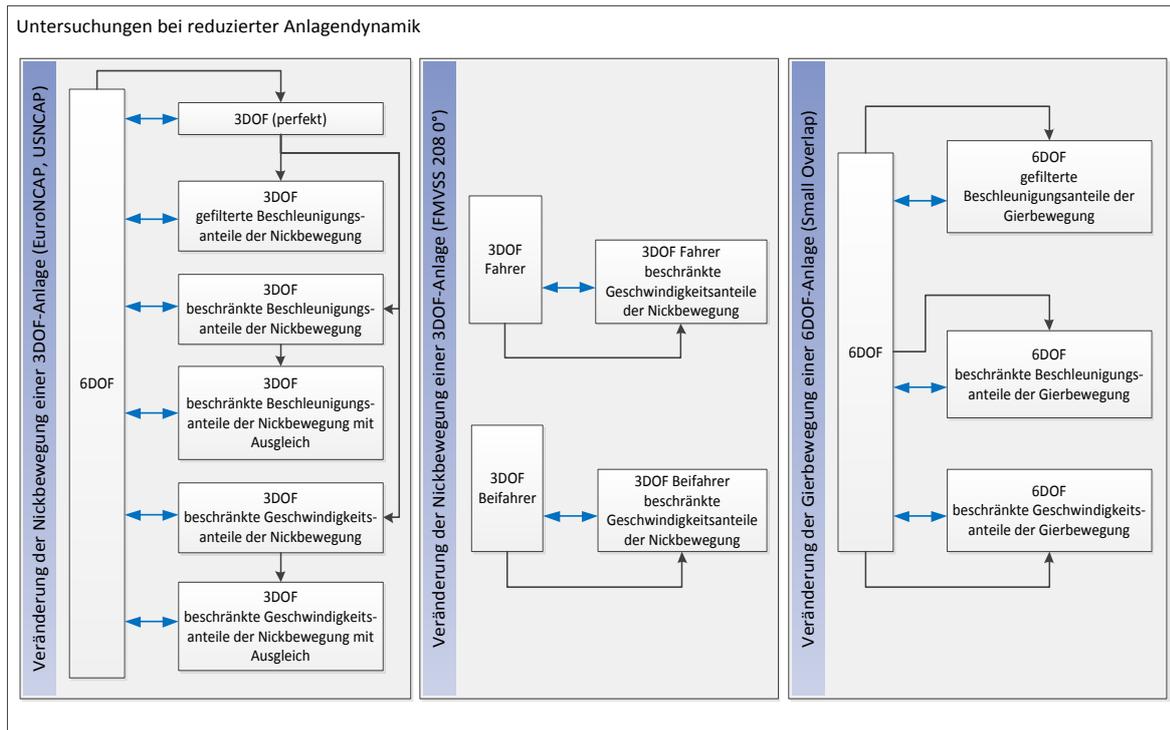


Abbildung 92 Ablaufdiagramm der durchgeführten Untersuchungen bei reduzierter Anlagendynamik

6.1.1 Methode

Kriterien für die Beurteilung des Einflusses von Dynamikreduktionen sind wiederum Abbildungswerte. Ein starker Abfall von Abbildungswerten bei einer bestimmten Art der Dynamikreduktion weist auf eine Sensibilität des Dummies auf diese Einschränkung hin.

Ein reales Verhalten bisheriger Anlagen wurde nicht in Betracht gezogen. Das Verhalten von Anlagen, die der Vorgabebewegung nicht perfekt entsprechen, hängt von der jeweiligen Bauweise und den einhergehenden Regelstrecken ab. Stattdessen wurden die Dynamikreduktionen möglichst allgemein gestaltet. Aufgrund der Vielzahl möglicher Bewegungsfehler ist es schwierig, allgemeingültige Aussagen zu treffen.

In diesem Unterkapitel wird die Veränderung der Bewegungsdaten als Ausgangspunkt für vergleichende Simulationen beschrieben.

Filtern von Bewegungsdaten

Da Schlittenanlagen nicht jeder im Realcrash auftretenden Beschleunigungsfrequenz gerecht werden können, werden diese Beschleunigungspulse entsprechend SAE J211 [38] gefiltert. Die Filterklasse CFC 60 ist durch einen numerischen Algorithmus definiert. Die Verläufe werden jeweils vorwärts und rückwärts gefiltert, um eine Phasenänderung zu kompensieren. Es ist auch die Betrachtung tieferer Grenzfrequenzen als das in der Norm definierte Minimum von 60 Hz erforderlich. Niedrigere Filterklassen wurden entsprechend der Vorgabe der SAE J211 für kleinere Grenzfrequenzen berechnet.

Der Vergleich mit Simulationen mit ungefilterten Beschleunigungspulsen erfordert die entsprechende Bewegungsvorgabe von Ort und Orientierung. Die gefilterten Beschleunigungsverläufe müssen also zweimal integriert werden. Dies führt zu Fehlern der

Bewegung, die nicht auf die Filterung zurückzuführen sind. Um diesen Fehler auszuschalten und explizit den Fehler der maximal erreichbaren Beschleunigungsfrequenz zu betrachten, werden bei der ersten Integration (Geschwindigkeitsverlauf) zum Zeitpunkt null Trimmkonstanten eingeführt. Diese werden so gewählt, dass das zweite Integral (Ort, $d_{z(cfc)}$) im Maximalwert genau der Vorgabekurve entspricht. Verläufe, die aus dem gefilterten Beschleunigungsverlauf berechnet wurden, werden mit Index (cfc) gekennzeichnet.

$$\begin{aligned} \frac{d^2}{dt^2} d_z = a_z &\rightarrow \text{filtern von } a_z \rightarrow \int a_{z(cfc)} dt + Trimm = v_{z(cfc)} \rightarrow \\ \int v_{z(cfc)} dt &= d_{z(cfc)} \text{ mit } MAX(d_{z(cfc)}) = MAX(d_z) \end{aligned} \quad (6.1)$$

Eine Trimmkonstante bedeutet natürlich eine Startgeschwindigkeit (z.B. in z-Richtung), die für Bewegungsanteile außer der Translation in x-Richtung nicht vorgesehen werden sollte. Da aber die Bewegungsvermessung der Realcrashtests zu diskreten Zeitpunkten erfolgt, ist auch dort der erste Geschwindigkeitswert ungleich null. Des Weiteren sind die Trimmkonstanten sehr gering. Typische Werte liegen bei 0,02 m/s für Translationen und 0,01 rad/s für Rotationen. Sie entsprechen dem jeweils ersten Geschwindigkeitswert der Spline-Kurven, die aus den Eingangsdaten berechnet wurden. Der Fehler, der dadurch umgangen wird, kann mehrere Millimeter betragen.

Bei der Filterung der Bewegungsdaten ist die vorhandene Datenbasis zu beachten. Die Bewegungsdaten stammen von Videoanalysen, die mit einer Rate von 1000 Hz aufgezeichnet wurden. Aufgrund von Pixelfehlern werden die Bewegungsverläufe (nicht die Beschleunigungsverläufe) mit der Filterklasse CFC 60 gefiltert. Dadurch entstehen Bewegungen, die sich für FE-Analysen eignen (vgl. Kapitel 4.5.2). Treten bei Realversuchen höhere Frequenzen auf, können diese hier nicht berücksichtigt werden.

Das System Fahrzeug – Rückhaltesystem/Sitz – Dummyhaut – Dummygerippe – Messaufnehmer wirkt wie ein mechanischer Tiefpassfilter, wenn die Eigenfrequenz des Systems deutlich (mindestens um Faktor $1/\sqrt{2}$) unter der Anregungsfrequenz liegt [55]. Es ist daher davon auszugehen, dass sich ein gewisses Ausmaß an Filterung nur geringfügig auf den Dummy auswirkt. Für die Nickbewegung sind vor allem der Sitz (bei positiver z-Beschleunigung) und der Beckengurt (bei negativer z-Beschleunigung) ausschlaggebend.

Für die Untersuchung des Einflusses der Nickbewegung wurden die entsprechenden Beschleunigungsverläufe (translatorisch: a_Z ; rotatorisch: $\dot{\omega}_Y$) jeweils zugleich mit den Filterklassen CFC 30, CFC 20 und CFC 10 verändert. Für die Untersuchung der Gierbewegung wurden die Beschleunigungsverläufe a_Y und $\dot{\omega}_Z$ mit der Klasse CFC 10 gefiltert.

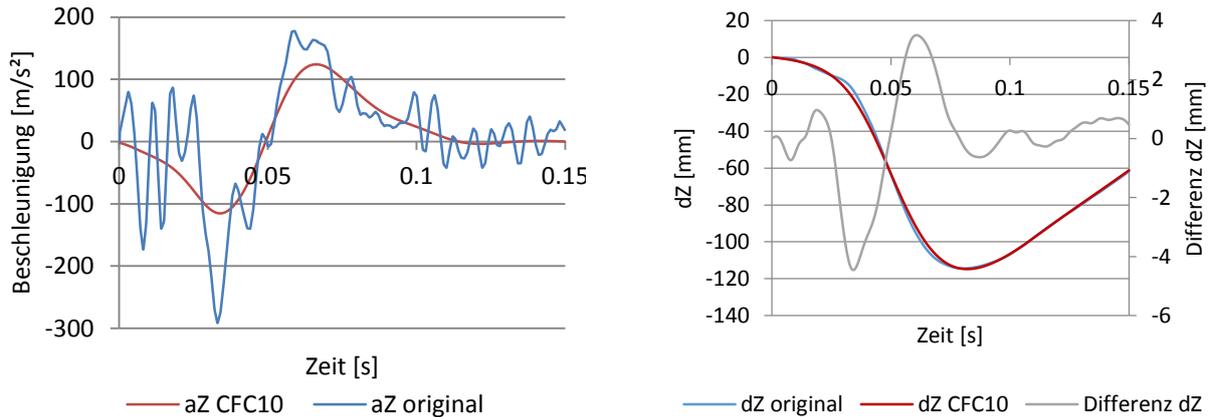


Abbildung 93 Beschleunigungsverlauf in 0Z -Richtung im Nullpunkt mit und ohne Filter im Lastfall USNCAP

Abbildung 94 Bewegungsverlauf in 0Z -Richtung im Nullpunkt mit und ohne Filter im Lastfall USNCAP

Abbildung 93 zeigt beispielhaft die Veränderung eines Beschleunigungsverlaufs des Nullpunktes in 0Z -Richtung durch Filtern mit der Klasse CFC 10 im Lastfall USNCAP. Die maximal erforderliche Beschleunigung tritt meist nur bei einem einzigen, kurzen Peak auf. Durch das Filtern kann die erforderliche Beschleunigung um bis zu zwei Drittel reduziert werden, ohne dabei erheblichen Einfluss auf den Bewegungsverlauf zu nehmen (Abbildung 94). Die maximale Differenz der dZ-Verläufe beträgt bei CFC 10 4 mm. Grund dafür ist, dass sich durch die Definition des Filters [38] die Integrale über den gesamten Verlauf nicht ändern.

Beschränkung von Anlagen-Maximalwerten

Leistung, Kraft, Geschwindigkeit sowie Ruck (da/dt) könnten durch geplante Anlagen begrenzt sein. Je nach Bauweise einer Anlage müssen unterschiedliche Werte beachtet werden. Die Berechnung der zugehörigen Bewegungskurven wird hier beschrieben.

Der entsprechende Verlauf wird aus den Bewegungsdaten berechnet (anstatt der Kraft wird die Beschleunigung berechnet). Die Kurvenstücke, die den vorgegebenen Maximalwert übersteigen, werden abgeschnitten. Dadurch entstehen Unstetigkeiten in den Ableitungen der Verläufe. Um das zu verhindern, wird der entstandene Verlauf mit der Filterklasse CFC 180 gefiltert. Bei dieser Filterklasse bleiben die Frequenzen der Eingangsdaten erhalten. Lediglich die Ecken bei den abgeschnittenen Kurvenverläufen werden abgerundet, was einer physikalischen Möglichkeit entspricht (der maximale Ruck vergrößert sich dadurch nicht). Aus diesen Verläufen werden dann wiederum Bewegungsdaten (Ort, Winkel) errechnet.

Es werden immer die beiden Komponenten der entsprechenden Bewegung (Nicken oder Gieren) verändert, während die anderen Bewegungskomponenten nicht verändert werden. Wichtig ist, die Beschränkungen der translatorischen sowie der rotatorischen Komponente sinnvoll aufeinander abzustimmen, um allgemeingültige Aussagen zu erhalten. Dabei sind zwei Überlegungen legitim:

1. Auch die Rotation hat einen Grenzwert, der nicht überschritten werden kann. Dieser definiert sich zu dem Zeitpunkt, an dem die Translation zum ersten Mal eingeschränkt ist.

- Der rotatorische Verlauf (Beschleunigung oder Geschwindigkeit) wird um dasselbe Verhältnis zu seiner Sollkurve reduziert, um das auch der translatorische Verlauf aufgrund der Maximalwertbeschränkung reduziert wurde.

Beide Methoden haben ihre Berechtigung. Die zweite Variante ist aber leichter einzusehen:

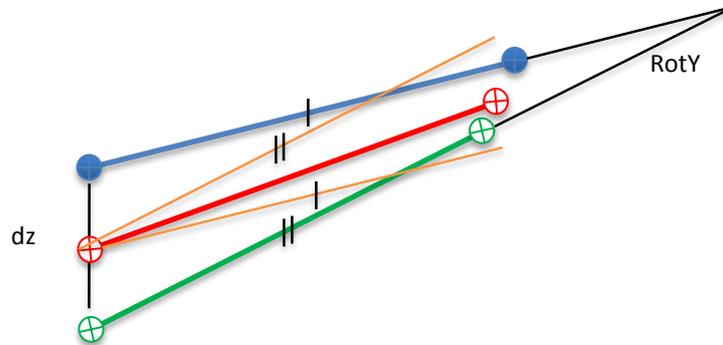


Abbildung 95 Schaubild der geometrischen Verhältnisse bei Reduktion der Anlagendynamiken

In Abbildung 95 stellt die blaue Linie das Fahrzeug zum Zeitpunkt t dar. Der linke Endpunkt könnte beispielsweise der Koordinatenursprung und der rechte Endpunkt der H-Punkt sein. Nun stellt die grüne Linie die Soll-Orientierung zum Zeitpunkt $t+1$ dar. Wird diese aufgrund der beschränkten Anlagendynamik nicht erreicht, stellt sich zum Zeitpunkt $t+1$ anstatt des grünen linken Punktes der rote linke Punkt ein. Jetzt ist es sinnvoll, wenn auch der rechte rote Punkt zwischen den beiden anderen rechten Punkten zu liegen kommt. Das ist der Fall, wenn die Reduktion der translatorischen Verschiebung dasselbe Verhältnis zum Sollwert hat wie die Reduktion der Rotation.

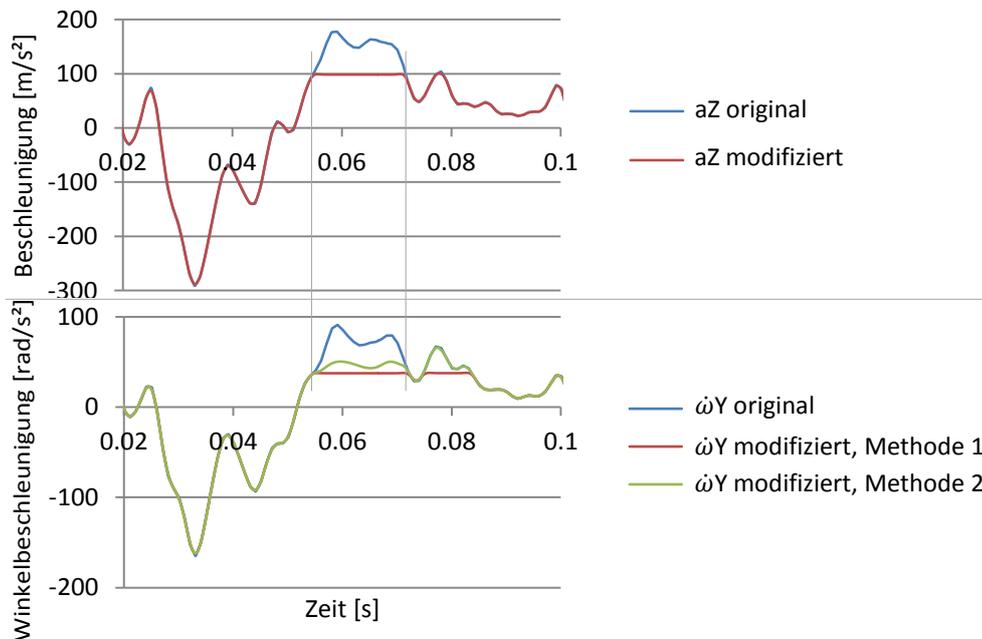


Abbildung 96 Sollkurven und modifizierte Kurven der 0Z -Beschleunigung im Nullpunkt sowie Sollkurve und modifizierte Kurven der 0Y -Winkelbeschleunigung nach den beiden Methoden für ein Fahrzeug im Lastfall USNCAP

Abbildung 96 zeigt oben ein Beispiel für eine reduzierte translatorische Beschleunigungskurve mit einem Maximalwert von 100 m/s². Bei einer Berechnung des Winkelbeschleunigungsverlaufs nach Methode 1 wird auch das zweite lokale Maximum bei 0,08 s beschränkt. Zu dieser Zeit findet aber bei der Translation keine Beschränkung mehr statt. Nach Methode 2 ergibt sich ein nicht konstanter, aber reduzierter Verlauf. Der zweite Berg bleibt vollständig erhalten. Eine vergleichende Untersuchung zwischen den beiden Methoden ergab keine signifikanten Unterschiede. Die Aussagen über reduzierte Anlagendynamik sind unabhängig von der Wahl der Methode.

Es werden getrennte Untersuchungen der Beschränkung im positiven sowie im negativen Beschleunigungsbereich durchgeführt.

Untersuchungsmatrix

Für jeden Teilaspekt wurden unterschiedliche Fahrzeuge und Lastfälle betrachtet. Nur die jeweils relevante Variante wird im Ergebnis beschrieben.

Tabelle 33 Untersuchungsmatrix zur Ermittlung der Auswirkungen von Dynamikreduktion auf das Dummyverhalten

Untersuchung	Versuch	Fahrzeug- klasse	Veränderte Beweg- ungen	Beschränkung/Reduktion				
Filtern	USNCAP	Mittelklasse	aZ, ωY	CFC 30	CFC 20	CFC 10		
	EuroNCAP	Mittelklasse	aZ, ωY	CFC 30	CFC 20	CFC 10		
	AP Small Overlap	Mittelklasse	aY, ωZ	-	-	CFC 10		
Reduktion der Beschleunigung (+ 0Z/- 0Z)	USNCAP	Mittelklasse	aZ, ωY; (-Z)	Δ5 g	Δ10 g	Δ15 g		
	EuroNCAP	Kleinwagen	aZ, ωY; (-Z)	Δ5 g	Δ10 g	Δ15 g		
	USNCAP	Mittelklasse	aZ, ωY; (+Z)	Δ5 g	Δ10 g			
	EuroNCAP	Kleinwagen	aZ, ωY; (+Z)	Δ5 g				
Reduktion der Geschwindigkeit (+ 0Z/- 0Z)	Small Overlap	Mittelklasse	aY, ωY; (+/-Z)	Δ5 g	Δ10 g	Δ15 g	Δ20 g	
	USNCAP	Mittelklasse	vZ, ωY; (-Z)	Δ0,5 m/s	Δ1,0 m/s	Δ1,5 m/s	Δ2,0 m/s	Δ2,5 m/s
	EuroNCAP	Kleinwagen	vZ, ωY; (-Z)	Δ0,5 m/s	Δ1,0 m/s			
	USNCAP	SUV	vZ, ωY; (-Z)	Δ0,5 m/s	Δ1,0 m/s	Δ1,5 m/s	Δ2,0 m/s	
	USNCAP	Mittelklasse	vZ, ωY; (+Z)	Δ0,5 m/s	Δ1,0 m/s			
	EuroNCAP	Kleinwagen	vZ, ωY; (+Z)	Δ0,5 m/s	Δ1,0 m/s	Δ1,5 m/s		
	FMVSS 208 0°	Mittelklasse	vZ, ωY; (+Z)	Δ0,5 m/s	Δ1,0 m/s			
	Small Overlap	Mittelklasse	vY, ωZ; (-Z)	Δ50 rad/s				
	Small Overlap	Mittelklasse	vY, ωZ; (+Z)	Δ50 rad/s	Δ100 rad/s	Δ150 rad/s		

Die Reduktionen in Tabelle 33 beziehen sich auf die jeweilige Ausgangs-Bewegungskomponente. Die zugehörige zweite Bewegungskomponente wird daraus ermittelt.

6.1.2 Abbildungswerte bei reduzierter Dynamik

Die Darstellung der sich verändernden Abbildungswerte erfolgt über Diagramme. Dabei wird sowohl die bekannte Abbildung gegenüber der Basissimulation (sechs Freiheitsgrade), als auch die

Abbildung gegenüber der ursprünglichen Simulation mit drei Freiheitsgraden (Schlittenkinematik ohne reduzierte Anlagendynamik) angegeben. Es ist möglich, dass die Abbildung gegenüber sechs Freiheitsgraden steigt, während die Abbildung gegenüber drei Freiheitsgraden fällt. In diesen Fällen kompensieren sich zwei gegenläufige Fehlereffekte (vorwiegend bei Nackenwerten).

Filtern der Beschleunigungsverläufe der Nickbewegung (α_Z, ω_Y)

Das Filtern der Nickbewegungsanteile hat kaum Einfluss auf die Abbildung des Dummyverhaltens. Erst bei CFC 10 ist eine Veränderung der Dummykinematik erkennbar, diese liegt aber im Bereich von wenigen Millimetern (ca. 2 mm).

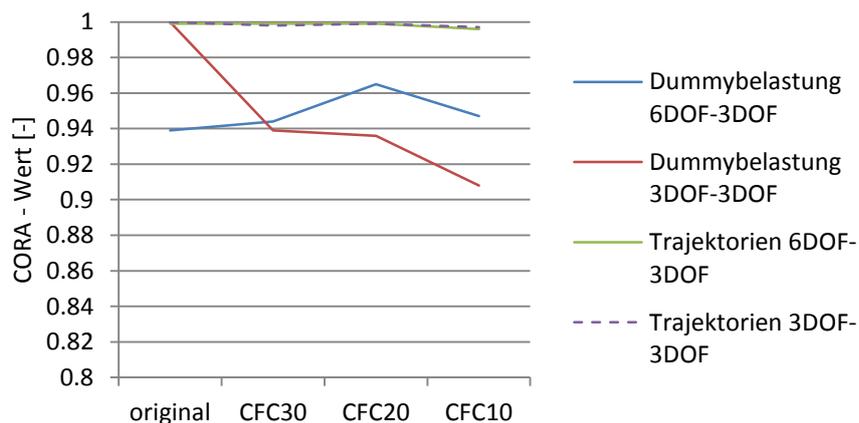


Abbildung 97 CORA-Abbildungswerte der Dummybelastungen und Trajektorien für Simulationen mit unterschiedlich gefilterten Nickbewegungen gegenüber den Basissimulationen mit 6DOF bzw. 3DOF für ein Fahrzeug der Mittelklasse im USNCAP Versuch

Die Abbildung der Belastungswerte (Abbildung 97) gegenüber der 6 DOF-Simulation steigt hier durch das Filtern sogar (Kompensation gegenläufiger Fehler). Die Abbildung zwischen den 3 DOF – Simulationen ist bei CFC 10 um drei Prozentpunkte geringer als bei CFC 20. Bei den Trajektorien liegen die Werte in Bereichen über 99 %, was einer fast perfekten Abbildung entspricht.

Für ein Fahrzeug im Lastfall EuroNCAP konnten selbst bei CFC 10 keine Abweichungen der Abbildungswerte festgestellt werden. Es ist also auch das Filtern mit der Klasse CFC 10 durchaus zulässig. Da hier erstmals Abweichungen zur vollen Dynamik auftreten, wird das Filtern mit CFC 20 ohne Einschränkungen empfohlen, um die benötigten Anlagenkräfte zur Erzeugung der Vorgabebesleunigungen zu reduzieren. Das Filtern mit der Klasse CFC 10 kann mit Einschränkungen empfohlen werden.

Eine weitere Absenkung der Grenzfrequenz ist nicht sinnvoll, da der Beschleunigungsverlauf mit CFC 10 einer einzigen Schwingung im betrachteten Zeitfenster entspricht und eine weitere Reduktion die Bewegungsverläufe ($dZ, RotY$) deutlich verändert.

Beschränkung des Rucks

Vorgabewerte für den Ruck (da/dt) sind verglichen mit existierenden Schlittenanlagen gering (max. 4 g/ms). Das Filtern von Beschleunigungswerten, das nur geringen Einfluss auf den Dummy hat, führt zu einer deutlichen Verringerung der Ruckwerte (-89 % bei CFC 10). Eine gesonderte Beschränkung dieses Anlagenwertes wird deshalb nicht betrachtet.

Beschränkung der Abwärtsbeschleunigung (negative 0Z -Richtung)

Alle untersuchten Fahrzeugbewegungen beginnen ihre Nickbewegung in negativer 0Z -Richtung (im Koordinatenursprung) und mit einer Drehung in negativer 0Y -Richtung. Wie schon erwähnt, führt das Filtern zu einer deutlichen Reduktion der maximalen Beschleunigung. Wird diese aber durch einfaches Abschneiden reduziert (das entspricht dem Verhalten einer Anlage, die dem Vorgabewert nicht entsprechen kann), verändert das den gesamten weiteren Bewegungsverlauf. Dennoch weicht das Verhalten nur moderat ab und es können kleinere Einschränkungen durchaus akzeptiert werden.

Um eine Vorstellung von der veränderten Bewegung zu erhalten, sind in Tabelle 34 die Veränderungen des maximalen dZ -Wertes sowie der maximalen Geschwindigkeit im Koordinatenursprung gegenüber der Einschränkung der Beschleunigung für ein Fahrzeug der Mittelklasse im Lastfall USNCAP dargestellt.

Tabelle 34 Veränderung von Maximalgeschwindigkeit und maximalem dZ -Wert bei reduzierter Abwärtsbeschleunigung für ein Fahrzeug der Mittelklasse im Lastfall USNCAP

ΔaZ	5 g	10 g	15 g
ΔvZ_{\max}	0,08 m/s	0,3 m/s	0,65 m/s
ΔdZ_{\max}	4 mm	14 mm	28 mm

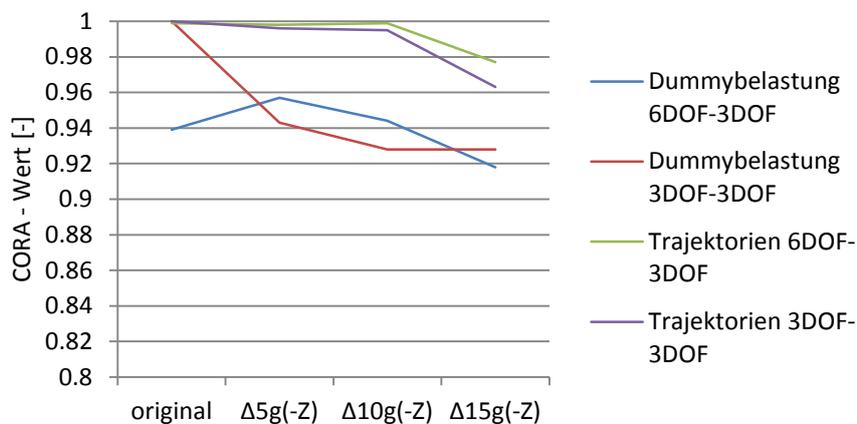


Abbildung 98 CORA-Abbildungswerte der Dummybelastungen und Trajektorien für Simulationen mit reduzierten Beschleunigungen der Nickbewegung ($-^0Z$) gegenüber den Basissimulationen mit 6DOF bzw. 3DOF für ein Fahrzeug der Mittelklasse im USNCAP Versuch

Abbildung 98 zeigt einen Verlauf der Abbildungswerte der Dummybelastungen sowie der Trajektorien. Eine Reduktion des Belastungswertes gegenüber der 6DOF-Simulation ist erst bei einer Reduktion von 15 g(!) ersichtlich. Bei den Trajektorien zeigt sich, dass bis zu einer Reduktion von 10 g die Abbildung um weniger als einen Prozentpunkt abweicht. Bei 15 g fallen die Werte um zwei bis vier Prozentpunkte ab. Abbildungswerte über 90 % wurden bisher als sehr hoch betrachtet.

Leider hat hier die Betrachtung von Abbildungswerten eine Einschränkung. Durch die Ähnlichkeit der Bewegung mit jener der Basissimulation gleichen sich die Verläufe der Messkanäle, was zu guten Abbildungswerten führt. Trotzdem können die Maximalwerte voneinander abweichen.

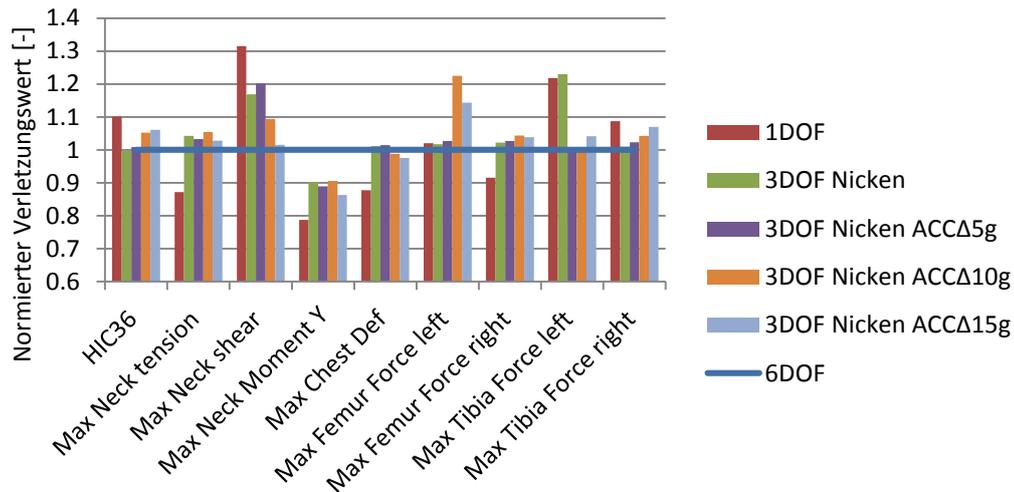


Abbildung 99 Vergleich der Verletzungswerte zwischen 6DOF, 1DOF, 3DOF-Nicken und Nickbewegungen mit eingeschränkten Beschleunigungen für die Mittelklasse im Lastfall USNCAP

In Abbildung 99 sind Verletzungswerte beispielhaft dargestellt. Dabei sind die Belastungen des linken Beins nicht zu beachten, da ihre Absolutwerte sehr gering sind. Der HIC36-Wert zeigt, dass schon bei einer Reduktion um 10 g ein Teil der Verbesserung gegenüber einer herkömmlichen Schlittenanlage mit einem Freiheitsgrad verloren geht. Im Gegenzug verbessert sich beispielsweise die Abbildung der maximalen Nackenscherkraft. Diese ist aber wieder auf die Kompensation zweier gegenläufiger Fehler zurückzuführen und kann deshalb nicht als systematisch eingestuft werden.

Trotz dieser Einschränkung kann eine Reduktion um ca. 10 g immer noch brauchbare Ergebnisse liefern. Ist die Einschränkung der maximalen Soll-Beschleunigung im Vorfeld bekannt, empfiehlt es sich, diese durch Filtern zu reduzieren.

Beschränkung der Aufwärtsbeschleunigung

Die Beschleunigung in positiver 0Z -Richtung beinhaltet eine Bewegungsumkehr. Dies ist eine besondere Herausforderung für den Anlagenbau, da aus einer Bremsung bis zum Stillstand (in 0Z) unterbrechungsfrei eine Beschleunigung entstehen muss. Der Einfachheit halber wurden diese Zustände bei der Beschränkung der Beschleunigung nicht unterschieden. Die Soll-Maximalbeschleunigungen sind hier geringer als in negativer 0Z -Richtung.

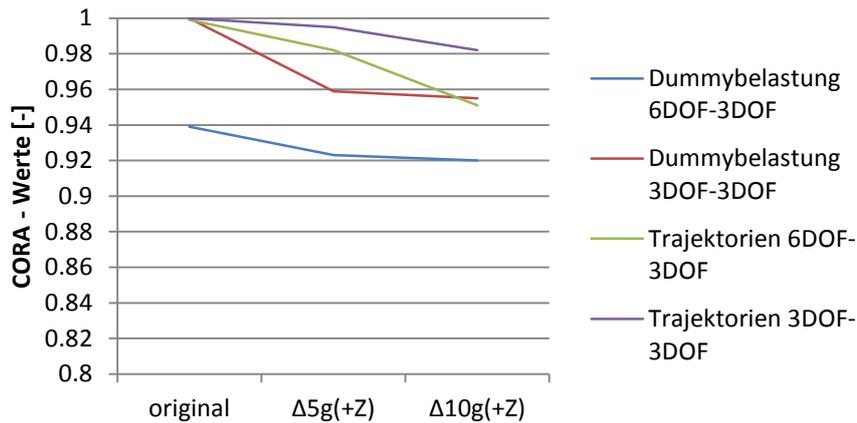


Abbildung 100 CORA-Abbildungswerte der Dummybelastungen und Trajektorien für Simulationen mit reduzierten Beschleunigungen der Nickbewegung (+⁰Z) gegenüber den Basissimulationen mit 6DOF bzw. 3DOF für ein Fahrzeug der Mittelklasse im USNCAP Versuch

Anders als in negativer ⁰Z-Richtung tritt hier eine sofortige Verminderung beider Abbildungswerte ein (Abbildung 100). Kopfwerte verändern sich schon bei einer Reduktion von 5 g um 4 %. Bei 10 g weichen auch Nackenwerte ab. Die maximale Abweichung ist dabei 25 %. Weiters entsteht ein Fehler der Kopftrajektorie von 12 mm. In dieser Richtung ist deshalb eine Reduktion um 5 g als äußerstes Limit zu betrachten.

Durch die Schwierigkeit der Bewegungsumkehr muss beim Anlagenbau diese Phase besonderes beachtet werden, auch wenn die Soll-Beschleunigungen vergleichsweise gering sind.

Beschränkung der Abwärtsgeschwindigkeit

Auch die Verfahrgeschwindigkeit kann ein limitierender Faktor sein (Abbildung 101). Geschwindigkeiten der Freiheitsgrade einer Anlage können durch die maximale Leistungsaufnahme begrenzt sein.

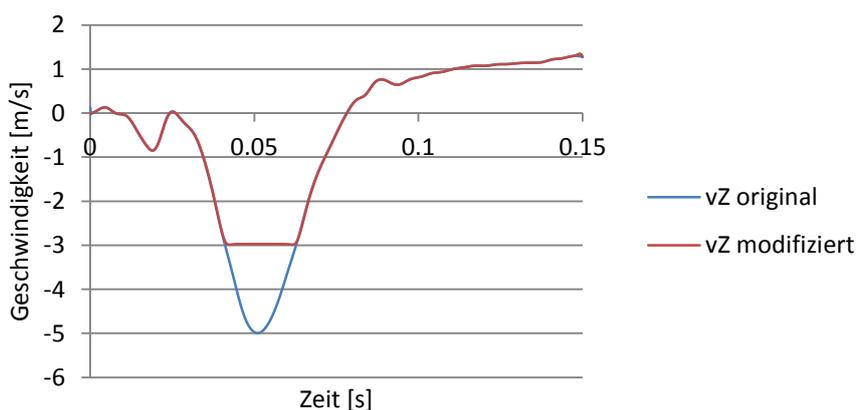


Abbildung 101 Geschwindigkeitsverlauf in ⁰Z-Richtung im Koordinatenursprung für ein SUV im Lastfall USNCAP

Geschwindigkeitsverläufe bilden im Vergleich zu Beschleunigungsverläufen meist nur ein einziges, breites „Tal“. Eine Reduktion der Geschwindigkeit wirkt sich deshalb schnell auf einen großen Zeitbereich aus. Die höchsten Soll-Geschwindigkeiten wurden bei SUV im Lastfall USNCAP beobachtet.

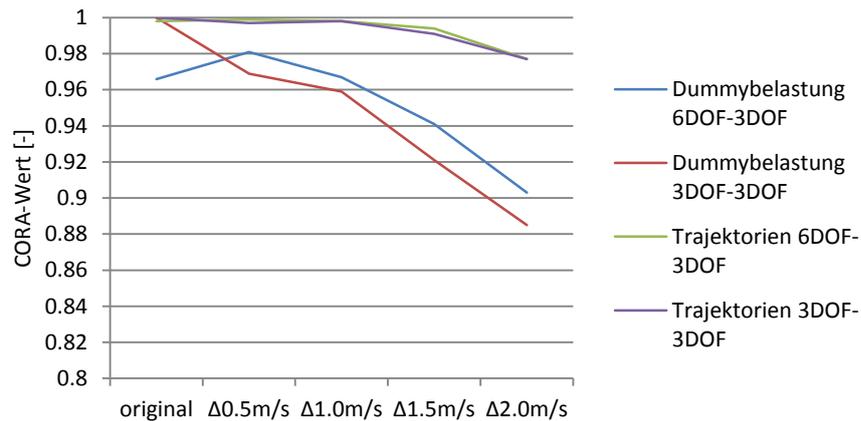


Abbildung 102 CORA-Abbildungswerte der Dummybelastungen und Trajektorien für Simulationen mit reduzierten Geschwindigkeiten der Nickbewegung ($- \overset{0}{Z}$) gegenüber den Basissimulationen mit 6DOF bzw. 3DOF für ein SUV im USNCAP Versuch

Abbildung 102 zeigt, dass sich die Abbildung gegenüber der Simulation mit sechs Freiheitsgraden erst ab einer Differenz von 1,5 m/s verringert. Eine Verringerung um 1,0 m/s kann in diesem Fall durchaus akzeptiert werden. Auch die maximalen Verletzungswerte ändern sich in diesem Bereich kaum.

Bei einem Fahrzeug der Mittelklasse verhalten sich die Abbildungswerte ähnlich, die Verletzungswerte driften aber schon früher ab. Dort entsteht schon bei einer Abweichung von 0,5 m/s ein Fehler von 4 % für den HIC36-Wert. Im Lastfall EuroNCAP führen Reduktionen generell zu schlechten Ergebnissen. Hier sind die Soll-Werte aber geringer als bei USNCAP.

Es ist also schwierig, einen akzeptablen Wert anzugeben. Eine Einschränkung der Geschwindigkeit ist auf jeden Fall problematisch. Im Fall des USNCAP-Versuchs kann aber eine Unterschreitung bis 1,0 m/s akzeptiert werden.

Beschränkung der Aufwärtsgeschwindigkeit

Die Aufwärtsgeschwindigkeit tritt sehr spät auf und beschreibt die Reboundphase (vgl. Abbildung 101). Soll-Geschwindigkeiten sind gering. Eine Reduktion dieser Geschwindigkeit zu null hätte zur Folge, dass die Reboundbewegung einfach nicht beachtet wird, was wiederum die Konzeption einer nickfähigen Anlage deutlich vereinfachen würde.

Trotz der späten Phase im Versuch tritt eine deutliche Verschlechterung der Abbildungen für die Lastfälle USNCAP und EuroNCAP auf, wenn man diese Bewegung ausschaltet. Die volle Geschwindigkeit ist aber nicht notwendig, da sie meist erst nach dem letzten Maximalwert der Dummybelastungen auftritt.

Anders verhält es sich bei ungegurteten Lastfällen. Hier ist die Reboundphase essentiell für das Verhalten des Dummies im Airbag.

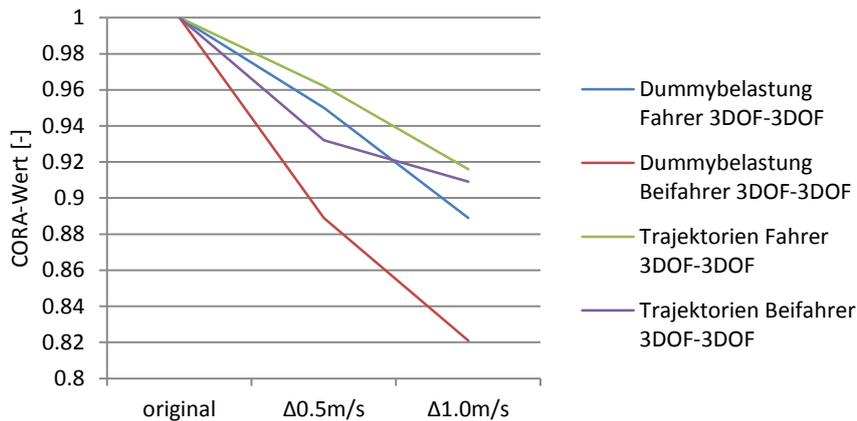


Abbildung 103 CORA-Abbildungswerte der Dummybelastungen und Trajektorien für Simulationen mit reduzierten Geschwindigkeiten der Nickbewegung (+ 0Z) gegenüber Basissimulationen mit 6DOF bzw. 3DOF für ein Fahrzeug der Mittelklasse im Versuch FMVSS 208 0°

Bei dem Versuch FMVSS 208 0° ist die Datenbasis auf eine ebene Bewegung begrenzt, was der tatsächlichen Kinematik sehr gut entspricht. Es wird daher nicht zwischen 6DOF und 3DOF unterschieden. In Abbildung 103 sind die Vergleiche für Fahrer und Beifahrer dargestellt. Auf der Beifahrerseite sinkt die Abbildung schon bei geringer Reduktion der Geschwindigkeit in positiver 0Z -Richtung stark ab. Die Reboundgeschwindigkeit sollte also in diesem Lastfall unbedingt eingehalten werden.

Filtern der Beschleunigungsverläufe der Gierbewegung im Lastfall Small Overlap

Aus bisherigen Untersuchungen ist bekannt, dass der Insasse nicht sensitiv auf Gierbewegungen reagiert, da er lateral weitgehend vom Fahrzeug entkoppelt ist. So wurde lediglich eine Vergleichssimulation mit sehr starker Filterung durchgeführt. Dabei wurden bei Simulationen mit sechs Freiheitsgraden die Beschleunigungskomponenten a_Y und $\dot{\omega}_Z$ mit der Klasse CFC 10 gefiltert. Die translatorischen Spitzenbeschleunigungen in 0Y -Richtung reduzieren sich dadurch von 30 g zu ca. 5 g. Die maximalen Winkelbeschleunigungen können halbiert werden.

Die Abbildungswerte zwischen 6DOF und 6DOF mit gefilterten Gierbewegungsanteilen liegen bei 0,964 für Dummybelastungen und 0,996 für Trajektorien. Auch die Verletzungswerte verändern sich kaum. Gierbewegungen können also stark gefiltert werden, ohne das Verhalten des Insassen zu verändern.

Beschränkung der Beschleunigung von Gierbewegungsanteilen im Lastfall Small Overlap

Durch die Form der Verläufe der Gierbewegungen empfiehlt es sich bei einer Reduktion der Winkelbeschleunigung in positiver 0Z -Richtung, die Beschleunigung auch in negativer 0Z -Richtung zu beschränken, da dadurch die Fehler kompensiert werden können. Eine beidseitige Beschleunigungsreduktion zum gleichen Maximalwert führt aber zu eher zufälligen Bewegungen, je nach Verhältnis der abgeschnittenen Flächen oberhalb und unterhalb der x-Achse im Beschleunigungsdiagramm. So sind auch in den Ergebnissen keine Tendenzen zu erkennen. Da aber durch Filterung eine Reduktion der translatorischen Beschleunigungen zu nur 5 g erreicht werden kann, kann von den Ergebnissen dieser Untersuchung abgesehen werden.

Beschränkung der negativen Winkelgeschwindigkeit der Gierbewegung im Lastfall Small Overlap

Bei der Beschränkung der Geschwindigkeiten wird von der Winkelgeschwindigkeit ausgegangen. Aus der Vielzahl an möglichen Einschränkungen wird exemplarisch eine ausgewählt, die ohne Vorzeichenwechsel der Winkelgeschwindigkeit auskommt.

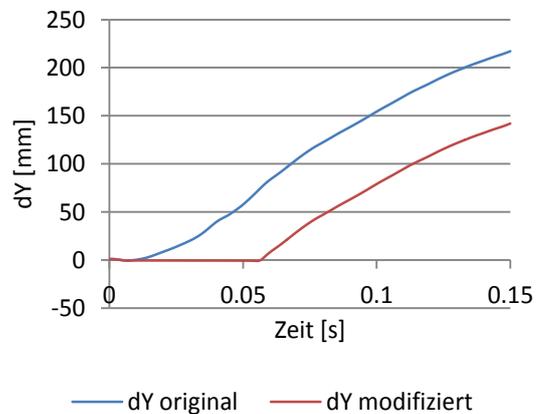
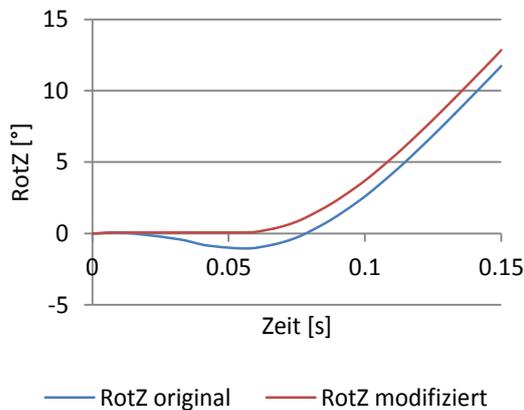


Abbildung 104 Winkelverläufe (0Z) der originalen sowie modifizierten Bewegung bei Begrenzung negativer Winkelgeschwindigkeiten für ein Fahrzeug der Mittelklasse im Lastfall Small Overlap

Abbildung 105 dY-Verläufe der originalen sowie modifizierten Bewegung bei Begrenzung negativer Winkelgeschwindigkeiten für ein Fahrzeug der Mittelklasse im Lastfall Small Overlap

Abbildung 104 zeigt den Winkelverlauf um die 0Z -Achse, der sich durch die beschriebene Einschränkung ergibt. Der zugehörige translatorische Verlauf ergibt sich daraus, wie in Abbildung 105 dargestellt, analog zu den Überlegungen zur Abstimmung zwischen Rotation und Translation der Nickbewegung.

Bei einer solchen Bewegung sinken die Abbildungswerte unter jene einer Anlage mit einem Freiheitsgrad. Dadurch kann diese Veränderung nicht akzeptiert werden.

Beschränkung der positiven Winkelgeschwindigkeit der Gierbewegung im Lastfall Small Overlap

Die Winkelgeschwindigkeit im positiven 0Z -Bereich steigt bei den vorhandenen Versuchen monoton an (Abbildung 106).

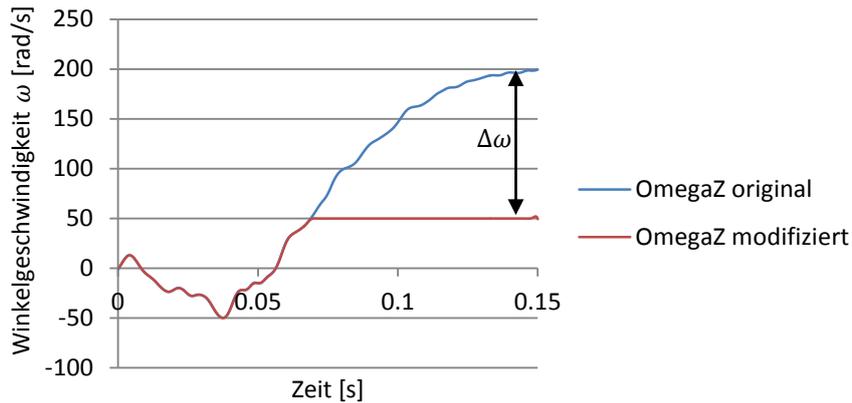


Abbildung 106 Winkelgeschwindigkeitsverläufe der originalen sowie modifizierten Bewegung bei Begrenzung positiver Winkelgeschwindigkeiten für ein Fahrzeug der Mittelklasse im Lastfall Small Overlap

Eine Beschränkung dieser Winkelgeschwindigkeit tritt umso später auf, je geringer die Beschränkung ist. Je früher die Beeinflussung auftritt, desto größer sind die Bereiche der Evaluierungsintervalle, die von der Veränderung betroffen sind. So erklärt sich ein progressiver Abfall der Abbildungswerte bei zunehmender Einschränkung der Winkelgeschwindigkeit.

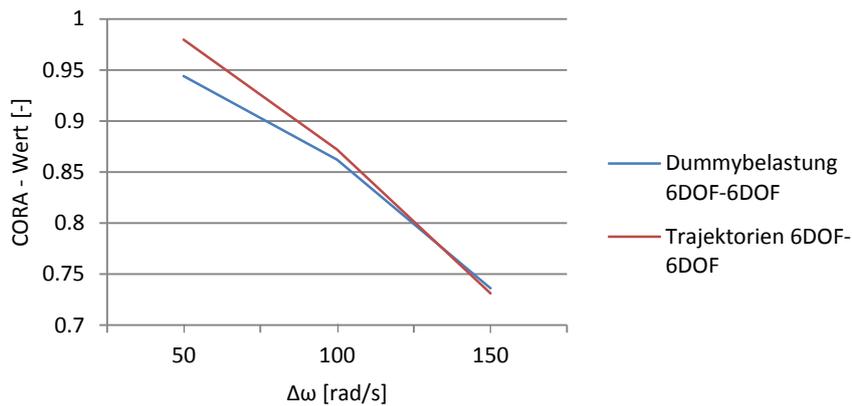


Abbildung 107 CORA-Abbildungswerte der Dummybelastungen und Trajektorien für Simulationen mit reduzierten Winkelgeschwindigkeiten der Gierbewegung (+ ⁰Z) gegenüber der Basissimulation mit 6DOF für ein Fahrzeug der Mittelklasse im Versuch Small Overlap

Eine Reduktion um 50 rad/s kann hier mit der Dummybelastungsabbildung von 95 % als akzeptabel angesehen werden. Größere Reduktionen fließen so früh in den Bewegungsverlauf ein, dass sich die Abbildung zu stark verschlechtert (Abbildung 107). Dabei konnten bereits bei einer Reduktion um 100 rad/s ähnliche Abbildungen mit weniger Freiheitsgraden erzielt werden.

6.1.3 Ausgleichende Bewegungsänderung

Bisher wurde davon ausgegangen, dass bei einem Übersteigen der Maximalwerte einer Anlage durch die Soll-Werte (Beschleunigung, Geschwindigkeit) ein konstanter Maximalwert eingehalten wird, und nach dem Zeitintervall der Beschränkung wieder genau die Vorgabekurve nachgefahren wird. Wenn die Möglichkeiten einer Anlage aber genau bekannt sind, kann der Vorgabeverlauf im Vorfeld so modifiziert werden, dass Fehler des Integrals ausgeglichen werden. Dazu muss der

Vorgabeverlauf vor und nach dem Bereich der Einschränkung durch den Anlagenmaximalwert erhöht werden.

Ausgleichende Veränderung der Beschleunigung

Bei Beschleunigungsverläufen beschränken sich die Reduktionen meist auf einzelne Peaks. Die Veränderung der Verläufe bleibt daher zeitlich im Rahmen. Auch ein Ausgleich fordert keine größeren Zeitbereiche ein.

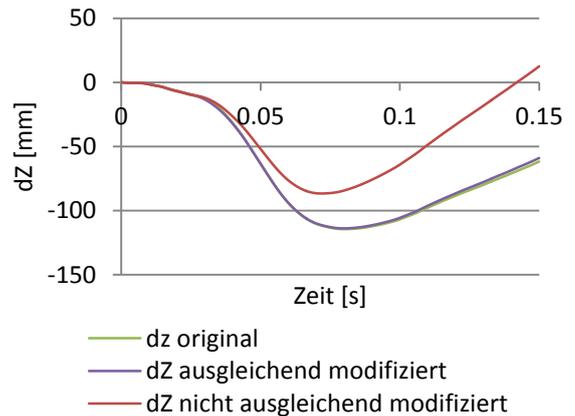
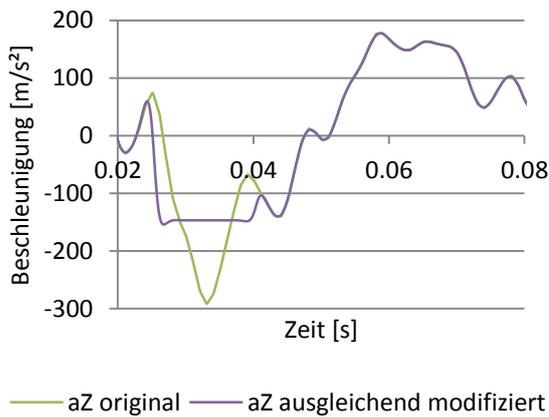


Abbildung 108 Beispielhafter Beschleunigungsverlauf in ⁰Z-Richtung mit Beschränkung der Maximalbeschleunigung und Ausgleich des Fehlerintegrals

Abbildung 109 dZ-Verläufe der originalen Bewegung sowie bei reduzierter Beschleunigung mit und ohne Ausgleich

Abbildung 108 zeigt die ausgleichende Modifikation des Beschleunigungsverlaufs beispielhaft für eine Maximalbeschleunigung von 150 m/s². Der resultierende dZ-Verlauf (Abbildung 109) deckt sich mit dem originalen Verlauf.

Tabelle 35 Durch CORA berechnete Abbildungswerte für reduzierte Beschleunigungen einer nickfähigen Anlage (3DOF) in positive und negative ⁰Z-Richtung, mit und ohne Ausgleich im Vergleich mit der Originalbewegung mit 6DOF, sowie 3DOF für ein Fahrzeug im Lastfall USNCAP

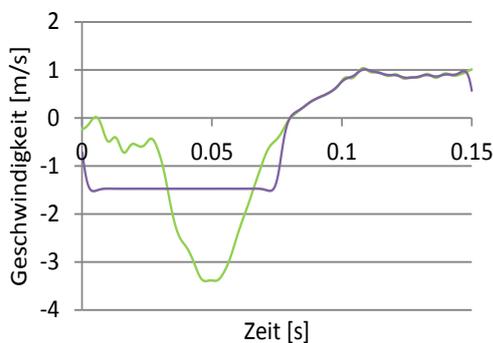
	Vergleichsmodus	Belastungen $\Delta 150\text{m/s}^2$ in $-^0\text{Z-Richtung}$	Trajektorien $\Delta 150\text{m/s}^2$ in $-^0\text{Z-Richtung}$	Belastungen $\Delta 100\text{m/s}^2$ in $+^0\text{Z-Richtung}$	Trajektorien $\Delta 100\text{m/s}^2$ in $+^0\text{Z-Richtung}$
Nicht ausgleichende Modifikation	3DOF vs 6DOF	0,918	0,977	0,920	0,951
	3DOF vs 3DOF	0,928	0,963	0,955	0,982
Ausgleichende Modifikation	3DOF vs 6DOF	0,940	0,999	0,949	0,998
	3DOF vs 3DOF	0,926	0,998	0,936	0,998

Die Abbildungswerte in Tabelle 35 machen deutlich, dass sich eine ausgleichende Bewegungsänderung dazu eignet, die Abbildung der Trajektorien wieder wesentlich zu verbessern. Im Vergleich mit der ursprünglichen (nicht modifizierten) 3DOF-Bewegung ergeben sich aber für die Abbildungswerte der Dummybelastungen sogar geringfügige Verschlechterungen. Durch eine Filterung der Beschleunigungssignale reduzieren sich die Maximalbeschleunigungen auf ein ähnliches Maß. Dabei werden aber etwas bessere Abbildungswerte erzielt. Der hier gezeigte Beschleunigungsausgleich kann also als letztes Mittel eingesetzt werden, wenn das Filtern nicht ausreicht.

In dieser Untersuchung wurden Abbildungswerte der Trajektorien scheinbar unabhängig von Abbildungswerten der Dummybelastungen verändert. Das ist nur möglich, da die Trajektorien viel geringere Frequenzen aufweisen und die Abbildung anhand von Korridoren ermittelt wird. Seitens der Belastungen können fehlerhafte Kräfteinträge von kurzer Dauer schon zu einer veränderten Abbildung führen, während bei den Trajektorien lediglich die Krümmung verändert wird, die sich kaum auf die Abbildung auswirkt. Bei der ausgleichenden Bewegungsänderung werden genau diese Krümmungen verändert, um die Trajektorien in die Korridore zu lenken. Das kann aber nur durch fehlerhafte Kräfteinträge bewerkstelligt werden.

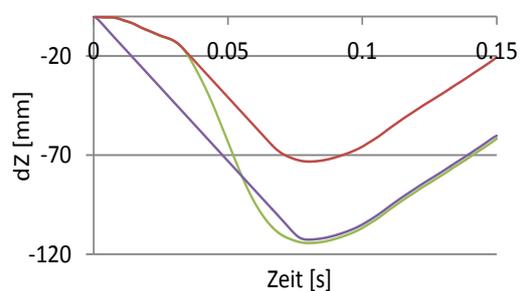
Ausgleichende Veränderung der Geschwindigkeit

Ein Ausgleich bei reduzierter Geschwindigkeit ist aufgrund der Verlaufsform wesentlich schwieriger als bei reduzierter Beschleunigung.



— vz original — vz ausgleichend modifiziert

Abbildung 110 Beispielhafter Geschwindigkeitsverlauf in 0Z -Richtung mit Beschränkung der Maximalgeschwindigkeit und Ausgleich des Fehlerintegrals



— dZ original
— dZ ausgleichend modifiziert
— dZ nicht ausgleichend modifiziert

Abbildung 111 dZ-Verläufe der originalen Bewegung sowie bei reduzierter Geschwindigkeit mit und ohne Ausgleich

Ein Ausgleich einer zu geringen Maximalgeschwindigkeit kann nur über einen sehr großen Zeitbereich erfolgen (Abbildung 110). Dadurch ist in diesem Zeitbereich die Dynamik aber fehlerhaft (Abbildung 111). Das zeigt sich auch in den Abbildungswerten. Alle Abbildungen sind durch einen solchen Ausgleich sogar schlechter als ohne Ausgleich. Aufgrund der Verlaufsform kann die maximal notwendige Geschwindigkeit auch durch Filterung nicht reduziert werden. Aus diesem Beispiel kann nicht auf alle möglichen Geschwindigkeitsverläufe und Beschränkungen geschlossen werden. Es zeigt aber, dass eine Umsetzung ausgleichender Geschwindigkeitsänderung sehr schwierig ist.

6.1.4 Fazit

Die Untersuchungen zeigen, dass das Verhalten des Dummys gutmütig auf leicht veränderte Bewegungen des Schlittens reagiert. Durch Filtern der entsprechenden Bewegungsanteile können sogar Vorteile entstehen, da das Dummyverhalten kaum verändert wird, sich die Anforderungen an eine Anlage aber deutlich reduzieren. Entspricht eine Anlage den geforderten Beschleunigungen nicht vollständig, ist zum einen das Verhalten bei geringen Abweichungen gutmütig. Zum anderen kann durch Filterung der Vorgabeverläufe sowie durch ausgleichende Bewegungsberechnung die Abbildung wieder gesteigert werden. Erreicht eine Anlage die

geforderte Geschwindigkeit nicht, so können auch hier leichte Veränderungen hingenommen werden. Sehr schnell verschlechtert sich aber die Abbildung mit zunehmender Geschwindigkeitsabweichung. Hier gibt es keine Möglichkeit durch Filtern oder ausgleichende Bewegungsberechnung eine Verbesserung zu erzielen. Es werden folgende Aussagen abgeleitet:

- Filtern von Beschleunigungsanteilen ist für die Umsetzung von Schlittenanlagen nicht nur zulässig, sondern sogar empfehlenswert.
- Ein nicht Erreichen der Vorgabebeschleunigungen (nach Filterung) kann abhängig vom Ausmaß der Differenz toleriert werden. Ist eine Differenz zwischen Maximalbeschleunigungen der Anlage und Vorgabebeschleunigungen bekannt, kann die Abbildung durch ausgleichende Vorgabebewegungen entscheidend verbessert werden.
- Ein nicht Erreichen der Vorgabegeschwindigkeiten sollte möglichst ausgeschlossen werden. Hier ist keine Kompensation durch eine ausgleichende Vorgabebewegung möglich.

6.2 Einsatz von Schlittenanlagen im Kontext streuender Fahrzeugversuche und Unschärfen während des Entwicklungsprozesses

Es wurde erläutert, mit welchen Freiheitsgraden am Schlitten und mit welcher Dynamik ein Gesamtfahrzeugversuch gut abgebildet werden kann. Die Fehler, die eine Anlage gegenüber der Vorgabe des Gesamtfahrzeugversuchs macht, können als systematische Fehler bezeichnet werden. Diese Betrachtung ist aber im Hinblick auf den Einsatz von Schlittenanlagen im Entwicklungsprozess unvollständig. Es müssen auch die Unsicherheiten berücksichtigt werden. Das sind:

1. Versuchsstreuungen
2. Veränderungen während des Entwicklungsprozesses

Versuchsstreuungen betreffen Fahrzeuge desselben Modellstands. Das Ergebnis eines Gesamtfahrzeugversuchs ist nicht perfekt reproduzierbar, und der Versuchsausgang ist nur innerhalb eines gewissen Streubandes gesichert. Auch eine Schlittenanlage muss daher einen Gesamtfahrzeugversuch nicht perfekt abbilden, die Ergebnisse sollten aber innerhalb des Streubandes liegen und der für den Dummy kritische Versuch sollte vom Band der Schlittenanlage abgedeckt sein.

Die Fahrzeugkinematik kann sich aufgrund des Entwicklungsprozesses ändern. Vor dem ersten Prototypenversuch gibt es Simulationen, die mit fortschreitendem Entwicklungsstand genauer werden. Dort wo Realversuche vorhanden sind verändern sich die Bewegungen aufgrund von verschiedenen Modellständen. In diesem Kontext stellt sich die Frage, wann Schlittenanlagen eingesetzt werden. Durch bessere Abbildungen am Schlitten werden sich die Einsatzgebiete in Zukunft möglicherweise erweitern.

Leider konnte ein realer Entwicklungsprozess eines Fahrzeuges zur Klärung dieser Fragen nicht rekonstruiert werden. Die Relevanz kann aber durch Vergleich mehrerer Versuche desselben Fahrzeugmodells abgeschätzt werden. Es ist zu beachten, dass dabei auch Modellstandsänderungen einfließen, und die abgeleiteten Anforderungen an eine Anlage tendenziell zu gering sind. Zufällige Fehler der Versuchsstreuung erweitern sich in der folgenden

Untersuchung um etwaige, relevante Modellstandsänderungen. Die Aussagen entsprechen daher einer nicht exakten Abschätzung.

6.2.1 Methode

Zuerst werden die Bewegungen verschiedener, über einen Entwicklungsprozess verteilter Versuche desselben Fahrzeugmodells mittels CORA-Analyse verglichen. Der schlechteste Abbildungswert zwischen zwei Versuchen ergibt die untere Grenze des Streubandes der Abbildungswerte. Da sich solche Versuche natürlich stark ähneln können, erstreckt sich das Streuband bis 100%.

Aus den Bewegungen mit sechs Freiheitsgraden werden Schlittenbewegungen mit drei sowie einem Freiheitsgrad berechnet. Diese werden nicht nur wie bisher mit ihrer originalen 6DOF-Simulation verglichen, sondern auch mit den 6DOF-Simulationen der anderen Versuche. Diese Untersuchung behandelt die Frage, ob mit einer Schlittenkinematik, die aus einem Realversuch berechnet wurde, ein anderer, unbekannter Versuch ausreichend prognostiziert werden könnte.

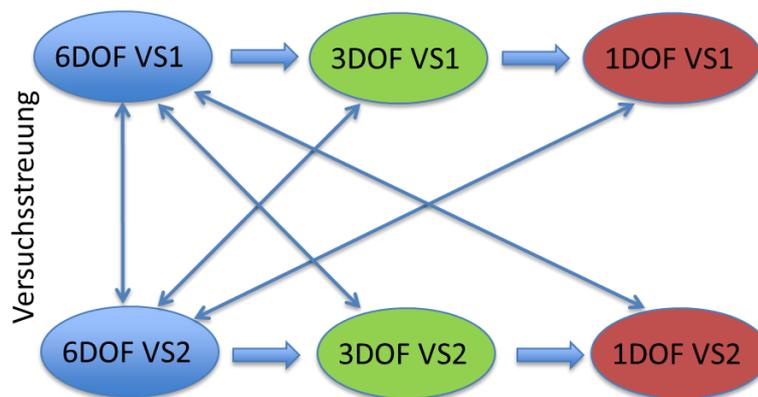


Abbildung 112 Methodik der Untersuchung von Abbildungen innerhalb der Versuchsstreuungen beispielhaft für zwei Versuche

Abbildung 112 zeigt beispielhaft die Vergleichspfade für zwei Versuche. Tatsächlich wurden nicht nur zwei, sondern jeweils alle verfügbaren Versuche herangezogen. Als Datenbasis wurden Lastfälle und Fahrzeuge gewählt, bei denen eine größere Versuchsanzahl verfügbar war (Tabelle 36).

Tabelle 36 Datenbasis für Untersuchungen der Abbildung im Hinblick auf Versuchsstreuungen

Lastfall	Fahrzeug	Versuchsanzahl
USCNP	1 Fahrzeug der Klasse SUV	5
EuroNCAP	1 Fahrzeug der Mittelklasse	5
EuroNCAP	1 Fahrzeug der Klasse Kleinwagen	7

Die Fragestellungen dieser Untersuchung werden wie folgt definiert:

1. Ist durch eine 3DOF-Schlittenanlage eine signifikante Steigerung der Abbildungsgüte hin zum Streuband der 6DOF-Pulse möglich?

2. Sind die systematischen Fehler durch Schlittenanlagen kleiner oder größer als die zufälligen Fehler der Versuchsstreuung?

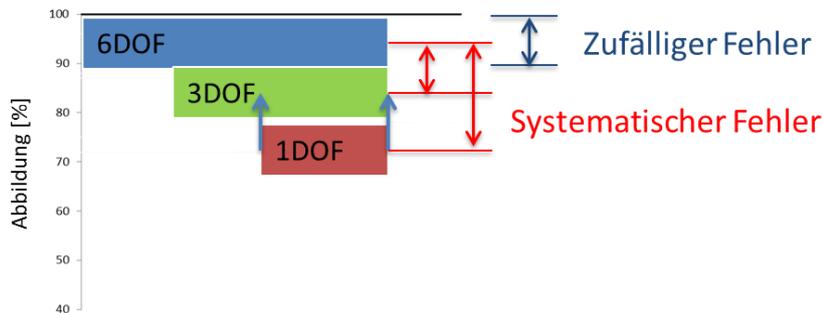


Abbildung 113 Grafische Interpretation der Fragestellungen der Analyse von Abbildungen hinsichtlich Versuchsstreuungen

Für die beiden Abbildungswerte der Dummybelastungen, sowie der Trajektorien können grafische Schaubilder wie in Abbildung 113 generiert werden. Decken sich dort die grünen oder roten Bereiche mit dem blauen Bereich, so ist diese Konfiguration in der Lage, eine gleich gute Abbildung eines Gesamtfahrzeugversuchs zu liefern wie ein weiterer Gesamtfahrzeugversuch.

6.2.2 Ergebnisse

USNCAP

Das Ergebnis für USNCAP-Versuche ist eindeutig. Während eine Berücksichtigung der Nickbewegung zu Abbildungen führt, die fast zur Gänze innerhalb des Streubandes der 6DOF-Versuche liegen, sind Abbildungen mit nur einem Freiheitsgrad immer außerhalb dieses Bandes. Das bedeutet, dass bei einer 1DOF-Schlittenanlage ein Verhalten des Dummies generiert wird, das so bei Gesamtfahrzeugversuchen nicht auftritt.

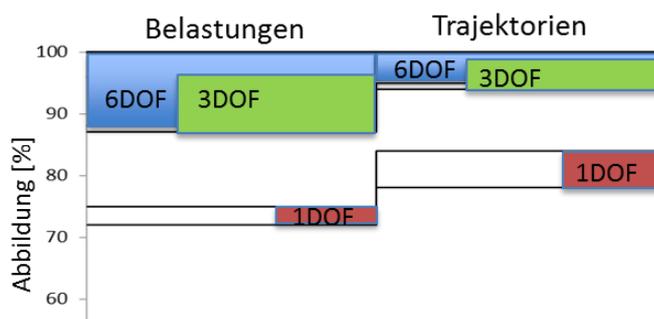


Abbildung 114 Schaubild der Abbildungen mit unterschiedlichen Freiheitsgraden im Vergleich zum Streuband der Realversuche für den Lastfall USNCAP

Abbildung 114 spricht auch vor dem Hintergrund der Versuchsstreuung eindeutig für eine Anlage mit drei Freiheitsgraden. Eine weitere Erhöhung der Komplexität bringt keine zusätzlichen Vorteile. Betrachtet man das schmale Band bei 1DOF, wird klar, dass systematische Fehler durch den Wegfall der Nickbewegung wesentlich größer sind als Fehler, die von unterschiedlichen θ -Pulsen stammen.

EuroNCAP – Mittelklasse

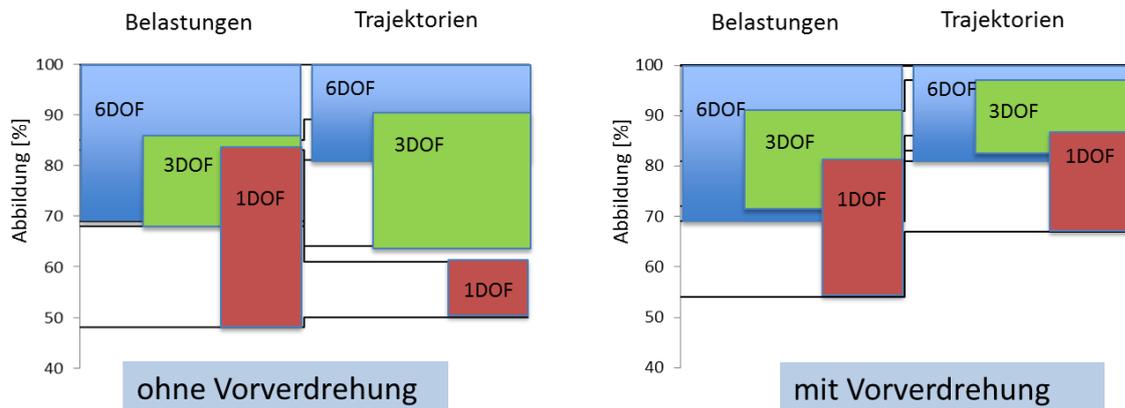


Abbildung 115 Schaubild der Abbildungen mit unterschiedlichen Freiheitsgraden im Vergleich zum Streuband der Realversuche für den Lastfall EuroNCAP mit und ohne Vorverdrehung für ein Fahrzeug der Mittelklasse

Abbildung 115 zeigt bei diesem EuroNCAP-Fall wesentlich größere Bandbreiten der 6DOF-Bewegungen als beim USNCAP-Versuch. Hier sind auch durch 1DOF Abbildungen innerhalb des 6DOF-Streubandes möglich. Systematische Fehler sind aber bei 1DOF wesentlich größer als bei 3DOF. Bei der Verwendung von Vorverdrehung werden die systematischen Fehler bei drei Freiheitsgraden zur Gänze ausgeschaltet.

EuroNCAP – Kleinwagen

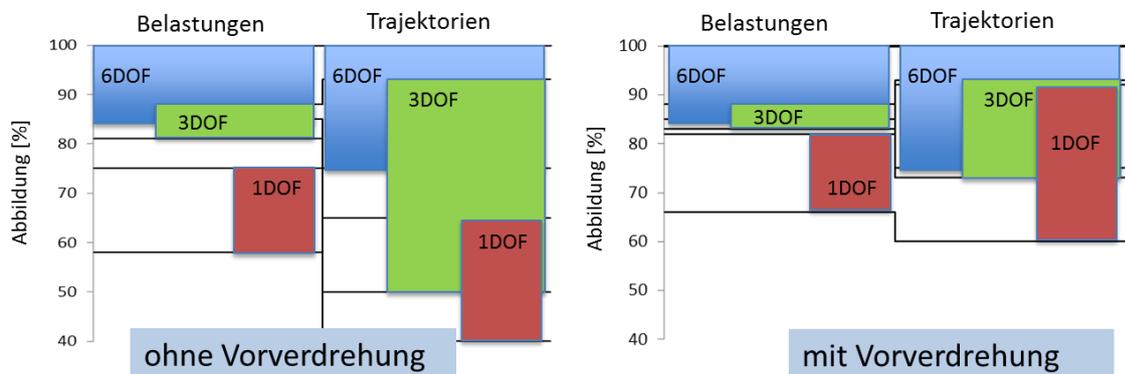


Abbildung 116 Schaubild der Abbildungen mit unterschiedlichen Freiheitsgraden im Vergleich zum Streuband der Realversuche für den Lastfall EuroNCAP mit und ohne Vorverdrehung für einen Kleinwagen

Auch für dieses Fahrzeug bestätigen sich in Abbildung 116 die bisherigen Aussagen. Die Streubreite der 6DOF-Bewegungen ist hier geringer als bei der Mittelklasse. Wieder zeigt sich der Vorteil einer Anlage mit drei Freiheitsgraden. Diese Bewegung ist ausreichend, um die Gesamtfahrzeugversuche innerhalb der Streuung abzubilden. Vorverdrehung leistet einen wesentlichen Beitrag, systematische Fehler zu verringern.

6.2.3 Fazit

Die Vorteile von Schlittenanlagen mit drei Freiheitsgraden relativieren sich im Kontext streuender Fahrzeugversuche wider Erwarten nicht. Die Untersuchungen zeigen deutliche Vorteile, da ein besonders robustes Ergebnis innerhalb der üblichen Streubandbreiten erzielt werden kann. Gleichzeitig zeigt sich, dass eine weitere Erhöhung der Komplexität für die untersuchten Lastfälle

möglicherweise nicht sinnvoll ist. Im Falle der EuroNCAP-Untersuchungen wird der Vorteil der Applikation von Vorverdrehung unterstrichen.

Für eine detailliertere Untersuchung müsste die Veränderung der Fahrzeugbewegungen über den Entwicklungsprozess bekannt sein (Bewegungen der Strukturberechnung, Prototypenbewegungen, etc.). Hier wurden Realversuchsbewegungen über einen gesamten Entwicklungsprozess betrachtet. Seitens der Realversuchsdaten würden sich bei einer Detailanalyse also die Streubänder verengen, was die Aussagen nicht verändern würde. Strukturberechnungsbewegungen wurden aber nicht berücksichtigt.

Seitens der Fahrzeugstruktur wird versucht, Versuchsstreuungen zu vermindern. Gelingt dies zukünftig besser, so bleibt bei einer Anlage mit drei Freiheitsgraden der Vorteil gegenüber einer Anlage mit einem Freiheitsgrad bestehen, da dann auch die Streubandbreite der 3DOF-Bänder verringert wird. Das bedeutet, dass derzeit eine gezieltere Abbildung möglich ist als nur zufällig innerhalb der Versuchsstreuung und so noch Spielraum für reduzierte Streuungen besteht, bevor auch für drei Freiheitsgrade systematische Fehler augenscheinlich werden.

7 Umsetzung von Schlittenanlagen

Dieses Kapitel geht auf konstruktive Möglichkeiten ein, die anhand der gewonnenen Erkenntnisse den Anforderungen moderner Entwicklungsprozesse entsprechen.

7.1 Anforderungen an Schlittenanlagen

Schlittenanlagen, die die Komplexität von 1DOF-Anlagen übertreffen, sollten jedenfalls drei Freiheitsgrade aufweisen (Translation 0X , Translation 0Z , Rotation 0Y). Damit kann das Dummyverhalten bei allen derzeit relevanten Frontalcrashtest-Lastfällen mit Ausnahme des Small Overlap Tests hinreichend gut abgebildet werden. Diese Freiheitsgrade müssen zur Abbildung der verschiedenen Lastfälle und Fahrzeuge frei einstellbar sein. Des Weiteren sollten sich die Freiheitsgrade möglichst nicht beeinflussen. Herkömmliche Schlittenanlagen müssen meist auf den Vorgabepuls kalibriert werden. Eine Anlage, bei der sich technisch bedingt die Kalibrierung eines Freiheitsgrades auf die Kalibrierung der anderen Freiheitsgrade auswirkt, könnte unverhältnismäßig aufwändig zu betreiben sein.

Wie gezeigt wurde, ist auch die Möglichkeit zur stufenlosen Einstellung einer Vorverdrehung der Karosse um die 0Z -Achse wichtig. Eine solche Möglichkeit ist technisch leicht umsetzbar und ermöglicht die Abbildung asymmetrischer Lastfälle.

Ein Feld, das bei Neuentwicklungen von Schlittenanlagen in Betracht gezogen werden kann, betrifft Fragestellungen der integralen Sicherheit mit der Gesamtbetrachtung von Pre-Crash-Phase und Crash-Phase. Die Abbildung einer Pre-Crash-Phase auf einer Anlage im Rückwärtsprinzip ist schwierig. Wird die Karosserie durch Kräfte der Pre-Crash-Phase im Rückwärtsprinzip beschleunigt, so muss die Crash-Phase mit ihren hohen Kräften den Schlitten mit seiner Ausgangsgeschwindigkeit weiter beschleunigen. Das erfordert eine sehr hohe Leistung. Hier ist eine Anlage im Vorwärtsprinzip, bei der die vorhandene kinetische Energie zur Erzeugung der Bewegungskomponenten verwendet werden kann, klar im Vorteil.

7.2 Problemstellungen bei der Umsetzung einer mehrdimensionalen Schlittenbewegung

Durch die hohen Kräfte können Mechanismen mit drei Freiheitsgraden sehr komplex werden. Vor allem die Bewegungsumkehr (Bsp. Nickbewegung) für den Rebound ist schwierig. Bisher umgesetzte Anlagen lösen dieses Problem auf unterschiedliche Weise (siehe Kapitel 1.5).

Bei einer Vorverdrehung der Karosse am Schlitten um die 0Z -Achse ist zu beachten, dass für lokales Nicken (siehe Kapitel 5.7) auch die Orientierung der Nickachse eingestellt werden muss. Das ist auf bisher umgesetzten Anlagen nicht möglich. Eine technische Umsetzung wäre sehr komplex. Wie in Kapitel 5.8.3 beschrieben, bietet globales Nicken, also eine Nickachse normal zur Schlittenbewegungsrichtung, ein ebenso großes Potential für die Abbildung von Gesamtfahrzeugversuchen. Hier muss die Nickachse nicht verdreht werden.

Bei einer Abbildung von Pre-Crash-Phasen ist zu beachten, dass eine deutlich höhere Ausgangsgeschwindigkeit erreicht werden muss als für die Abbildung von Crashtests ohne Pre-

Crash-Phase. Das bedingt eine längere Anlaufspur. Zusätzlich muss ein Bereich für eine definierte Pre-Crash-Bremung vorgesehen werden. Dieser Bereich ist nicht nur für die Umsetzung der Fahrzeugbewegung, sondern auch für die Filmtechnik eine Herausforderung, da so große Hallenbereiche bisher durch die Videosysteme nicht abgedeckt wurden. Eine Applikation einer Nickbewegung während der Pre-Crash-Phase ist nach ersten Erkenntnissen [53] nicht zwingend erforderlich.

7.3 Neues Anlagenkonzept

Am Institut für Fahrzeugsicherheit wurde eine entsprechende Anlage konzipiert. Es handelt sich um eine Anlage im Vorwärtsprinzip mit drei Freiheitsgraden zur Darstellung der Nickbewegung. Die Nickbewegung wird dabei durch Kulissenführungen umgesetzt. Ein Patent der Firma Seattle Safety verfolgt einen ähnlichen Weg im Rückwärtsprinzip [51]. Das Konzept des VSI lehnt sich an herkömmliche Schlittenanlagen im Vorwärtsprinzip an und ist in Abbildung 117 dargestellt.

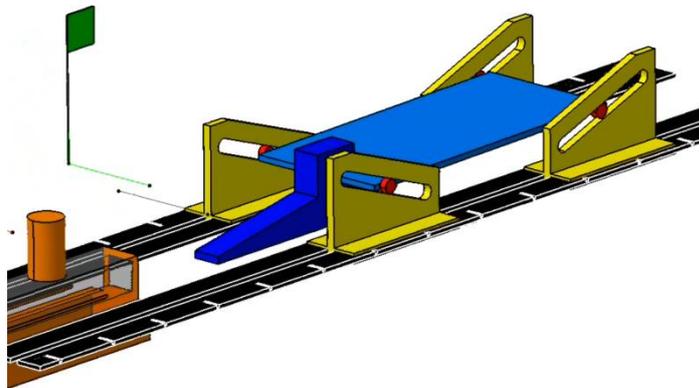


Abbildung 117 Prinzipdarstellung des VSI-Schlittenanlagenkonzepts

Bei diesem Konzept werden die drei Freiheitsgrade über das Zusammenspiel der Bewegungen von Schlittenaufbau (blau) und zweier unabhängig voneinander beweglichen Kulissenpaare (gelb) in 0X -Richtung geregelt. Ein Bewegungsablauf inklusive einer Nickbewegung in der Pre-Crash Phase wird in Abbildung 118 dargestellt. Länge und Farbe der gezeigten Pfeile beschreiben die jeweiligen Bauteilgeschwindigkeiten. Bei geeigneter Wahl der Kulissenwinkel ist es möglich, eine Bewegungsumkehr in 0X -Richtung der Einzelkomponenten zu vermeiden.

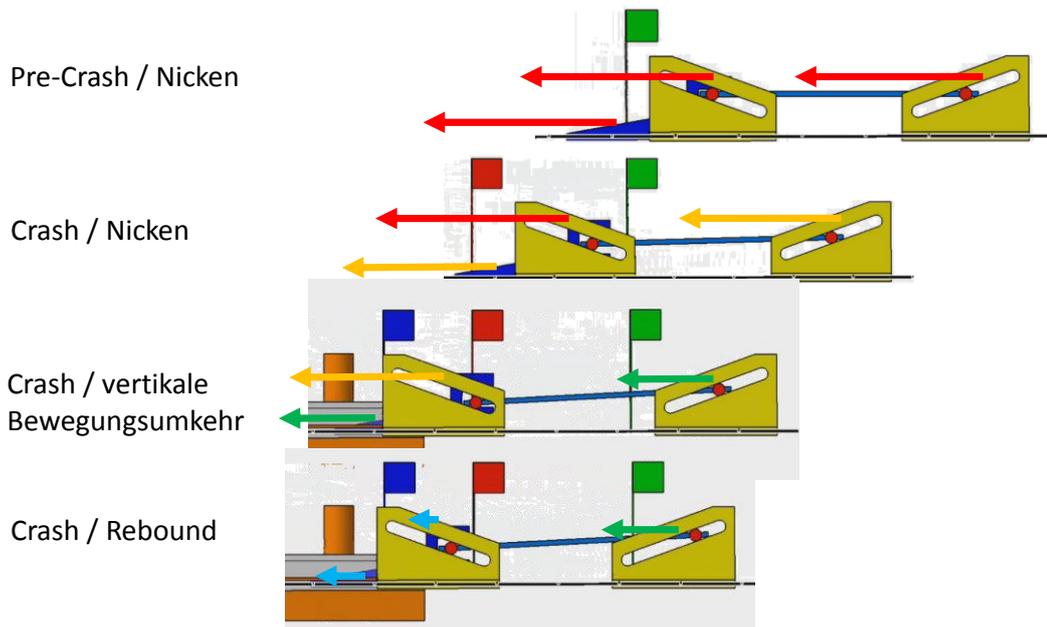


Abbildung 118 Bewegungsablauf des VSI-Schlittenanlagenkonzepts und Geschwindigkeitsverhältnisse der Einzelkomponenten

7.3.1 Funktionsweise des VSI-Schlittenanlagenkonzepts

Die Hauptbremseinrichtung des Schlittens erfolgt durch einen horizontal geführten Dorn, der beispielsweise durch eine Hydropulsanlage [23] verzögert wird. Der Dorn muss mit dem Schlittenaufbau in 0Y -Richtung drehbar und in 0Z -Richtung verschiebbar verbunden sein. Das kann mittels einer Koppelstange oder einer Führung erfolgen. Die Führungen des Schlittenaufbaus in den Kulissen (rot) müssen festgebremst werden können, um ein definiertes Anfahren zu ermöglichen. Die Kulissen können in ihren Bodenführungen geregelt bewegt werden. Das kann beispielsweise durch elektrische Linearantriebe erfolgen.

Die Nickbewegung kommt dadurch zustande, dass die Kulissen eine Relativbewegung zum Schlittenaufbau vollführen. Die Neigungswinkel der Kulissen müssen dabei so eingestellt werden, dass möglichst geringe Kräfte für die Bewegung der Kulissen notwendig sind.

Für eine ideale Anwendbarkeit müssen Kulissenwinkel und der Abstand des Fahrzeugschwerpunkts von den Kulissenführungen gut aufeinander abgestimmt sein. Das kann über folgendes ebene Problem erfolgen:

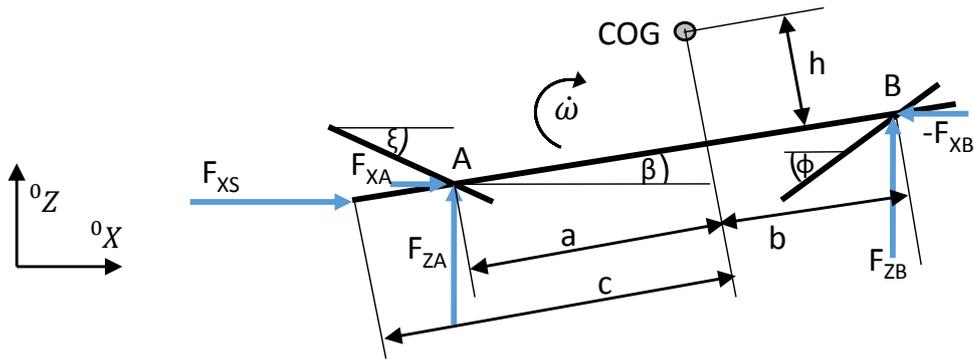


Abbildung 119 Kräfteschaubild des ebenen Problems für die Auslegung der Schlittenanlage

Im Kräfteschaubild (Abbildung 119) ist F_{XS} die Längskraft von der Hauptbremseinrichtung, F_A und F_B sind die Kräfte von den Kulissen auf den Schlittenaufbau. Die Abstände a , b , c und h sind im Fahrzeugsystem ausgerichtet. Der Winkel β ist der momentane Nickwinkel, ξ und ϕ sind die statischen Kulissenwinkel gegenüber der globalen 0X 0Y -Ebene.

Bei bekannter Masse und bekanntem Massenträgheitsmoment im Schwerpunkt des Aufbaus können folgende Gleichungen angesetzt werden:

$$I_{y(COG)} \cdot \dot{\omega} = -F_{XS} \cdot (h \cdot \cos \beta + c \cdot \sin \beta) - F_{XA} \cdot (h \cdot \cos \beta + a \cdot \sin \beta) - F_{XB} \cdot (h \cdot \cos \beta - b \cdot \sin \beta) + F_{ZA} \cdot (a \cdot \cos \beta - h \cdot \sin \beta) - F_{ZB} \cdot (b \cdot \cos \beta + h \cdot \sin \beta) \quad (7.1)$$

$$m_{Aufbau} \cdot (a_Z + g) = F_{AZ} + F_{BZ} \quad (7.2)$$

Werden reibungsfreie Kulissenführungen angenommen, gilt

$$\tan \xi = \frac{F_{XA}}{F_{ZA}} \quad (7.3)$$

$$\tan \phi = \frac{-F_{XB}}{F_{ZB}} \quad (7.4)$$

Aus diesen Gleichungen können die Kulissenkräfte in Abhängigkeit der Variablen (ξ , ϕ und h) berechnet werden.

Mit den Massen und Trägheitsmomenten für den Schlittenaufbau ergeben sich für einen USNCAP-Versuch mit hohen Anforderungen an die Anlage (55 g Maximalbeschleunigung in 0X , 5° maximaler Nickwinkel) folgende ideale Parameter (Tabelle 37). Diese führen auf geringst mögliche Kräfte, annähernd ohne Vorzeichenwechsel.

Tabelle 37 Ideale Parameter des VSI-Anlagenkonzepts

Anlagenparameter	Wert
Kulissenwinkel vorne (ξ)	-35°
Kulissenwinkel hinten (ϕ)	$+30^\circ$
Abstand COG zu AB (h)	350 mm

Die erforderlichen Bremskräfte der Kulissen errechnen sich aus der Verzögerung und der Kulissenmasse sowie den 0X -Anteilen der Kulissenführungskräfte. Mit einer abgeschätzten Kulissenmasse ergeben sich Maximalkräfte unter 250 kN pro Kulissenpaar bei einer maximalen Verzögerung von 400 m/s^2 .

Wie sich zeigt, ist es mit einer Anfahrgeschwindigkeit, die nur geringfügig höher als das erforderliche Δv ist möglich, die Kulissen während der Crashphase durch reine Bremskräfte so zu bewegen, dass sich die gewünschte Nickbewegung inklusive der Reboundphase einstellt (Abbildung 120, Abbildung 121). Das ist eine enorme Erleichterung, da Bremskräfte sehr viel einfacher darstellbar sind als Beschleunigungskräfte.

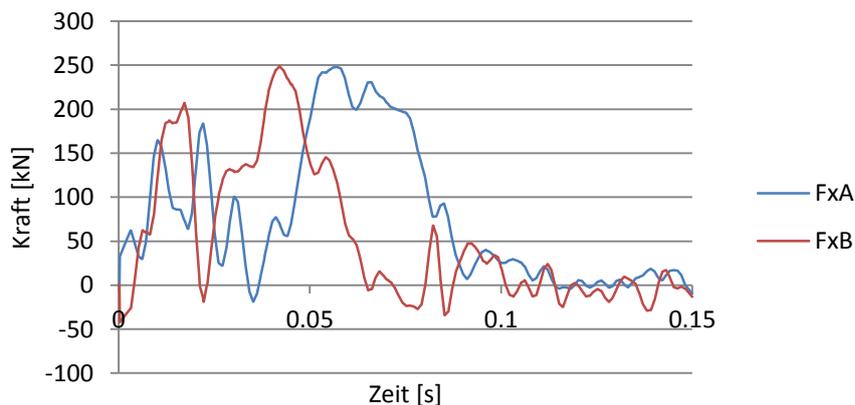


Abbildung 120 Erforderliche Verzögerungskräfte der beiden Kulissenpaare

Mit dieser Konfiguration ist es also möglich, beide Kraftkurven fast durchgehend im „Positiven“ zu halten, wodurch kein zusätzlicher Energieeintrag nötig ist.

Für den Auslegungsfall ergibt sich folgendes Geschwindigkeitsdiagramm:

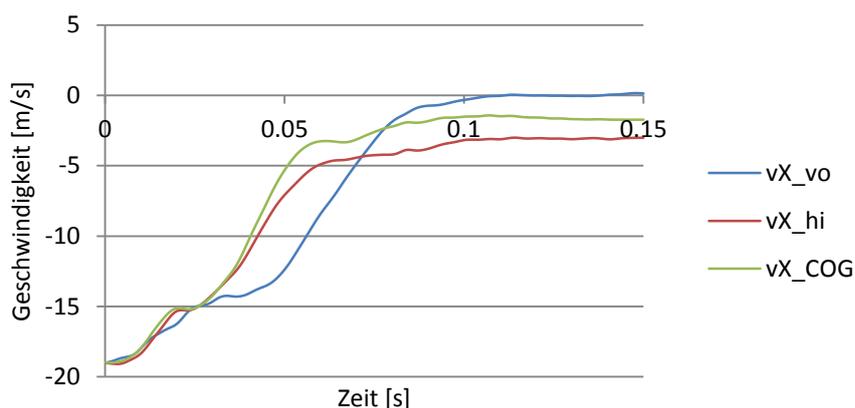


Abbildung 121 Geschwindigkeitsverläufe von Schlittenaufbau und Kulissen

Die Geschwindigkeitsverläufe sind monoton. Es ist aber eine Restgeschwindigkeit des Schlittenaufbaus zu Versuchsende vorhanden. Diese muss zum erforderlichen Δv bei der Anfahrgeschwindigkeit addiert und nach Versuchsende abgebaut werden.

Bei allen geprüften Fahrzeugbewegungen ist die Summe der 0X -Anteile der Kulissenführungskräfte geringer als die erforderliche Gesamtbremskraft.

7.4 Fazit

Die Realisierung mehrerer Freiheitsgrade auf einer Schlittenanlage, so dass diese einstellbar, reproduzierbar und kalibrierbar sind, ist herausfordernd. Bei einer Umsetzung von Pre-Crash-Phasen erhöht sich die Komplexität weiter. Das vorgestellte Anlagenkonzept berücksichtigt viele Problemstellungen und kommt für die Erzeugung der Bewegungskomponenten in der Pre-Crash-Phase sowie der Crash-Phase ohne zusätzlichen Energieeintrag aus. Als größte Schwachstelle werden aber die sich beeinflussenden Bewegungsmuster gesehen. Aufgrund steigender Anforderungen an Schlittenanlagen ist davon auszugehen, dass in naher Zukunft verschiedene Umsetzungen auf den Markt kommen werden.

7.4.1 Vor- und Nachteile des VSI-Anlagenkonzepts

- + Vorwärtsprinzip (bringt Vorteile für zukünftige Anforderungen der aktiven Fahrzeugsicherheit)
- + Nickbewegung einer Pre-Crash-Phase kann realisiert werden
- + Die Bewegung der einzelnen Teile kann vollständig durch die vorhandene kinetische Energie dargestellt werden (kein zusätzlicher Energieeintrag notwendig)
- + Moderate Kräfte und Beschleunigungen

- Die drei Bewegungsmuster sind nicht unabhängig (gegenseitige Beeinflussung bei Einschussprozedur)
- Nach Versuchsende hat der Schlittenaufbau eine Restgeschwindigkeit

8 Schlussfolgerung

Es wurde eine Methode erstellt, die mithilfe des Korrelationsanalyseprogramms CORA eine objektive Beurteilung einer Abbildung eines Gesamtfahrzeugversuchs durch einen Komponentenversuch zulässt. Die Einstellungen sind auf die vorliegenden zeitlichen Kurven zugeschnitten und nicht auf andere Problemstellungen übertragbar. Eine Beurteilung der Abbildung erfordert Erfahrung und eine Prüfung der Einzelverläufe. Als Beispiel führen inhomogene Abbildungen der Einzelkanäle zu guten Gesamtabbildungswerten, während die Abbildung einzelner Kanäle unzureichend ist. Diese objektive Beurteilung kann eine subjektive Beurteilung nicht ersetzen, sondern dient als probates Mittel zur Veranschaulichung und Dokumentation von Abbildungen.

Die verschiedenen Lastfälle von Frontalcrashtests weisen sehr spezifische Kinematiken auf. Es kann also selten ein Zusammenhang zwischen den Bewegungen verschiedener Lastfälle hergestellt werden (Ausnahme USNCAP und FMVSS 208 0°). Es zeigte sich, dass eine Nickbewegung bei allen Lastfällen relevant ist, während eine Gierbewegung nur bei asymmetrischen Fällen beachtet werden muss. Gierbewegungsanteile können bei den Lastfällen EuroNCAP und FMVSS 208 30° durch eine Schlittenvorverdrehung hinreichend abgebildet werden. Im Lastfall Small Overlap ist das nur mit Einschränkungen möglich.

Zur Berechnung der optimalen Vorverdrehungen aus Bewegungsdaten eines Gesamtfahrzeugversuchs wurde ein neues Berechnungsverfahren entwickelt. Dieses Verfahren vermeidet aufwändige Variationsrechnungen durch Finite-Elemente-Methoden vor einem Schlittentest. Es ist unterteilt in ein Verfahren zur größtmöglichen Gesamtabbildung für den EuroNCAP-Versuch und ein Verfahren, das Kopfpositionen zu kritischen Zeitpunkten optimiert, welches für FMVSS 208 30° und Small Overlap Versuche relevant ist. Weiters werden durch diese Berechnungsmethoden physikalische Gründe für die Möglichkeit, eine Gierbewegung durch Vorverdrehung abzubilden, anschaulich gemacht.

Es wurde festgestellt, dass die Kombination einer Anlage mit drei Freiheitsgraden, die eine Nickbewegung darstellen kann, mit einer Schlittenvorverdrehung um die 0Z -Achse fast alle relevanten Effekte der Frontalcrashtest-Lastfälle darstellen kann. Lediglich Effekte der Gierbewegung eines Small Overlap Versuchs können nur eingeschränkt abgebildet werden. Da aber die technische Beherrschbarkeit von mehr als drei Freiheitsgraden unklar ist, wird diese Konfiguration empfohlen.

Da reale Schlittenanlagen nicht jede hochdynamische Vorgabebewegung perfekt nachfahren können, wurden auch eingeschränkte Anlagenrandbedingungen in Betracht gezogen. Dabei zeigte sich, dass das Filtern von Beschleunigungsverläufen kaum Einfluss auf die Abbildung des Dummyverhaltens hat, sich so aber die Anforderungen an die Kräfte einer Anlage drastisch senken lassen. Kann einer Vorgabebeschleunigung dennoch nicht entsprochen werden, empfiehlt sich eine ausgleichende Bewegungsmodifikation der Vorgabe. So können bei moderaten Abweichungen die Abbildungen auf einem hohen Niveau gehalten werden. Eine Unterschreitung der geforderten Geschwindigkeiten ist aber als kritisch zu beurteilen. Hier wurden sehr schnell stark reduzierte Abbildungswerte beobachtet.

Nicht nur eine reduzierte Anlagendynamik, sondern auch die Unschärfe der Vorgabebewegungen im Entwicklungsprozess wurde berücksichtigt (Versuchsstreuung, etc.). Dabei stellte sich aber entgegen den Erwartungen heraus, dass das Potential nickfähiger Anlagen durch diese Berücksichtigung nicht vermindert wird.

Schließlich wurde ein Anlagenkonzept entwickelt, das viele der erarbeiteten Probleme der realen Umsetzung umgeht. Es bietet sich an, dieses in einer Machbarkeitsstudie weiter zu verfolgen.

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Vorwärtsprinzip und Rückwärtsprinzip bei Schlittenanlagen	8
Abbildung 2 Prinzip einer nickfähigen Anlage von DSD	10
Abbildung 3 Prinzip einer nickfähigen Anlage von IST	10
Abbildung 4 Prinzip einer nickfähigen Anlage von Seattle Safety.....	11
Abbildung 5 Struktur der verwendeten Finite Elemente - Fahrzeug-Dummy Modelle	19
Abbildung 6 Übliche Bezeichnungen der Rotationen bei Fahrzeugen sowie Achsensysteme	20
Abbildung 7 Definition der Nickbewegung in der 0X 0Z -Ebene	20
Abbildung 8 Definition der Gierbewegung in der 0X 0Y -Ebene	20
Abbildung 9 Definitionen von Koordinatensystemen und Punkten der Dummies.....	21
Abbildung 10 Beispielhafter Verlauf von Beschleunigung und Geschwindigkeit bei Wegvorgabe ohne Vorfilterung.....	23
Abbildung 11 Vergleich von Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverläufen bei Ortsvorgabe mit 1 kHz bzw. 10 kHz und Verwendung des Vorfilters	24
Abbildung 12 Beispiel gleichen Abstandes zwischen Kopfkontur und Lenkrad bei deutlich unterschiedlichen Kopftrajektorien	28
Abbildung 13 Beispiel für eine schlechte Bewertung einer Kurvenabbildung durch Phasenverschiebung (Bewertung=0,544) und Beschreibung des Korridorverfahrens.....	31
Abbildung 14 Beispiel für gute (0,866) und schlechte (0,566) Korrelationen von Dummysignalen unter Berücksichtigung von (4.20) – (4.25) und Wahl von Gewichten und Werten der Einzelverfahren.....	33
Abbildung 15 Betrachtete Frontal-Crashtest-Konfigurationen.....	36
Abbildung 16 Kräfte am Fahrzeug in der Nickebene, Simulation des veröffentlichten Toyota Yaris FE-Modells [26, 52].....	37
Abbildung 17 Deformationsverhalten der vorderen Längsträger beim Frontalcrash, Simulation des veröffentlichten Toyota Yaris FE-Modells [26, 52]	38
Abbildung 18 Fahrzeugbewegung VW Tiguan USNCAP Test der NHTSA [29]	38
Abbildung 19 Kraftsituation beim ODB Crash, Simulation mit dem veröffentlichten Toyota Yaris FE-Modell [26, 52]	39
Abbildung 20 Kraftsituation beim FMVSS 208 30° Crash, Simulation mit dem veröffentlichten Toyota Yaris FE-Modell [26]	39
Abbildung 21 Kraftsituation beim Small Overlap Crash, Simulation mit dem veröffentlichten Toyota Yaris FE-Modell [26]	40

Abbildung 22 Translatorische 0Z -Verschiebung des Fahrzeugsystems gegenüber dem globalen System für die Lastfälle USNCAP und FMVSS 208 0° bei unterschiedlichen Fahrzeugen, Datenbasis: NHTSA [29, 52]	41
Abbildung 23 Rotation um 0Y für die Lastfälle USNCAP und FMVSS 208 0° bei unterschiedlichen Fahrzeugen, Datenbasis: NHTSA [29, 52].....	41
Abbildung 24 Typische translatorische 0Y -Verschiebung des Fahrzeugsystems gegenüber dem globalen System für den Lastfall EuroNCAP bei unterschiedlichen Fahrzeugen	42
Abbildung 25 Typische Rotationen um 0Z für den Lastfall EuroNCAP bei unterschiedlichen Fahrzeugen.....	42
Abbildung 26 Allgemeine Kraftsituation am Dummy bei Frontalkollisionen.....	43
Abbildung 27 Krafrichtungen des Brustgurtes mit und ohne Gierbewegung	44
Abbildung 28 Vergleich der Verletzungswerte zwischen 6DOF und 1DOF für die Mittelklasse im Lastfall USNCAP H350	45
Abbildung 29 Vergleich der resultierenden Kopfbeschleunigungen zwischen 6DOF und 1DOF für die Mittelklasse im Lastfall USNCAP H350	46
Abbildung 30 Vergleich des Nackenmoments in Richtung y zwischen 6DOF und 1DOF für die Mittelklasse im Lastfall USNCAP H350.....	46
Abbildung 31 Vergleich der Brusteindrückung zwischen 6DOF und 1DOF für die Mittelklasse im Lastfall USNCAP H350	47
Abbildung 32 Vergleich der rechten Femurkräfte zwischen 6DOF und 1DOF für die Mittelklasse im Lastfall USNCAP H350.....	47
Abbildung 33 Vergleich der Kopftrajektorien (Kopfbeschleunigungssensorpunkt, FX FY Ebene) im Fahrzeugkoordinatensystem zwischen 6DOF und 1DOF für die Mittelklasse im Lastfall USNCAP H350	48
Abbildung 34 Vergleich der Kopf-Lenkrad Abstände zwischen 6DOF und 1DOF für die Mittelklasse im Lastfall USNCAP H350.....	48
Abbildung 35 Vergleich der Beckentrajektorien (Beckenbeschleunigungssensorpunkt, FX FZ -Ebene) im Fahrzeugkoordinatensystem zwischen 6DOF und 1DOF für die Mittelklasse im Lastfall USNCAP H350	49
Abbildung 36 Vergleich der Verletzungswerte zwischen 6DOF und 1DOF für die Mittelklasse im Lastfall USNCAP H305	50
Abbildung 37 Vergleich der Verletzungswerte zwischen 6DOF und 1DOF für die Mittelklasse im Lastfall FMVSS 208 0° und unterschiedliche Konfigurationen.....	51
Abbildung 38 Dummypositionen während Nick-Phasen bei FMVSS 208 0° verglichen mit der Fahrzeugbewegung in 0Z im H-Punkt.....	51
Abbildung 39 Vergleich der Verletzungswerte zwischen 6DOF und 1DOF für ein Fahrzeug der Mittelklasse im Lastfall EuroNCAP H350.....	53

Abbildung 40 Vergleich der Kopf- und Beckentrajektorien (${}^F X {}^F Y$ -Ebene) im Fahrzeugkoordinatensystem zwischen 6DOF und 1DOF für ein Fahrzeug der Mittelklasse im Lastfall EuroNCAP	54
Abbildung 41 Zusammenfassung von Abbildungswerten von 1DOF-Schlittenanlagen bei unterschiedlichen Fahrzeugen und Lastfällen (Mittelwerte beziehen sich auf die Lastfälle).....	55
Abbildung 42 Koordinatensysteme bei der Betrachtung einer Geschwindigkeitsüberlagerung für eine Realversuchsbewegung	57
Abbildung 43 Originale und modifizierte Trajektorien des Lenkradmittelpunktes im globalen Koordinatensystem für den Lastfall EuroNCAP (Fahrzeugabbildung nicht maßstabsgetreu)	57
Abbildung 44 Vergleich von originaler Lenkradmittelpunktstrajektorie mit der virtuellen Trajektorie in der ${}^0 X {}^0 Y$ -Ebene für den Lastfall EuroNCAP	58
Abbildung 45 Modifizierte virtuelle Trajektorie mit zugehöriger Regressionsgerade für den Lastfall EuroNCAP.....	59
Abbildung 46 Geschwindigkeiten zu t_0 bei einem Schlittenversuch mit Vorverdrehung	60
Abbildung 47 Modifizierte virtuelle Trajektorie, Regressionsgerade und Startwinkelgerade für den Lastfall EuroNCAP.....	61
Abbildung 48 Berechnete Vorverdrehungswinkel für einen relevanten Bereich der Dummymittelebene	62
Abbildung 49 Zeitlicher Verlauf der lokalen ${}^F Y$ -Koordinate des Kopfes bei verschiedenen Vorverdrehungswinkeln.....	62
Abbildung 50 Zeitlicher Verlauf der ${}^F Y$ -Koordinate des Beckens bei verschiedenen Vorverdrehungswinkeln.....	63
Abbildung 51 Vergleich der Dummypositionen verschiedener Simulationen für den Lastfall EuroNCAP: grün=6 Freiheitsgrade; rot=1 Freiheitsgrad ohne Vorverdrehung; blau=1 Freiheitsgrad mit Vorverdrehung.....	64
Abbildung 52 Kopfbeschleunigungen bei verschiedenen Vorverdrehungen bei einem Versuch im Lastfall FMVSS 208 30°	66
Abbildung 53 Dummypositionen bei transformiertem Gesamtfahrzeugversuch (im 1-System, grün) und vorverdrehtem Schlittenversuch (rot) im Lastfall FMVSS 208 30° bei berechneter Vorverdrehung (13°)	67
Abbildung 54 Modifizierte virtuelle Trajektorie, Regressionsgerade und Startwinkelgerade bei einem Versuch im Lastfall FMVSS 208 30° und berechneter Vorverdrehung	67
Abbildung 55 Dummypositionen bei transformiertem Gesamtfahrzeugversuch (im 1-System, grün) und vorverdrehtem Schlittenversuch (rot) im Lastfall FMVSS 208 30° bei optimaler Vorverdrehung (11°)	68
Abbildung 56 Modifizierte virtuelle Trajektorie, Regressionsgerade und Startwinkelgerade bei einem Versuch im Lastfall FMVSS 208 30° und optimaler Vorverdrehung.....	68

Abbildung 57 Modifizierte virtuelle Trajektorie, Regressionsgerade, Startwinkelgerade und Parallelverschiebung bei einem Versuch im Lastfall FMVSS 208 30° und optimaler Vorverdrehung.....	69
Abbildung 58 Modifizierte virtuelle Trajektorie, Schlittenwinkel, Startwinkelgerade und Parallelverschiebung bei einem Versuch im Lastfall FMVSS 208 30° bei verminderter Überlagerung	69
Abbildung 59 Modifizierte virtuelle Trajektorie, Regressionsgerade und Startwinkelgerade bei einem Versuch im Lastfall Small Overlap.....	70
Abbildung 60 Zusammenfassung von Abbildungswerten von 1DOF-Schlittenanlagen mit und ohne Vorverdrehung bei unterschiedlichen Fahrzeugen und Lastfällen.....	71
Abbildung 61 Koordinatensysteme bei der Betrachtung einer Geschwindigkeitsüberlagerung in 0Z -Richtung für eine Realversuchsbewegung.....	72
Abbildung 62 Originaltrajektorie, modifizierte Trajektorie und Regressionsgerade für einen insassennahen Fahrzeugpunkt in der 0X 0Z -Ebene im Lastfall USNCAP.....	73
Abbildung 63 Normierte Verletzungswerte bei Vorverdrehungen um die 0Y -Achse beim Lastfall USNCAP.....	73
Abbildung 64 Verlauf des Nackenmoments um y bei verschiedenen Vorverdrehungen um 0Y , sowie der Basis (6DOF) im Lastfall USNCAP.....	74
Abbildung 65 Vergleich der resultierenden Kopfbeschleunigungen zwischen 6DOF, 1DOF und 1DOF mit veränderten Airbagzündzeitpunkten für die Mittelklasse im Lastfall USNCAP.....	75
Abbildung 66 Vergleich der ${}^F X$ -Anteile der Kopftrajektorien im Fahrzeugkoordinatensystem zwischen 6DOF, 1DOF und 1DOF mit veränderten Zündzeitpunkten für die Mittelklasse im Lastfall USNCAP.....	75
Abbildung 67 Vergleich der Verletzungswerte zwischen 6DOF, 1DOF und 3DOF-Nicken für SUV im Lastfall USNCAP	77
Abbildung 68 Vergleich der Verletzungswerte zwischen 6DOF, 1DOF und 3DOF-Nicken für Kleinwagen im Lastfall EuroNCAP	78
Abbildung 69 Vergleich von resultierenden Kopfbeschleunigungsverläufen zwischen 6DOF, 1DOF und 3DOF-Nicken für Kleinwagen im Lastfall EuroNCAP	78
Abbildung 70 Vergleich von Brusteindrückungsverläufen zwischen 6DOF, 1DOF und 3DOF-Nicken für Kleinwagen im Lastfall EuroNCAP	79
Abbildung 71 Vergleich von Verläufen der Abstände zwischen Kopf und Lenkradebene bei 6DOF, 1DOF und 3DOF-Nicken für Kleinwagen im Lastfall EuroNCAP	79
Abbildung 72 Vergleich der Nackenscherkräfte bei den Konfigurationen 1DOF + Vorverdrehung, 3DOF Gieren und 6DOF für ein Fahrzeug der Mittelklasse im Lastfall Small Overlap.....	82
Abbildung 73 Vergleich der Verletzungswerte zwischen 6DOF, 1DOF+Vorverdrehung und 3DOF-Gieren für ein Fahrzeug der Mittelklasse im Lastfall Small Overlap.....	82

Abbildung 74 Kopftrajektorie in die ${}^F X {}^F Y$ -Ebene projiziert für die Mittelklasse im Lastfall Small Overlap und unterschiedliche Bewegungskonfigurationen	83
Abbildung 75 Vergleich der möglichen Ausrichtungen der Nickachse bei der Konfiguration Nicken + Vorverdrehung	84
Abbildung 76 Darstellung der mittleren Dummytrajektorie $S_M(t)$ im lokalen Koordinatensystem	86
Abbildung 77 Vereinfachte Darstellung der Berechnung einer Fahrzeugbeschleunigung entlang einer Dummytrajektorie	87
Abbildung 78 Vergleich der Verletzungswerte zwischen 6DOF, 1DOF, 3DOF-Nicken sowie 3DOF lokales Nicken + Vorverdrehung (6°) für Kleinwagen im Lastfall EuroNCAP.....	90
Abbildung 79 Vergleich von Beinpositionen mit 6DOF (grün) und 3DOF lokales Nicken + Vorverdrehung (rot) bei einem Fahrzeug der Mittelklasse im Lastfall EuroNCAP ($t=112,5$ ms)	90
Abbildung 80 Vergleich der Verletzungswerte zwischen 6DOF, 1DOF, 3DOF-Nicken, 3DOF-Nicken + Vorverdrehung (6°) und 3DOF-Nicken + Vorverdrehung + Pulsoptimierung für Kleinwagen im Lastfall EuroNCAP	91
Abbildung 81 Vergleich der Verletzungswerte zwischen 6DOF, 1DOF + Vorverdrehung (11°) und 3DOF-Nicken + Vorverdrehung (11°) für SUV im Lastfall FMVSS 208 30°	93
Abbildung 82 Vergleich der Dummypositionen im Lastfall FMVSS 208 30° für verschiedene Bewegungsmuster eines SUV.....	93
Abbildung 83 Vergleich der Kopfbeschleunigungsverläufe im Lastfall FMVSS 208 30° für verschiedene Bewegungsmuster eines SUV	94
Abbildung 84 Vergleich der Verletzungswerte zwischen 6DOF, 1DOF + Vorverdrehung (17°) und 3DOF-Nicken + Vorverdrehung (17°) für die Mittelklasse im Lastfall Small Overlap.....	95
Abbildung 85 Kopftrajektorie in die ${}^F X {}^F Y$ -Ebene projiziert für die Mittelklasse im Lastfall Small Overlap und unterschiedliche Bewegungskonfigurationen	95
Abbildung 86 Kopftrajektorie in ${}^F X {}^F Z$ -Ebene projiziert für die Mittelklasse im Lastfall Small Overlap und unterschiedliche Bewegungskonfigurationen.....	96
Abbildung 87 Vergleich von originalem Wankwinkel (6DOF) und Wankwinkel, der durch globales Nicken entsteht (3DOF) für den Lastfall EuroNCAP	97
Abbildung 88 Vergleich von originalem Wankwinkel (6DOF) und Wankwinkel, der durch globales Nicken entsteht (3DOF) für den Lastfall FMVSS 208 30°	97
Abbildung 89 Orientierung der Momentandrehachse gegenüber dem Fahrzeugkoordinatensystem bei einer 6DOF-Bewegung.....	98
Abbildung 90 Orientierung der Momentandrehachsenlage in der ${}^F X {}^F Y$ -Ebene für ein Fahrzeug der Mittelklasse im Lastfall EuroNCAP sowie Winkelgeschwindigkeit der Starrkörperbewegung	98

Abbildung 91 Orientierung der Momentandrehachsenlage in der ${}^F X {}^F Y$ -Ebene für ein Fahrzeug der Mittelklasse im Lastfall FMVSS 208 30° sowie Winkelgeschwindigkeit der Starrkörperbewegung.....	99
Abbildung 92 Ablaufdiagramm der durchgeführten Untersuchungen bei reduzierter Anlagendynamik	104
Abbildung 93 Beschleunigungsverlauf in ${}^0 Z$ -Richtung im Nullpunkt mit und ohne Filter im Lastfall USNCAP.....	106
Abbildung 94 Bewegungsverlauf in ${}^0 Z$ -Richtung im Nullpunkt mit und ohne Filter im Lastfall USNCAP	106
Abbildung 95 Schaubild der geometrischen Verhältnisse bei Reduktion der Anlagenmöglichkeiten	107
Abbildung 96 Sollkurven und modifizierte Kurven der ${}^0 Z$ -Beschleunigung im Nullpunkt sowie Sollkurve und modifizierte Kurven der ${}^0 Y$ -Winkelbeschleunigung nach den beiden Methoden für ein Fahrzeug im Lastfall USNCAP.....	107
Abbildung 97 CORA-Abbildungswerte der Dummybelastungen und Trajektorien für Simulationen mit unterschiedlich gefilterten Nickbewegungen gegenüber den Basissimulationen mit 6DOF bzw. 3DOF für ein Fahrzeug der Mittelklasse im USNCAP Versuch ...	109
Abbildung 98 CORA-Abbildungswerte der Dummybelastungen und Trajektorien für Simulationen mit reduzierten Beschleunigungen der Nickbewegung ($- {}^0 Z$) gegenüber den Basissimulationen mit 6DOF bzw. 3DOF für ein Fahrzeug der Mittelklasse im USNCAP Versuch ...	110
Abbildung 99 Vergleich der Verletzungswerte zwischen 6DOF, 1DOF, 3DOF-Nicken und Nickbewegungen mit eingeschränkten Beschleunigungen für die Mittelklasse im Lastfall USNCAP	111
Abbildung 100 CORA-Abbildungswerte der Dummybelastungen und Trajektorien für Simulationen mit reduzierten Beschleunigungen der Nickbewegung ($+ {}^0 Z$) gegenüber den Basissimulationen mit 6DOF bzw. 3DOF für ein Fahrzeug der Mittelklasse im USNCAP Versuch ...	112
Abbildung 101 Geschwindigkeitsverlauf in ${}^0 Z$ -Richtung im Koordinatenursprung für ein SUV im Lastfall USNCAP.....	112
Abbildung 102 CORA-Abbildungswerte der Dummybelastungen und Trajektorien für Simulationen mit reduzierten Geschwindigkeiten der Nickbewegung ($- {}^0 Z$) gegenüber den Basissimulationen mit 6DOF bzw. 3DOF für ein SUV im USNCAP Versuch	113
Abbildung 103 CORA-Abbildungswerte der Dummybelastungen und Trajektorien für Simulationen mit reduzierten Geschwindigkeiten der Nickbewegung ($+ {}^0 Z$) gegenüber Basissimulationen mit 6DOF bzw. 3DOF für ein Fahrzeug der Mittelklasse im Versuch FMVSS 208 0°	114
Abbildung 104 Winkelverläufe (${}^0 Z$) der originalen sowie modifizierten Bewegung bei Begrenzung negativer Winkelgeschwindigkeiten für ein Fahrzeug der Mittelklasse im Lastfall Small Overlap	115

Abbildung 105 dY-Verläufe der originalen sowie modifizierten Bewegung bei Begrenzung negativer Winkelgeschwindigkeiten für ein Fahrzeug der Mittelklasse im Lastfall Small Overlap.....	115
Abbildung 106 Winkelgeschwindigkeitsverläufe der originalen sowie modifizierten Bewegung bei Begrenzung positiver Winkelgeschwindigkeiten für ein Fahrzeug der Mittelklasse im Lastfall Small Overlap.....	116
Abbildung 107 CORA-Abbildungswerte der Dummybelastungen und Trajektorien für Simulationen mit reduzierten Winkelgeschwindigkeiten der Gierbewegung (+ 0Z) gegenüber der Basissimulation mit 6DOF für ein Fahrzeug der Mittelklasse im Versuch Small Overlap.....	116
Abbildung 108 Beispielhafter Beschleunigungsverlauf in 0Z -Richtung mit Beschränkung der Maximalbeschleunigung und Ausgleich des Fehlerintegrals	117
Abbildung 109 dZ-Verläufe der originalen Bewegung sowie bei reduzierter Beschleunigung mit und ohne Ausgleich.....	117
Abbildung 110 Beispielhafter Geschwindigkeitsverlauf in 0Z -Richtung mit Beschränkung der Maximalgeschwindigkeit und Ausgleich des Fehlerintegrals.....	118
Abbildung 111 dZ-Verläufe der originalen Bewegung sowie bei reduzierter Geschwindigkeit mit und ohne Ausgleich.....	118
Abbildung 112 Methodik der Untersuchung von Abbildungen innerhalb der Versuchsstreuungen beispielhaft für zwei Versuche.....	120
Abbildung 113 Grafische Interpretation der Fragestellungen der Analyse von Abbildungen hinsichtlich Versuchsstreuungen	121
Abbildung 114 Schaubild der Abbildungen mit unterschiedlichen Freiheitsgraden im Vergleich zum Streuband der Realversuche für den Lastfall USNCAP	121
Abbildung 115 Schaubild der Abbildungen mit unterschiedlichen Freiheitsgraden im Vergleich zum Streuband der Realversuche für den Lastfall EuroNCAP mit und ohne Vorverdrehung für ein Fahrzeug der Mittelklasse	122
Abbildung 116 Schaubild der Abbildungen mit unterschiedlichen Freiheitsgraden im Vergleich zum Streuband der Realversuche für den Lastfall EuroNCAP mit und ohne Vorverdrehung für einen Kleinwagen.....	122
Abbildung 117 Prinzipdarstellung des VSI-Schlittenanlagenkonzepts.....	126
Abbildung 118 Bewegungsablauf des VSI-Schlittenanlagenkonzepts und Geschwindigkeitsverhältnisse der Einzelkomponenten	127
Abbildung 119 Kräfteschaubild des ebenen Problems für die Auslegung der Schlittenanlage	128
Abbildung 120 Erforderliche Verzögerungskräfte der beiden Kulissenpaare.....	129
Abbildung 121 Geschwindigkeitsverläufe von Schlittenaufbau und Kulissen	129

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Beispiel einer Phasenunterteilung eines Frontalanpralls	6
Tabelle 2 Bezeichnungen von Bewegungskomponenten	21
Tabelle 3 Verläufe und Verletzungswerte für die subjektive Beurteilung von Insassenbelastungen	29
Tabelle 4 Verläufe für die subjektive Beurteilung der Insassenkinematik.....	29
Tabelle 5 Verläufe für die objektive Beurteilung von Insassenbelastungen und der Kinematik	33
Tabelle 6 Betrachtete Frontalcrash-Lastfälle	36
Tabelle 7 Einteilung der Frontalcrashlastfälle und Ausmaß der einzelnen Bewegungsanteile	42
Tabelle 8 Durch CORA berechnete Abbildungswerte für 1DOF bei der Mittelklasse im Lastfall USNCAP H350	49
Tabelle 9 Durch CORA berechnete Abbildungswerte für 1DOF bei der Mittelklasse im Lastfall USNCAP H305	50
Tabelle 10 Durch CORA berechnete Abbildungswerte für 1DOF bei der Mittelklasse im Lastfall FMVSS 208 0° und verschiedene Konfigurationen	52
Tabelle 11 Durch CORA berechnete Abbildungswerte für 1DOF bei der Mittelklasse im Lastfall EuroNCAP H350	53
Tabelle 12 Durch CORA berechnete Abbildungswerte für verschiedene Vorverdrehungen bei einem Versuch im Lastfall EuroNCAP	63
Tabelle 13 Durch CORA berechnete Abbildungswerte von Schlittenversuchen mit und ohne Vorverdrehung für verschiedene Fahrzeugklassen im Lastfall EuroNCAP.....	64
Tabelle 14 Durch CORA berechnete Abbildungswerte für verschiedene Vorverdrehungen bei einem Versuch im Lastfall FMVSS 208 30°	65
Tabelle 15 Durch CORA berechnete Abbildungswerte im Kopf-Nackebereich für verschiedene Vorverdrehungen bei einem Versuch im Lastfall FMVSS 208 30°	65
Tabelle 16 Durch CORA berechnete Abbildungswerte für verschiedene Vorverdrehungen bei einem Versuch im Lastfall Small Overlap	71
Tabelle 17 Durch CORA berechnete Abbildungswerte für verschiedene Airbagzündzeitpunkte bei 1DOF-Schlittenversuchen für ein Fahrzeug im Lastfall USNCAP	75
Tabelle 18 Durch CORA berechnete Abbildungswerte für 1DOF und 3DOF Nicken bei verschiedenen Fahrzeugklassen im Lastfall USNCAP	76
Tabelle 19 Durch CORA berechnete Abbildungswerte für 1DOF und 3DOF Nicken bei verschiedenen Fahrzeugklassen im Lastfall EuroNCAP	77

Tabelle 20 Zusammenfassung der niedrigsten Abbildungswerte für die Konfigurationen 1DOF, 1DOF + Vorverdrehung und 3DOF Nicken.....	80
Tabelle 21 Durch CORA berechnete Abbildungswerte für 1DOF, 1DOF + Vorverdrehung, und 3DOF Gieren bei verschiedenen Fahrzeugklassen im Lastfall EuroNCAP	81
Tabelle 22 Durch CORA berechnete Abbildungswerte für 1DOF + Vorverdrehung und 3DOF Gieren für die Mittelklasse im Lastfall FMVSS 208 30°	81
Tabelle 23 Durch CORA berechnete Abbildungswerte für 1DOF + Vorverdrehung und 3DOF Gieren für die Mittelklasse im Lastfall Small Overlap	81
Tabelle 24 Niedrigste Abbildungswerte für die Konfigurationen 1DOF, 1DOF + Vorverdrehung, 3DOF Nicken und 3DOF Gieren.....	83
Tabelle 25 Durch CORA berechnete Abbildungswerte für 1DOF, 3DOF Nicken und 3DOF lokales Nicken + Vorverdrehung bei verschiedenen Fahrzeugklassen im Lastfall EuroNCAP	89
Tabelle 26 Durch CORA berechnete Abbildungswerte für 1DOF, 3DOF Nicken, 3DOF Nicken + Vorverdrehung und 3DOF Nicken + Vorverdrehung + Pulsoptimierung in der Fahrzeugklasse Kleinwagen im Lastfall EuroNCAP	91
Tabelle 27 Durch CORA berechnete Abbildungswerte für 3DOF Nicken + Vorverdrehung + Pulsoptimierung für verschiedene Pulsberechnungsverfahren in der Fahrzeugklasse Kleinwagen im Lastfall EuroNCAP	92
Tabelle 28 Durch CORA berechnete Abbildungswerte für 1DOF + Vorverdrehung, 3DOF Gieren und 3DOF Nicken + Vorverdrehung bei verschiedenen Fahrzeugklassen im Lastfall FMVSS 208 30°	92
Tabelle 29 Durch CORA berechnete Abbildungswerte für 1DOF + Vorverdrehung, 3DOF Gieren und 3DOF Nicken + Vorverdrehung bei der Mittelklasse im Lastfall Small Overlap	94
Tabelle 30 Durch CORA berechnete Abbildungswerte für lokales und globales Nicken bei unterschiedlichen Fahrzeugklassen im Lastfall EuroNCAP.....	99
Tabelle 31 Durch CORA berechnete Abbildungswerte für lokales und globales Nicken bei unterschiedlichen Fahrzeugklassen im Lastfall FMVSS 208 30°	100
Tabelle 32 Zusammenfassung der niedrigsten Abbildungswerte für die Konfigurationen 1DOF, 1DOF + Vorverdrehung, 3DOF Nicken, 3DOF Nicken + Vorverdrehung und 3DOF Gieren.....	100
Tabelle 33 Untersuchungsmatrix zur Ermittlung der Auswirkungen von Dynamikreduktion auf das Dummyverhalten	108
Tabelle 34 Veränderung von Maximalgeschwindigkeit und maximalem dZ-Wert bei reduzierter Abwärtsbeschleunigung für ein Fahrzeug der Mittelklasse im Lastfall USNCAP ...	110
Tabelle 35 Durch CORA berechnete Abbildungswerte für reduzierte Beschleunigungen einer nickfähigen Anlage (3DOF) in positive und negative ⁰ Z-Richtung, mit und ohne Ausgleich im Vergleich mit der Originalbewegung mit 6DOF, sowie 3DOF für ein Fahrzeug im Lastfall USNCAP	117

Tabelle 36 Datenbasis für Untersuchungen der Abbildung im Hinblick auf
Versuchsstreuungen..... 120

Tabelle 37 Ideale Parameter des VSI-Anlagenkonzepts..... 128

11 Literaturverzeichnis

1. Euro NCAP; www.euroncap.com; Zugriff 2013
2. NHTSA - FARS; <http://www.nhtsa.gov/FARS>; Zugriff 2013
3. PAM-CRASH: ESI-Group, Paris; <http://www.esigmbh.de/>; Zugriff 2013
4. Bartsch H.-J.; Taschenbuch Mathematischer Formeln; 18. Edition; Verlag: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag; 1999
5. Bass C., Crandall J., Dekel E., Jordan A. und Pilkey W.; A system for simulating structural intrusion in automobile full-frontal and frontal-offset crashes in the laboratory sled test environment; Journal of Automobile Engineering, Volume: 211, Paper No:5 325-336, 1997
6. Bixel RA., Heydinger GJ. und Guenther DA.; Measured Vehicle Center-of-Gravity Locations - Including NHTSA's Data Through 2008 NCAP; SAE; Paper No:2010-01-0086; 2010
7. Blickwede J., Tausen M., Bultink R., Quedenbaum L. und Weikard F.; Dynamische Simulation eines Offset-Crashes auf einer Schlittenanlage; Konferenzbeitrag: 6.VDI Tagung Fahrzeugsicherheit; pp: 315-324; Berlin, 2007
8. Chang JM., Ali M., Craig M., Tyan T., El-bkaily M. und Cheng J.; Important Modeling Practices in CAE Simulation for Vehicle Pitch and Drop; SAE, Paper No:2006-01-0124; 2006
9. Cichos D., de Vogel D., Otto M., Schaar O., Zölsch S., Clausnitzer S. und Vetter D.; Crash Analyse Beschreibung der Kriterien; Version 2.1.1; http://crash-network.com/CrashAnalyseKriterien_2.1.1.pdf; 2008; Zugriff 2013
10. ESI Group; Virtual Performance Solution 2012 Solver Reference Manual; 2012
11. European Road Safety Observatory; Annual Statistical Report 2011; Report no: D 3.5, 31-3-2011; 2011; http://ec.europa.eu/transport/road_safety/pdf/statistics/dacota/dacota-3.5-asr-2011.pdf; Zugriff 2013
12. First Technology Safety Systems Inc.; FTSS Pamcrash Model of the Hybrid III 50th Percentile Male Dummy User Manual; 2008
13. Garrot WR.; Measured Vehicle Inertia Parameters - NHTSA's Data Through September 1992; SAE, Paper No: 930897; 1993
14. Gehre C., Gades H. und Wernicke P.; Objective Rating of Signals using Tests and Simulation Responses; Konferenzbeitrag: 21th ESV-Conference; Paper No: 09-0229; 2009
15. Instron Structural Testing Systems; Capable crash sled systems; Crash Test Technology International; September 2011; pp: 52-53; 2011
16. Instron Structural Testing Systems; Crash Simulationsanlage HyperG plus; 2013; http://www.ist-testing-systems.com/attachments/article/150/HyperG_pBRD_Einzel.pdf; Zugriff 2013
17. Insurance Institute for Highway Safety; Small Overlap Frontal Crashworthiness Evaluation Crash Test Protocol (Version II); 2012; http://www.iihs.org/media/ec54a7ea-1a1d-4fb2-8fc3-b2e018db2082/-1745465934/Ratings/Protocols/current/small_overlap_test_protocol.pdf; Zugriff 2013

18. International Organization for Standardization; Technical Report 9790, Road Vehicles; Anthropomorphic side impact dummy - lateral impact response requirements to assess the biofidelity of the dummy; 1999
19. Jordan A.; Test Sled Simulation of Crash Induced Yaw and Pitch; SAE, Paper No:740587; 1974
20. Kramer F.; Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen; 2. überarbeitete und erweiterte Auflage; Verlag: Vieweg & Sohn Verlag - GWV Fachverlage GmbH; 2006
21. Kramer F.; Integrale Sicherheit von Kraftfahrzeugen; 4. überarbeitete und erweiterte Auflage; Verlag: Springer Vieweg; 2013
22. Messring; Bending Bar Brake; <http://www.messring.de/test-facilities-and-components/decelerator-systems/brake-systems/bending-bar-brake/>; Zugriff 2013
23. Messring; Programmable Decelerator for Sled Test; 2013; http://www.messring.de/wp-content/uploads/2MC_VD_E.pdf; Zugriff 2013
24. Moser A., Hofinger M. und Steffan H.; Verfahren und Vorrichtung zur Durchführung von Crash-Schlitten-Versuchen; Patent No.:DE 10 2007 042 775 A1; 12-3-2009; 2009
25. Nasdala L.; FEM-Formelsammlung Statik und Dynamik; Verlag: Vieweg + Teubner; 2010
26. NCAC-National Crash Analysis Center; Toyota Yaris FE-model for LS-DYNA solver; <http://www.ncac.gwu.edu/>; Zugriff 2010
27. NHTSA; Consumer Information - New Car assessment Program; 2008
28. NHTSA; Fatalities in Frontal Crashes Despite Seat Belts and Air Bags; 2009
29. NHTSA; NHTSA Test Database; www-nrd.nhtsa.dot.gov; Zugriff 2012
30. Nusholtz G., Hsu T. und Byers L.; A proposed Side Impact ATD Bio-Fidelity Evaluation Scheme using Cross-Correlation Approach; Konferenzbeitrag: 21th ESV-Conference; Paper No: 07-0399; 2013
31. Peden Margie, Scurfield Richard, Sleet David, Mohan Dinesh, Hyder Adnan A., Jarawan Eva und Mathers Colin; World Report on Road Traffic Injury Prevention; 2004; <http://whqlibdoc.who.int/publications/2004/9241562609.pdf>; Zugriff 2013
32. Quedenbaum L., Tosen M. und Weikard F.; Crashsimulationsanlage für Kraftfahrzeuge; Patent No.:DE 10 2004 027 221 A1; 15-12-2005; 2005
33. Raguse K.; Dreidimensionale photogrammetrische Auswertung asynchron aufgenommener Bildsequenzen mittels Punktverfolgungsverfahren; Dissertation 2007
34. Raguse K. und Heipke C.; Synchronization of Image Sequences - A Photogrammetric Method; Photogrammetric Engineering & Remote Sensing; Volume: 75; 2009, pp: 535-546
35. Rammerstorfer F.; Grundlagen der Finite Elemente Methoden; Skriptum zur Vorlesung; 2007
36. Research Council for Automobile Repairs; RCAR Bumper Test; 2010; <http://www.rcar.org/Papers/Procedures/BumperTestProcedure.pdf>; Zugriff 2013
37. Rhule H., Donnelly B., Moorhouse K. und Kang Y.; A Methodology for Generating objective Targets for quantitatively Assessing the Biofidelity of Crash Test Dummies; Konferenzbeitrag: 23rd ESV-Conference; Paper No: 13-0138; 2013
38. SAE International; SAE J211 - Surface Vehicle recommended Practice - Instrumentation for Impact Test; 1995

39. Schiehlen W. und Eberhard P.; Technische Dynamik; 3. Auflage; Verlag: Vieweg und Teubner; 2012
40. Gonter M., Seiffert U. Schwarz T. und Zobel R.; Fahrzeugsicherheit; in Braess HH. und Seiffert U.; Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik; Verlag: Springer Vieweg ; 2013
41. Sherwood C., Nolan J. und Zuby D.; Characteristics of Small Overlap Crashes; Konferenzbeitrag: 21th ESV-Conference; Paper No: 09-0423; 2009
42. Smyth BJ. und Smith JW.; Developing a Sled Test from Crash Test Data; SAE 2007 World Congress; Paper No:2007-01-0711; 2007
43. Statistics Austria; National accident statistics; www.statistik-austria.at; Zugriff 2013
44. Thelen M., Raffauf R., Buss W., Roth W. und Hillenbrand K.; Simulation of Foot Well Intrusion for Sled Testing; Konferenzbeitrag: ESV - Enhanced Safety of Vehicles Conference; Paper No: 98-S1-O-10; 1998
45. Thunert C.; CORA Release 3.6 User's Manual; 2012
46. U.S.Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration; Laboratory Test Procedure for FMVSS 208, Occupant Crash Protection, FMVSS 212, Windshield Mounting, FMVSS 219, Windshield Zone Intrusion, FMVSS 301F, Fuel System Integrity - Frontal; 2008
47. United Nations; ECE-R94; 2007
48. Waldron K., Schmiedeler J.; Kinematics; in: Siciliano B., Khatib O. (eds.); Springer Handbook of Robotics; Berlin, Heidelberg: Springer Verlag; 2008
49. Weikard F.; Crashsimulationsanlage für Fahrzeuge; Patent No.:EP 1 657 538 B1; 17-5-2006; 2006
50. Wisch M., Fagerlind H., Sulzberger L., McCarthy M., Roynard M., Hulshof W., Boissou J., Schaub S., Heinig I. und Viström M.; Assessment of Integrated Vehicle Safety Systems for improved Vehicle Safety; Report no: D1.2, 21-12-2010; 2010
51. Wittmann T., Coughren B., Christiansen P. und Lilley R.; Crash test method and apparatus including pitch simulation; Patent No.:20130061653; 14-3-2013; 2013
52. Woitsch G., Sinz W.; Influence of pitching and yawing during frontal passenger vehicle crash tests on driver occupant's kinematics and injury; International Journal of Crashworthiness; Volume: 18, Number 4; 2013; pp: 356-370
53. Woitsch G., Sinz W.; Influences of pre-crash braking induced dummy – Forward displacements on dummy behavior during EuroNCAP frontal crashtest; Accident Analysis and Prevention; 2014
54. Wörnle C.; Grundlagen der Kinematik; in: Wörnle C. (ed.); Mehrkörpersysteme; Rostock: Springer; 2011
55. Zeller P.; Schwingungstechnik; in: Zeller P. (ed.); Handbuch Fahrzeugakustik; Wiesbaden: Vieweg+Teubner; 2009
56. Zuber G.; Prüfeinrichtung zur Kraftfahrzeug-Crashsimulation; Patent No.:DE 10 2005 010 189 B3; 2005