



Verbesserte Testanforderungen an
Protektoren für Gleitschirmgurtzeuge unter
Berücksichtigung von technischer
Umsetzbarkeit, Verletzungen und
Verletzungsmechanismen

MASTERARBEIT

von

Martin Griesmayr

in Zusammenarbeit mit dem deutschen
Hängegleiterverband e.V.



Technische Universität Graz

Vehicle Safety Institute

[FSI Frank Stronach Institute]

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

Graz, 2013

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Martin Griesmayr
Flurgasse 6/2
8010 Graz

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.

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.

Graz, den 24. Oktober 2013

Martin Griesmayr

Inhaltsverzeichnis

Vorwort und Danksagung	iv
Kurzfassung	v
Abstract	vii
1 Einleitung	1
1.1 Gurtzeuge	2
1.2 Protektoren	2
1.3 Musterprüfung	3
2 Methodik	5
3 Lastfallermittlung	7
3.1 Unfallbefragungen	7
3.2 Unfallvideos	9
3.3 Repräsentative Lastfälle	12
4 Unfallbewertung	15
4.1 Auswirkungen verschiedener Beschleunigungsverläufe auf den Dynamic Response	21
5 Simulationsmodell	23
5.1 Auswahl Gurtzeug	23
5.2 Ermittlung der Materialkennwerte	24
5.2.1 Ergebnisse	25
5.2.2 Diskussion	25
5.3 Modellierung des Protektortests	25
5.4 Validierung des Simulationsmodells anhand des Protektortests	28
5.4.1 Ergebnisse	28
5.4.2 Diskussion	29
5.5 Simulationsmodell mit Dummy	30
5.6 Nachstellen von Dummyversuchen in der Simulation	30
5.6.1 Ergebnisse der verschiedenen Dummyversuche	31

5.6.2	Diskussion der verschiedenen Dummyversuche	33
5.7	Vergleich freie/geführte Bewegung mittels Simulation	36
5.7.1	Ergebnisse	37
5.7.2	Diskussion	38
6	Unfallsimulationen	39
6.1	Simulationskonfigurationen	39
6.1.1	Vorschlag Seitenprotektor	40
6.1.2	Alternatives Material für Rückenprotektor	42
6.2	Senkrechter Aufprall in der Lage wie beim Protektortest . . .	42
6.2.1	Geschwindigkeitsvariation	42
6.2.2	Geschwindigkeitsvariation mit alternativem Protektor- material	43
6.2.3	Diskussion der Ergebnisse	44
6.3	Seitenaufprall	45
6.3.1	Geschwindigkeitsvariation mit unmodifiziertem Seiten- protektor	45
6.3.2	Geschwindigkeitsvariation mit Seitenprotektorentwurf	45
6.3.3	Variation der Seitenprotektordicke	46
6.3.4	Seitenaufprall ohne Seitenprotektor	48
6.3.5	Diskussion der Ergebnisse	49
6.4	Nach vorne geneigter Aufprall	50
6.4.1	Ohne horizontale Geschwindigkeit	50
6.4.2	Mit horizontaler Geschwindigkeit	51
6.4.3	Diskussion der Ergebnisse	52
7	Vorschläge für Änderungen des Protektortests	54
7.1	Masse des Prüfkörpers und Aufprallgeschwindigkeit	54
7.2	Führung des Prüfkörpers	55
7.3	Lage beim Aufprall	55
7.4	Grenzwerte bei der Musterprüfung	57
8	Fazit	59
9	Ausblick	61
A	Materialtests	62
A.1	Seitenschaum $h_0 = 459mm$	62
A.2	Seitenschaum $h_0 = 1274mm$	64
A.3	Rückenschaum $h_0 = 459mm$	65
A.4	Rückenschaum $h_0 = 815mm$	66
A.5	Rückenschaum $h_0 = 1274mm$	67
A.6	Rückenschaum $h_0 = 1800mm$	68
B	Vergleich freie und geführte Bewegung	69

Inhaltsverzeichnis	iii
B.1 Protektortestkonfiguration, 28° nach hinten geneigt	69
B.2 Konfiguration 45° nach hinten geneigt	70
B.3 Konfiguration 30° seitlich geneigt	71
B.4 Konfiguration 10° nach vorne geneigt	72
B.5 Konfiguration 90° nach hinten geneigt	73
Quellenverzeichnis	74
Literatur	74
Online-Quellen	75

Vorwort und Danksagung

Die Idee für die vorliegende Arbeit entstand auf Anregung meines Freundes Sebastian. Als wir nach einigen Gesprächen und ersten Recherchen im Internet zum Thema Wirbelsäulenverletzungen im Gleitschirmsport den Sicherheitsreferenten des deutschen Hängegleiterverbands, Herrn Karl Slezak, kontaktierten, wurde Interesse an vertieften Untersuchungen bezüglich dieser Problematik bekundet. Nach einer Vorstellung des Projektes am Institut für Fahrzeugsicherheit an der technischen Universität Graz unter der Leitung von Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hermann Steffan, wurde dort die Betreuung im Rahmen einer Diplomarbeit zugesichert. Ich möchte mich beim gesamten Team des Instituts für die herzliche Aufnahme und gute Zusammenarbeit bedanken. Insbesondere gilt mein Dank meinem Betreuer Dipl.-Ing. Dr.techn. Florian Feist sowie Dipl.-Ing. Dr.techn. Wolfgang Sinz und Dipl.-Ing. Christoph Breitfuß, welche mir bei Problemen und Fragen stets zur Seite standen. Auch beim DHV möchte ich mich für die Unterstützung und die Zurverfügungstellung von Unterlagen bedanken. Schließlich möchte ich mich an dieser Stelle auch noch bei meiner Familie und meinen Freunden für die Unterstützung während meines gesamten Studiums bedanken!

Kurzfassung

Im Jahr 2012 wurden dem deutschen Hängegleiterverband (DHV) 241 Gleitschirmunfälle gemeldet. Dabei wurden 132 Personen schwer und zwölf tödlich verletzt. Etwa 60% der schweren Verletzungen betrafen die Wirbelsäule. In Deutschland, Österreich und der Schweiz müssen Gurtzeuge mit einem Rückenprotektor und einem Rettungsfallschirm ausgerüstet sein. Zur Zulassung am Markt muss die Schutzwirkung des Protektors anhand einer Aufprall-Prüfung nachgewiesen werden. Beim aktuellen Test wird das Gurtzeug auf einen geführten Fallkörper mit einer Masse von 50 *kg* aufgespannt. Die Aufprallgeschwindigkeit bei der Prüfung beträgt 4.81 *m/s*. Mit dem Test wird ein Aufschlag auf den Boden nachgestellt. Als in Deutschland im Jahr 2000 die Protektorpflicht eingeführt wurde, waren kaum Informationen bezüglich der Aufprallgeschwindigkeiten und -winkel bei Real-Unfällen vorhanden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde untersucht, wie die Aufprall-Prüfung verbessert werden kann, um die auftretenden Aufprallarten besser abzudecken. 61 Piloten, welche bei einem Gleitschirmunfall Wirbelsäulenverletzungen erlitten, wurden befragt und daraus relevante Lastfälle abgeleitet. Reale Aufprallgeschwindigkeiten und -winkel (=Aufprallarten) wurden mit Hilfe frei zugänglicher Videos von Gleitschirmunfällen bestimmt. Basierend auf den gewonnenen Informationen wurde eine erweiterte Aufprall-Prüfung vorgeschlagen. Außerdem wurde eine Untersuchung bezüglich geeigneter Verletzungskriterien durchgeführt.

Ein Finite Elemente (FE) Modell eines gängigen Gurtzeugs wurde erstellt. Dieses wurde mittels Materialversuchen sowie als Gesamtmodell validiert. Das Gurtzeug wurde dabei auf den geführten Fallkörper oder auf einem Hybrid III Dummy aufgespannt. Das Abschneiden des unmodifizierten Modells bei der erweiterten Aufprall-Prüfung wurde untersucht. Für die Bewertung wurden das Dynamic Response-Modell (DR) und die Maximal-Beschleunigung herangezogen. Das FE-Modell wurde außerdem für eine Sensitivitätsanalyse bezüglich Materialeigenschaften und Protektorform verwendet. Weiters wurde damit die Eignung freier und geführter Fallkörper untersucht.

Die Untersuchungen zeigen, dass von der derzeitigen Aufprall-Prüfung etwa 50% der Aufprallarten abgedeckt werden. Hinsichtlich Aufprallgeschwindig-

keit werden jedoch weniger als 25% der Real-Unfälle abgedeckt (4.81 m/s gegenüber eines 0.25-Perzentils von 7.5 m/s). Eine verbesserte Aufprall-Prüfung mit einer vertikalen Aufprallgeschwindigkeit von 8 m/s und einer Fallkörpermasse von 80 kg wird empfohlen. Die erweiterte Aufprall-Prüfung umfasst seitliche Aufschläge genauso wie Aufschläge im vorderen, hinteren und unteren Teil des Protektors. Sie deckt 80% der Aufprallarten, 50% der Aufprallgeschwindigkeiten und rund 50% bezüglich des Gewichts der Insassen ab.

Zur Abschätzung des Verletzungsrisikos wurde der DR vorgeschlagen, welcher die Einwirkrichtung der Belastung berücksichtigt. Die Untersuchung zeigte aber auch, dass das DR-Modell das Verletzungsrisiko für sehr kurze Belastungen unterbewertet. Aus Gründen der Wiederholbarkeit wird empfohlen, die geführte Bewegung beizubehalten. Die Untersuchung mit dem numerischen Modell zeigte, dass gängige Protektoren den erweiterten Aufprallversuch wahrscheinlich nicht bestehen können. Allerdings wird in der FE-Studie aufgezeigt, dass sowohl bei den verwendeten Materialien als auch bei der Form der Protektoren Verbesserungspotential vorhanden ist.

Abstract

In 2012 241 paragliding-accidents have been reported to the German Hang-glider Association (DHV). 132 persons sustained serious and 12 fatal injuries. Approximately 60% of serious injuries were to the spine. In Germany, Austria and Switzerland paragliding harnesses are required to be equipped with back protectors and an emergency parachute. The market-approval of back protectors encompasses an impact test. In the current impact test, the protector is fitted to a guided 50 *kg* fall-device. The impact velocity amounts for 4.81 *m/s*. The test resembles an impact to the bottom. When the impact test was introduced in 2000 in Germany, information concerning relevant accident situations was scarce.

The objective of this thesis is to investigate how the impact test can be improved in order to cover the majority of accident situations.

Relevant load cases were derived from a survey among 61 pilots which have sustained a spinal injury in a paragliding accident. Publicly accessible paragliding accident videos were analysed in terms of impact velocities and angles. Based on the gathered information an enhanced test procedure was proposed. A review of appropriate injury criteria was conducted.

A Finite Element model (FE) of a popular harness was created and validated by means of material and full-component tests using the guided-fall impactor and a Hybrid III dummy. The baseline model's performance was evaluated according to the enhanced impact test procedure. The performance was rated using the Dynamic Response-model (DR) and the maximum acceleration. Further, the FE model was used for a sensitivity study concerning material properties and protector shape. The FE model was also used to compare free-fall and guided-fall impactors.

The study shows that the current impact test covers approximately 50% of impact scenarios. However, in terms of impact velocity far less than 25% of impacts are covered by the current test procedure (4.81 *m/s* versus a 25th percentile of 7.5 *m/s*). An enhanced test procedure with a vertical impact velocity of 8 *m/s* and an impactor mass of 80 *kg* is suggested, considering impacts to the side, to the front, to the rear and to the bottom of the protector. The enhanced test procedure covers 80% of impact scenarios, 50% of impact velocities and about 50% of occupants in terms of weight.

For the evaluation of injury risk the DR was suggested, as it is sensitive

to the load direction. The study suggests, though, that the DR is likely to underestimate the injury risk associated to very rapid loadings. It is recommended that a guided motion is retained for the sake of repeatability. It is shown that current protectors will likely fail in the enhanced test procedure. However, the FE study shows that room for improvement still exists with regards to the shape of protectors and materials used.

Kapitel 1

Einleitung

In Österreich, Deutschland und der Schweiz sind zur Zeit circa 55000 Hängegleiterpiloten aktiv, wobei etwa zwei Drittel davon Gleitschirmpiloten und der Rest Drachenflieger sind. Die Piloten im deutschsprachigen Raum machen über die Hälfte der weltweit aktiven Piloten aus. [24]

Leider passieren bei den Flügen immer wieder Unfälle mit mehr oder weniger schwerwiegenden Auswirkungen auf die Beteiligten. In Österreich, Deutschland und der Schweiz besteht eine Meldepflicht für jeden Unfall bei der zuständigen Stelle mittels einem entsprechendem Formular. Dazu wird in allen drei Ländern das gleiche Unfallformular verwendet. Die zuständige Stelle in Deutschland ist der deutsche Hängegleiterverband (DHV). Es wurde eine Zusammenarbeit mit dem DHV angestrebt, da dieser laut eigenen Angaben der weltweite größte Zusammenschluss von Gleitschirm- und Drachenfliegern ist [23]. Dabei wurde im Jahr 2002 die Marke von 30000 Mitgliedern überschritten, bis ins Jahr 2009 erfolgte ein stetiger leichter Anstieg auf rund 32000 Mitglieder.

Vom DHV wird jedes Jahr eine Unfallstatistik (zu finden unter www.dhv.de) veröffentlicht. So ist in der Statistik für 2012 [21] ersichtlich, dass in den letzten 15 Jahren ein Anstieg bei der Anzahl von Unfällen verzeichnet wurde. Im Jahr 2012 wurden zum Beispiel 241 Unfälle gemeldet, dabei wurden 132 Personen schwer verletzt und zwölf Unfälle waren tödlich. Eine schwere Verletzung liegt nach dem Formular für die Schadensmeldung beim DHV vor bei einem Krankenhausaufenthalt von mehr als 48 Stunden bzw. wenn Brüche (außer Finger, Nase, Zehen), schwere Blutungen, Nervenverletzungen, Muskel- und Bänderrisse, innere Verletzungen oder Verbrennungen zweiten oder dritten Grades auftreten. Laut einer Schätzung des Sicherheitsreferenten des DHV ist bei etwa 60% der Verletzten die Wirbelsäule betroffen. Nach Analyse verschiedener Arbeiten zu Gleitschirmunfällen wird von Bohnsack und Schröter [1] darauf hingewiesen, dass die meisten schweren Verletzungen die Wirbelsäule betreffen.

Zusätzlich zu den gemeldeten Unfällen könnte noch eine gewisse Dunkelziffer

an nicht gemeldeten vorhanden sein. Wie sich dabei die Meldemoral über der Zeit verändert hat, ist schwer abschätzbar.

In Deutschland ist seit 2000 die Verwendung von Rückenprotektoren für Gleitschirmpiloten vorgeschrieben. Diese zielen darauf ab, schwere Verletzungen der Wirbelsäule soweit wie möglich zu vermeiden. Vor allem das Gesäß und die untere Wirbelsäule sollen beim Aufprall geschützt werden.

Damit ein Gurtzeug am deutschen Markt zugelassen wird, muss dieses zuerst eine von einer zertifizierten Stelle durchgeführte Aufprall-Prüfung bestehen. Der nach einem Unfall verpflichtend auszufüllende Bericht enthält relativ wenige Details über die genaue Aufprallkonfiguration. Über einen Zeitraum von zweieinhalb Jahren sendete der DHV Piloten, welche Unfälle meldeten bei denen Verletzungen der Wirbelsäule aufgetreten sind, einen zusätzlichen Fragebogen zu. Dieser fragte detailliertere Informationen zum Unfallgeschehen ab. Durch diese Fragebögen erhoffte man sich zusätzliche Informationen, um diese Unfälle besser zu verstehen und in Zukunft vielleicht vermeiden oder zumindest die Folgen mindern zu können. Vom DHV wurden die anonymisierten Fragebögen zur Verfügung gestellt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird untersucht, wie sich die Aufprall-Prüfung verbessern lässt, um Realunfälle noch besser als bisher abzudecken. Außerdem soll geklärt werden, inwieweit bei den Protektoren noch Verbesserungspotential vorhanden ist.

1.1 Gurtzeuge

Durch das Gurtzeug soll dem Piloten ein gutes Sicherheits- und Fluggefühl vermittelt werden. Es besteht aus einem Sitzbrett und einem Rückenteil, welche mit dem Aufhängepunkt verbunden sind. Es ist wichtig, dass die richtige Größe gewählt und das Gurtzeug genau auf den Piloten eingestellt wird. In der regulären Sitzposition sitzt der Pilot bequem und leicht nach hinten abgekippt. Bei der Landung verlagert der Pilot das Gewicht auf den vorderen Bereich des Sitzbrettes und sitzt aufrecht. [8]

Als beispielhaftes Gurtzeug ist in Abbildung 1.1 links das Modell Cult XC der Firma Skywalk zu sehen. Neben den am häufigsten verwendeten Sitzgurtzeugen gibt es zum Beispiel noch Liegegurtzeuge für Langstreckenflüge oder Leichtgurtzeuge, bei welchen besonderes Augenmaß auf geringes Packmaß und Gewicht gelegt wird.

1.2 Protektoren

Für Notfälle in geringer Flughöhe wird das Gurtzeug mit einem Protektor versehen. Die Protektoren sind in der Regel unter dem Sitz im Becken- und unteren Wirbelsäulenbereich angebracht. Die gängigsten Modelle sind aus Schaumstoff, wobei hier verschiedenste Stärken angeboten werden, sowie



Abbildung 1.1: Gurtzeug Skywalk Cult XC [18] und Protektorprüfanlage des DHV [20]

sogenannte Staudruckairbags. Diese werden während des Flugs mit Luft gefüllt und beim Aufprall wird die Luft beim Ausströmen gedrosselt, was zu einer Dämpfung führt. Es gibt auch Kombinationen aus beiden Systemen. Neben der Schutzwirkung wird zum Beispiel auch noch auf ein geringes Packmaß und Gewicht des Protectors Wert gelegt.

Außerdem werden noch zusätzliche Seitenprotektoren für manche Gurtzeuge angeboten. Diese fallen wesentlich kleiner und dünner als die Rückenprotektoren aus. In Abbildung 3.3 sind die im FE-Modell nachgebildeten Protectors des für die Simulation ausgewählten Gurtzeugs ersichtlich.

1.3 Musterprüfung nach den Lufttüchtigkeitsforderungen NfL II - 91/09 für Hängegleiter und Gleitsegel in Deutschland

In Deutschland ist die Verwendung von Gurtzeugprotektoren verpflichtend vorgeschrieben, auch die vor der Zulassung am Markt zu absolvierende Musterprüfung ist geregelt [3]. In der aktuellen Konfiguration ist der Test seit 2009 gültig. Die Überprüfung der Protectorschutzwirkung kann bei verschiedenen zugelassenen Stellen durchgeführt werden. Dabei wird auf einer eigens

dafür gebauten Apparatur das zu prüfende Gurtzeug auf einen Fallkörper mit einer Masse von 50 kg aufgespannt und aus einer Höhe von mind. 1.65 m vom Boden bis zur Unterkante des Fallkörpers fallen gelassen. Die Bewegung erfolgt geführt in senkrechter Richtung. Der Winkel des Rückenteils zur Senkrechten beträgt 28° . Es wird die Beschleunigung in senkrechter Richtung beim Aufprall auf den waagrechten Boden gemessen und anschließend ausgewertet. Vor der Auswertung werden die aufgenommenen Messdaten noch gefiltert. Um welchen Filter es sich genau handelt, ist leider nicht bekannt. Die auftretende Beschleunigung darf maximal 50 g betragen. Eine Beschleunigung von 38 g darf für bis zu 7 ms und eine Beschleunigung von 20 g für bis zu 25 ms überschritten werden. Der Test muss zweimal in gleicher Form, je nach Art des Protektors mit einer bestimmten Wartezeit zwischen den Tests, durchgeführt werden. Für eine positive Absolvierung darf die Abweichung der maximalen Beschleunigung des zweiten Tests höchstens 20% zum ersten betragen. Signalspitzen von einer Dauer unter 1 ms werden, aufgrund der analog-digital Wandlung des Signals mit einer Frequenz von mindestens 1 kHz , nicht mit Sicherheit erfasst. Die Dicke der Protektoren variiert und somit ändert sich der Abstand zwischen Unterkante des Protektors und Boden. In der Norm ist lediglich der Mindestabstand zwischen der Unterkante des Fallkörpers und dem Boden angegeben. In den Prüfberichten des DHV ist die Mindestgeschwindigkeit beim Aufprall mit 4.81 m/s angegeben, was einer Fallhöhe von 1.25 m im freien Fall nach Abzug von 3% für Verluste entspricht. Die Messung dieser Geschwindigkeit erfolgt in einer Höhe der Unterkante des Fallkörpers von 40 cm , da die Höhe des Gurtzeugs etwa $20 - 35\text{ cm}$ beträgt und die Messung vor dem Bodenkontakt erfolgen soll. Derzeit wird der Test beim DHV je einmal mit Rettungsgerät (Rettungsfallschirm) und einmal ohne durchgeführt. Die Norm enthält zur Zeit diesbezüglich keine Vorgabe. Ohne Rettungsgerät schneiden die Gurtzeuge teilweise etwas schlechter ab, da der unter der Sitzplatte angebrachte Rettungsschirm eine zusätzliche dämpfende Wirkung hat. Bei Staudruckprotektoren erfolgt vor dem Versuch ein Anströmen mit Luft. Die Prüfanlage des DHV mit einem auf den Prüfkörper aufgespannten Gurtzeug ist in Abbildung 1.1 rechts zu sehen.

Kapitel 2

Methodik

In der Arbeit sollen die Protektorprüfung sowie die Schutzwirkung der Protektoren untersucht werden. Eine Übersicht über die in der Diplomarbeit durchgeführten Arbeiten ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

Bei der Einführung der Musterprüfung wurden laut Auskunft des DHV keine detaillierten Untersuchungen zum Unfallgeschehen bezüglich Geschwindigkeit und Lage beim Auftreffen auf den Boden durchgeführt. Genaue Informationen dazu waren zu dieser Zeit noch nicht verfügbar. Heute stehen durch die DHV-Fragebögen sowie durch die Verbreitung frei zugänglicher Videos im Internet mehr Daten zur Verfügung.

Die Musterprüfung deckt die, zum Zeitpunkt der Einführung des Tests, als häufigste erachtete Unfallsituation ab. Dies ist der senkrechte Aufprall in aufrechter Position. Dadurch sollte die Verletzungsschwere bei Unfällen vermindert werden. Es stellt sich die Frage, inwieweit durch die vorhandenen

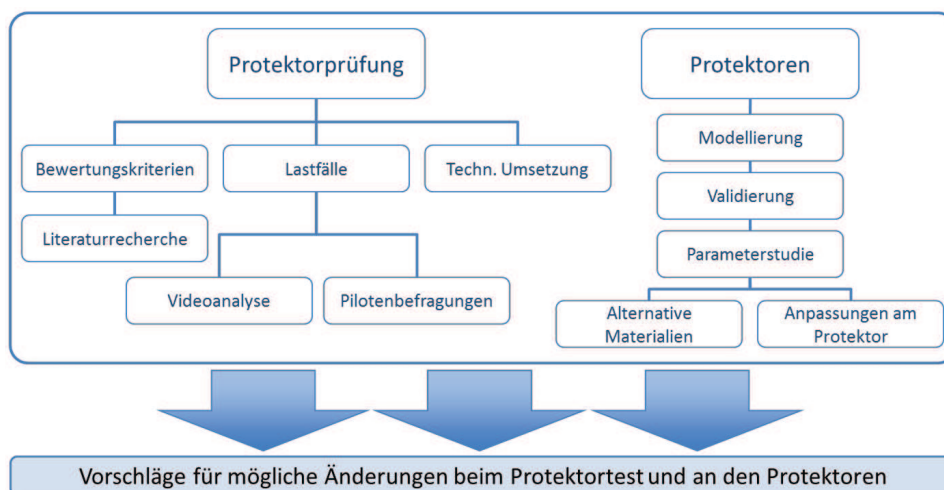


Abbildung 2.1: Methodik zur Beantwortung der Fragestellung

Protektoren hinreichender Schutz für die verschiedensten Realunfälle geboten wird. Außerdem soll untersucht werden, wie man die Aufprall-Prüfung anpassen könnte, um noch mehr Unfallsituationen abzudecken. Dafür sollen anhand der Befragungen und Videos relevante Lastfälle für das typische Unfallgeschehen abgeleitet werden. Mit den Ergebnissen lässt sich dann abschätzen, inwieweit der Protektortest Realunfälle widerspiegelt und durch welche Adaptierungen hier Verbesserungen erzielt werden könnten.

Bisher erfolgt bei der Musterprüfung die Bewertung der auftretenden Belastungen über die gemessene Beschleunigung. Durch eine Literaturstudie sollen mögliche Ergänzungen gefunden werden.

Die Musterprüfung ist jetzt mit einer in senkrechter Richtung geführten Bewegung umgesetzt. Durch Simulation soll die Zulässigkeit dieser Führung zur Abbildung eines Realunfalls untersucht werden.

Für ein gängiges Gurtzeug wird ein Simulationsmodell erstellt. Eine gute Übereinstimmung zwischen Realität und Simulation soll durch Validierung des Modells mit den aus verschiedenen Experimenten vorhandenen Ergebnissen erfolgen. Dazu werden Materialversuche durchgeführt und zusätzlich werden die Ergebnisse aus Versuchen des Gesamtmodells herangezogen. Bei diesen wurde das Gurtzeug auf den geführten Fallkörper der Aufprall-Prüfung oder auf einen Hybrid-III Dummy aufgespannt.

Um Vorschläge für Verbesserungen an den bestehenden Protektoren unterbreiten zu können, wird zuerst das Abschneiden des Basismodells bei verschiedenen Realunfallszenarien untersucht. Nachdem dies erfolgt ist, werden an den Protektoren im Modell Änderungen vorgenommen und deren Nutzen bei den entsprechenden Lastfällen analysiert.

Die gewonnenen Erkenntnisse münden schließlich in einem konkreten Vorschlag für eine verbesserte Aufprall-Prüfung zur Überprüfung der Schutzwirkung der Protektoren.

Kapitel 3

Lastfallermittlung

In diesem Kapitel werden typische Gleitschirm-Unfallsituationen ermittelt. Dazu werden vorhandene Fragebögen von verunfallten Piloten sowie Gleitschirm-Unfallvideos von Onlineplattformen untersucht. Anhand der Ergebnisse werden verschiedene Lastfälle abgeleitet.

3.1 Unfallbefragungen

In Deutschland, Österreich und der Schweiz besteht eine Meldepflicht nach Unfällen mit Luftsportgeräten. Die Unfallmeldung erfolgt an den DHV, den österreichischen Aero Club bzw. den Schweizer Hängegleiterverband. Diese Meldung gibt zwar Aufschluss über die Flugzustände unmittelbar vor dem Unfall, jedoch nicht über den Aufprall an sich und ist deshalb wenig hilfreich für die Analyse der Protektorschutzfunktion. In allen drei Ländern wird das gleiche Formular zur Meldung verwendet.

Im Zeitraum von Jänner 2009 bis Juni 2011 wurde vom DHV zusätzlich an Piloten, welche Verletzungen an der Wirbelsäule meldeten, ein Fragebogen ausgesendet. In diesem wurden die Piloten detaillierter zum Unfallhergang und Aufprall auf den Boden befragt. Freundlicherweise wurden vom DHV die Fragebögen in anonymisierter Form zur Verfügung gestellt. Von insgesamt 122 ausgesendeten Fragebögen wurden 61 ausgefüllte vom DHV übermittelt. Bei den verschiedenen Auswahlmöglichkeiten gab es zum Teil Mehrfachnennungen, oft wurden auch nicht alle Fragen beantwortet. Zufolge der Unfallstatistik des DHV für 2012 [21] kam es 2009 zu fünf, 2010 zu acht und 2011 zu 13 tödlichen Unfällen. Über diese können die Fragebögen keinen Aufschluss geben.

Von den verunfallten Piloten haben jeweils etwas über 35% einen Schaumstoffprotektor dicker als 15 cm oder einen Staudruck-Airbag verwendet. Der Rest verwendete dünnere Schaumstoffprotektoren oder Kombinationen aus beiden Systemen. Nur zwei Personen verwendeten einen anderen Protektortyp. Sieben Piloten hatten einen zusätzlichen Seitenprotektor an ihrem

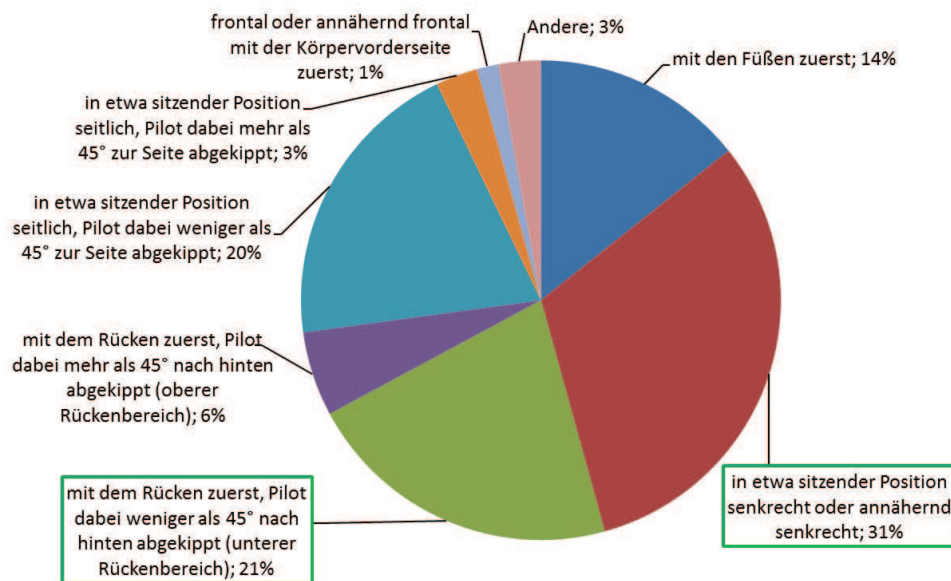


Abbildung 3.1: Fragebogenauswertung: Wie erfolgte der Aufprall?

Gurtzeug angebracht. Acht Personen gaben an, beim Unfall schwerwiegende oder deutliche bleibende Schäden davongetragen zu haben. Die Bewegungsrichtung beim Aufprall war dabei bei fünf Personen senkrecht nach unten, bei zwei eine Drehbewegung und bei einer Person kopfüber nach vorne. Mit 54% war die Lendenwirbelsäule am öftesten betroffen, die Brustwirbelsäule mit über 36% und die Halswirbelsäule bei etwas mehr als 5%. Der Rest entfällt auf Fragebögen, in denen die Frage nicht beantwortet wurde. Die verletzten Wirbel wurden nur zum Teil genannt, wobei, wenn angegeben, die zwei oberen Lendenwirbel und der unterste Brustwirbel mit Abstand am häufigsten betroffen waren. Um Zusammenhänge zwischen den Unfallfolgen und der Art des Protektors herstellen zu können, wären mehr Daten notwendig.

In Abbildung 3.1 sind die Ergebnisse auf die Frage „Wie erfolgte der Aufprall?“ dargestellt. Ein Aufprall „in sitzender Position senkrecht oder annähernd senkrecht“ wird bei etwas über 30% genannt. „Mit dem Rücken zuerst, Pilot dabei weniger als 45° nach hinten abgekippt (unterer Rückenbereich)“ wird bei 21% genannt. Diese beiden Unfalltypen entsprechen am ehesten der Situation bei der Musterprüfung. Hier könnten aber zum Beispiel auch Unfälle mit Aufprall im vorderen Bereich des Sitzbretts dabei sein. Fast 15% kommen mit den Füßen zuerst am Boden auf. 20% nannten für ihren Unfall einen Aufprall „in etwa sitzender Position seitlich, Pilot dabei weniger als 45° zur Seite abgekippt“. Die Unfälle mit einer Neigung von mehr als 45° nach hinten oder zur Seite kommen in Summe auf 9%.

Die Bewegungsrichtung des Piloten beim Aufprall war zu 40% senkrecht nach unten, bei fast 25% eine Drehbewegung, bei etwas über 15% ein Geradeausflug und bei nahezu 11% eine Bewegung nach rückwärts gerichtet. Bei etwas weniger als der Hälfte erfolgte der Aufprall mit dem Gesäß zuerst, ein Viertel kam auf den Füßen zuerst auf, 10% mit dem Oberkörper. Der Rest entfällt auf Arme/Schulter, die Oberschenkel und bei einer Person auf den Kopf. Zusätzlich zu den Wirbelsäulenverletzungen traten bei fast der Hälfte der Personen noch weitere Verletzungen auf. Hier waren verschiedenste Körperteile betroffen.

Ungefähr zwei Drittel gaben an, nach dem Aufprall in der gleichen Position liegen geblieben zu sein, der Rest überschlug sich seitlich, nach hinten oder nach vorne. Nur zwei Personen gaben an, dass der Protektor nach dem Erstaufprall ein weiteres Mal belastet wurde. Von den Personen, welche die entsprechende Frage beantwortet haben, gaben ungefähr drei Viertel an, das Gefühl gehabt zu haben, dass sich der Protektor verletzungsmindernd ausgewirkt hat.

Die beiden in Abbildung 3.1 grün umrandeten Situationen sind durch die Musterprüfung am ehesten abgedeckt. Nicht abgedeckt ist der Aufprall im vorderen Bereich des Sitzbrettes, welcher zum Beispiel im Landeanflug passieren kann, wenn der Pilot sein Gewicht in diesen Bereich verlagert. Ob der Aufprall bei einer Rückenlage von weniger als 45° noch abgedeckt ist, hängt von der genauen Rückenlage und der jeweiligen Form des Protektors ab. Beim Aufprall mit den Füßen zuerst besteht kein Schutz durch den Protektor. Der seitlich um weniger als 45° geneigte und die um mehr als 45° zur Seite oder nach hinten geneigten Fälle werden bisher nicht abgedeckt. Von der derzeitigen Aufprall-Prüfung werden also etwa 50% der Aufprallarten abgedeckt. Über genaue Aufprallgeschwindigkeiten und -winkel lässt diese Analyse keinen Aufschluss zu.

3.2 Unfallvideos

Durch die Fragebögen lässt sich schon ein erster Eindruck von realen Unfallsituationen gewinnen. Auf Videoplattformen im Internet sind verschiedene Unfallvideos zu finden. Auch diese können sehr hilfreich sein, ein Gefühl für die Unfallsituationen zu bekommen. Hier hat man den Vorteil, dass man nicht auf die subjektiven Aussagen des Piloten zum Hergang angewiesen ist. Über die aus dem Sturz resultierenden Verletzungen kann bei den Videos keine Aussage gemacht werden. Die Anzahl der verfügbaren Videos ist sehr begrenzt. Aufgrund der geringen Anzahl wäre es nicht sinnvoll die auftretenden Szenarien statistisch auszuwerten und damit Rückschlüsse auf die Häufigkeit der Auftretens der jeweiligen Situation zu ziehen. Im Gegensatz zu den Befragungen lassen sich aber mittels der Videos Aufprallgeschwindigkeiten und -winkel besser abschätzen.

Tabelle 3.1: Ergebnisse Videoanalyse

<i>Videoname</i>	v [m/s]	v_x [m/s]	v_y [m/s]	$-v_z$ [m/s]	α [°]	β [°]	γ [°]
Aufprallauskurve	14.9	10.6	0.0	10.6	45	10	0
Ausgehobelt	6.0	0.0	0.0	6.0	10	30	0
Beinevoraus	6.0	4.2	0.0	4.2	0	0	0
Direktaufruecken	10.0	-5.0	0.0	8.7	0	0	0
Frontalwiese	15.2	5.2	0.0	14.2	0	-30	0
Klapperfelsen	10.0	7.1	0.0	7.1	20	10	0
Klapperseitlich	7.5	0.0	7.1	2.6	0	20	0
Leichtseitlich	10.0	0.0	1.7	9.9	30	30	0
Seitlichinschnee	7.5	0.0	3.8	6.5	80	20	0
Spiralsturz	15.0	13.0	0.0	7.5	85	20	0
Stallaufruecken	7.5	-3.8	0.0	6.5	0	20	0
Steilspirale	15.0	10.6	0.0	10.6	60	20	0
Strandfrontal	7.5	0.0	0.0	7.5	0	-20	0
Verdreherseitlich	7.5	0.0	5.3	5.3	20	45	0
Vorderkante	14.9	12.9	0.0	7.5	0	0	0
Geom. Mittel	10.3			7.6			
Median	10.0	0.0	0.0	7.5			
0.75-Quantil	14.9	7.1	1.7	8.7			

In Tabelle 3.1 sind die betrachteten Videos mit den Schätzwerten für Geschwindigkeiten und Winkel der Lage des Piloten im Raum angeführt. Die Videos wurden analysiert und es wurde versucht die auftretenden Geschwindigkeiten und Auftreffwinkel abzuschätzen. Das verwendete Koordinatensystem ist in Abbildung 3.2 ersichtlich. Der Fehler bei der Abschätzung der Geschwindigkeit lässt sich schwer ermitteln, die Werte sollten jedoch als Richtwerte verwendbar sein. Es zeigte sich auch, dass die geschätzten Geschwindigkeiten im gleichen Bereich lagen wie die in der Literatur für verschiedene Flugzustände angegebenen Richtwerte.

Zur Analyse wurden 15 Videos ausgewählt. Wichtig war, dass im Video der Aufprall zu sehen ist, um diesen bezüglich Auftreffgeschwindigkeit und Lage des Piloten beurteilen zu können. Hinsichtlich auftretender Verletzungen wurde in einem Video angegeben, dass der Sturz zum Tod des Piloten führte und bei einem anderen, dass es zu schweren Verletzungen kam. Die Entfernungen wurden anhand der Größe des Piloten, der Spannweite des Gleitschirms und dem Abstand zwischen Pilot und Gleitschirm abgeschätzt. Zeitabstände für das Zurücklegen bestimmter Entfernungen wurden aus dem Programm zum Abspielen der Videos ausgelesen. Mit den so gewonnenen Werten wurde der Schätzwert für die Geschwindigkeit des Piloten beim Auf-

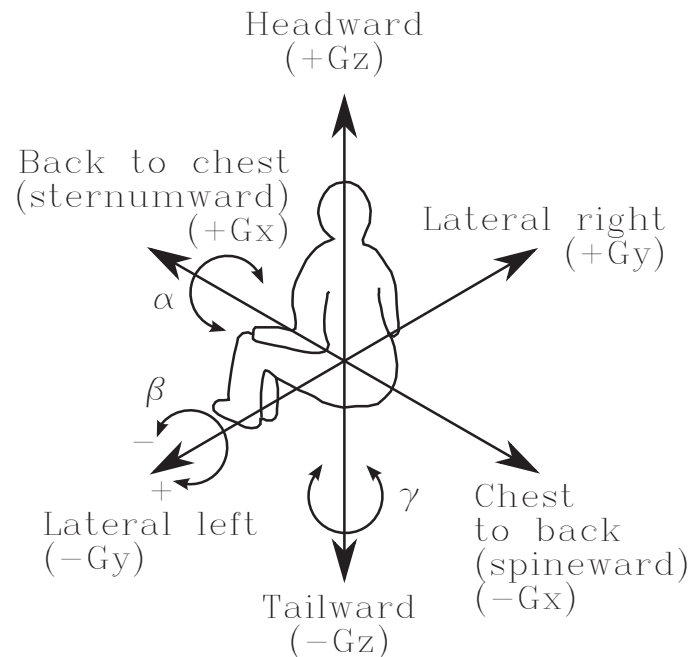


Abbildung 3.2: Koordinatensystem für menschlichen Körper [15].

prall auf den Boden erstellt. Die Lage im Raum wurde so gut wie möglich geschätzt.

Zum einen sieht man in Videos eine Reihe von Unfällen, bei denen der jeweilige Pilot mit dem Gesäß am Boden aufkommt. Die Protektoren sind für diesen Lastfall ausgelegt und bieten daher in dieser Situation den besten Schutz. Hier muss man jedoch noch einen Blick auf die auftretenden Geschwindigkeiten werfen. Die kinetische Energie, die beim Aufprall abgebaut werden muss, ist proportional dem Quadrat der Sinkgeschwindigkeit.

Beim Protektortest tritt eine Geschwindigkeit von etwas über 4.81 m/s auf, was einer Fallhöhe von rund 1.2 m entspricht. Die maximale Sinkgeschwindigkeit für das Rettungsgerät ist mit 6.8 m/s festgelegt, da darunter keine schweren Verletzungen des Piloten zu erwarten seien [3].

Je nach Flugzustand werden verschiedene Sinkgeschwindigkeiten erreicht. Für einen sogenannten B-Leinen-Stall, einer Abstieghilfe (aber nicht zur Landung gedacht), bei der ein Strömungsabriss durch das Herunterziehen der B-Leinen (mittlere Leinen) herbeigeführt wird, treten Sinkgeschwindigkeiten von $7\text{-}10 \text{ m/s}$ auf [8]. Bei anderen Flugzuständen können noch höhere Sinkgeschwindigkeiten auftreten. Wenn in solch einer Situation der Aufprall auf den Boden erfolgt, bieten die Protektoren sicherlich einen gewissen Schutz im Bereich des Gesäßes. Die Aufprallgeschwindigkeit für die sie ausgelegt sind wird jedoch oft deutlich überschritten.

Zum anderen sieht man in Videos auch öfters einen Aufprall während einer

Kurve oder während eines Spiralfzugs. Bei einer sogenannten Steilspirale können Sinkgeschwindigkeiten zwischen 8 und 14 m/s, im Extremfall und bei Verwendung eines entsprechenden Gleitschirms laut Voigt [13, S. 124] bis über 25 m/s auftreten. 20 m/s Sinkgeschwindigkeit ist für weniger aggressive Gleitschirme laut Gesprächen mit Piloten schon ein recht hoher Wert. Dazu kommen in diesem Fall noch hohe Umfangsgeschwindigkeiten. Hier ist die Lage des Piloten mehr oder weniger stark zur Seite geneigt. Auch sonst sind verschiedenste Schräglagen bis hin zum rein seitlichen Aufschlag in einen Hang zu sehen. Die Sinkgeschwindigkeiten sind subjektiv nach Betrachten verschiedener Videos im gleichen Bereich wie beim senkrechten Aufprall. Es gibt auch Videos, in denen man eine Pendelbewegung des Piloten beobachten kann. Wenn zum Beispiel der Schirm vorschießt, pendelt der Pilot nach. Durch diese Konstellation kann es zu einem Aufprall kommen, bei dem der Pilot nach vorne geneigt ist. Dieser erfolgt meist mit den Beinen zuerst, je nach Schräglage erfolgt dann ein Sturz auf die Körpervorderseite oder es gehen die Beine in die Höhe und der Pilot trifft im vorderen Bereich des Sitzbretts am Boden auf. Auch beim Horizontalflug gegen einen Hang kann dieser Bereich beansprucht werden.

3.3 Repräsentative Lastfälle

Aus den oben beschriebenen Auswertungen der Fragebögen und dem Betrachten von Unfallvideos sollen nun repräsentative Lastfälle abgeleitet werden. Die Liste der Einflussfaktoren ist lang. Sie reicht von der Lage beim Aufprall, der Richtung und Größe des Geschwindigkeitsvektors, über Bodenverhältnisse, wie zum Beispiel Art des Untergrundes und Schräglage, bis hin zum verwendeten Gurtzeug. Eine umfassende Betrachtung ist kaum möglich und würde zu einer Unzahl an Lastfällen führen. Deshalb muss im Vorhinein eine Entscheidung getroffen werden, was untersucht werden soll. Die ermittelten Konfigurationen sind in Abbildung 3.3 zusammengefasst. Die Lage der Konfiguration im schwarzen Rahmen entspricht dem derzeitigen Protektortest. Gegenüber dieser Ausgangslage sind die weiteren Konfigurationen entweder um die x-Achse oder die y-Achse gedreht. Die Festlegung auf diese Konfigurationen erfolgte aufgrund der folgenden Überlegungen: Der Aufprall auf das Gesäß ist zufolge der Befragungen der häufigste Fall. Dieser kann mit einer Lage der Wirbelsäule in senkrechter Richtung oder leicht nach vorne, hinten oder seitlich abgekippt erfolgen. Extreme Schräglagen über 45° nach hinten abgekippt konnten in den Videos nicht beobachtet werden. Bei den Befragungen wurden sie jedoch einige Male genannt. In geringerer Rückenlage erfolgt der Aufprall beim untersuchten Protektor (siehe Abschnitt 5.1), ähnlich wie ein senkrechter Aufprall, in den am stärksten ausgeführten Teil des Protektors. Der Aufprall ohne bzw. mit geringer Rückenlage soll deshalb später mit einem Lastfall abgedeckt werden, da sehr

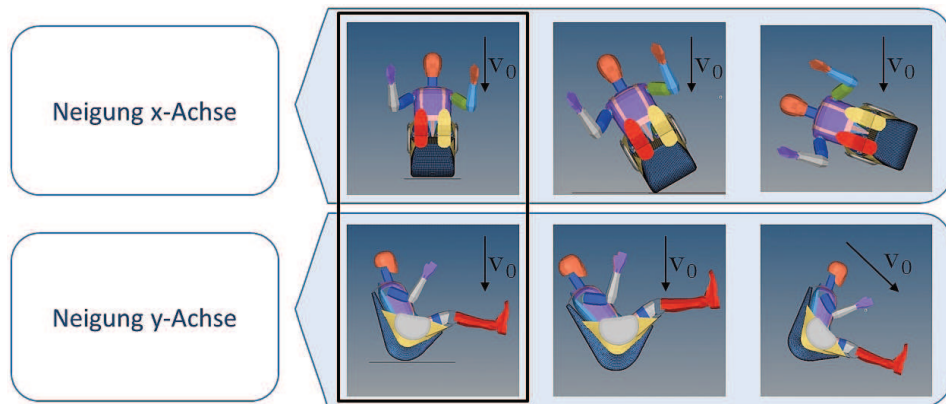


Abbildung 3.3: Übersicht Lastfälle für Variation der Aufprallgeschwindigkeit in senkrechter Richtung von 4.81 m/s bis 14 m/s

ähnliche Ergebnisse zu erwarten sind.

Einen seitlichen Aufprall konnte man in etlichen Videos beobachten und er wird auch in den Fragebögen in über 20% der Fälle angegeben. Auch dieser Lastfall soll deshalb abgebildet werden. Hier sollen fürs Erste ebenfalls zwei Konfigurationen mit verschiedenen Schräglagen verwendet werden.

In Videos kann immer wieder ein Einschlag während des Pendelns nach vorne beobachtet werden. Der Aufprall erfolgt entweder mit den Füßen oder im vorderen Bereich des Sitzbretts. Ein Aufprall auf den vorderen Bereich des Sitzbrettes soll untersucht werden. Hier könnte noch ein gewisser Schutz durch den Protektor gegeben sein. Wie gut dieser noch ist, soll mit diesem Lastfall analysiert werden. In den Unfallbefragungen gibt es diesen Lastfall nicht als eigene Konstellation. Diese Unfallsituation fällt bezüglich des Aufpralls entweder unter die Punkte „mit den Füßen zuerst“ oder „in etwa sitzender Position senkrecht oder annähernd senkrecht“. Die Kombination aus „in etwa sitzender Position senkrecht oder annähernd senkrecht“ mit der Bewegungsrichtung „Geradeausflug“ wurde z.B. sieben Mal angegeben, hier könnten teilweise solche Situationen vorgelegen sein. Da hier in Videos oft auch eine horizontale Geschwindigkeit beobachtet werden konnte, wird bei diesem Lastfall die vertikale Geschwindigkeit mit einer zusätzlichen horizontalen Geschwindigkeit von 10 m/s überlagert. Diese erscheint zwar recht hoch, kann aber durchaus erreicht werden. Der günstigere Fall ohne eine horizontale Geschwindigkeit soll auch untersucht werden.

Resultierend aus diesen Überlegungen wurden für die Nachbildung des realen Gurtzeugs fürs Erste folgende Konstellationen simuliert:

- K1: nach hinten abgeknickt um 28° wie beim Protektortest, mit senkrechtem Aufprall
- K2: nach hinten abgeknickt um 45° , mit senkrechtem Aufprall

- K3: seitlich abgeknickt um 30° , mit senkrechtem Aufprall
- K4: seitlich abgeknickt um 70° , mit senkrechtem Aufprall
- K5: 10° nach vorne geneigt, mit und ohne zusätzlicher horizontaler Geschwindigkeit von 10 m/s

Die Lastfälle sollen für ein erstes Abschätzen der Schutzwirkung des realen Gurtzeugs dienen. Aufbauend auf den Ergebnissen soll später zur Einschränkung der durchzuführenden Simulationen eine Reduktion auf drei Lastfälle durchgeführt werden.

Die beim Unfall auf den Piloten wirkenden Belastungen sind stark von der Auftreffgeschwindigkeit abhängig. Für die Auftreffgeschwindigkeiten senkrecht zum Boden wurden folgende Werte ausgewählt:

- $v_1 = 4.81\text{ m/s}$, wie beim Protektortest
- $v_2 = 6.8\text{ m/s}$, Obergrenze der Sinkgeschwindigkeit für Rettungsgeräte
- $v_3 = 8\text{ m/s}$, aufgerundeter Mittelwert Unfallvideos
- $v_4 = 14\text{ m/s}$, gerundeter Maximalwert Unfallvideos

Der Boden wird als starr betrachtet. Ein Aufschlag auf weicherem Untergrund, wie etwa einer Wiese oder einem Gebüsch, sollte sich für den Piloten eher positiv auswirken. Nachteilig wäre beispielsweise ein Auftreffen auf einem spitzen Felsen. Je nach Reaktion des Piloten kann dieser in manchen Fällen versuchen, den Absturz zuerst mit den Beinen etwas abzufedern oder sich gleich auf den Protektor verlassen. Es soll davon ausgegangen werden, dass der Protektor die volle Aufprallenergie abbauen muss. Der Untergrund wird vereinfachend als horizontal angesehen, auch wenn dieser, gerade bei Unfällen welche direkt nach dem Start passieren, oft geneigt ist.

Kapitel 4

Unfallbewertung

Für die Vergleichbarkeit der Unfallszenarien und die Bewertung der Unfallschwere müssen diese quantifiziert werden. Zur Beurteilung können beispielsweise auf Körperregionen wirkende Kräfte oder Beschleunigungen herangezogen werden. Beim verpflichtenden Protektortest wird die einwirkende Beschleunigung auf den starren Prüfkörper in senkrechter Richtung gemessen. Eine statische Methode zur Bewertung, welche nur die maximal auftretenden Werte berücksichtigt, wäre zwar sehr einfach, jedoch ist das Verletzungsrisiko auch stark von der Einwirkdauer abhängig. Zur Zeit erfolgt die Bewertung bei der Musterprüfung so, dass gewisse Beschleunigungen nicht länger als eine bestimmte Zeitspanne einwirken dürfen und eine maximale Beschleunigung von $50 g$ generell nicht überschritten werden darf (siehe Abschnitt 1.3). Grenzwerte für vom menschlichen Körper ertragbare Belastungen sind nur sehr schwer festzulegen. Versuche mit Freiwilligen können nur in Bereichen durchgeführt werden, bei welchen keine Verletzungen zu erwarten sind. Daneben werden Versuche mit Tieren oder menschlichen Kadavern durchgeführt, um die Auswirkungen von Belastungen, bei denen Verletzungen zu erwarten sind, zu untersuchen. Eine weitere Möglichkeit um an Grenzwerte zu kommen ist es, Realunfälle mit bekannten Folgen in Simulationen nachzustellen. Es können auch Datenlogger zum Einsatz kommen, um nach einem Unfall auf die aufgetretenen Belastungen schließen zu können.

Auswirkungen von schnell aufgebrachten Beschleunigungen auf den menschlichen Körper wurden beispielsweise von Eiband [4] untersucht. Hier wurde verschiedenste Literatur zu dem Thema zusammengetragen und analysiert. Es wird darauf verwiesen, dass aus diesen Literaturstudien folgt, dass die Toleranz des menschlichen Körpers auf schnell aufgebrachte Beschleunigungen davon abhängig ist

- in welcher Richtung die Beschleunigung auf den Körper wirkt.
- wie groß die Beschleunigung ist.
- wie lange die Beschleunigung aufgebracht wird.
- wie schnell die Beschleunigung aufgebracht wird.

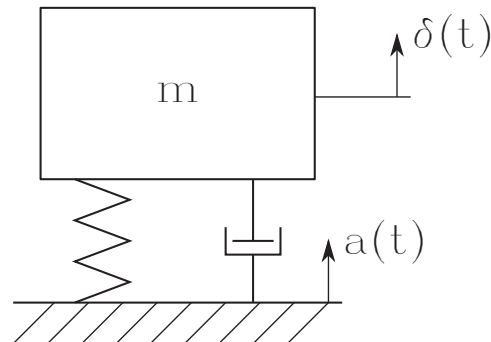


Abbildung 4.1: Feder-Dämpfer Modell [7].

- in welcher Form der Körper während des Einwirkens der Beschleunigung abgestützt wird.

Beim Hubschrauber- und Flugzeugdesign wird darauf geachtet, dass in Unfallsituationen gewisse Grenzwerte von Belastungen auf die Insassen nicht überschritten werden [16], [15]. Die Auswirkungen von schnellen Beschleunigungen sind auch beim Freifall von Rettungsbooten auf die Wasseroberfläche [7] oder für die Auswirkungen von Anti-Fahrzeug-Minen [9] relevant. Eine übergreifende Betrachtung der Auswirkungen von Belastungen in verschiedene Richtungen wurde beispielsweise zur Bewertung von Verletzungsrisiken bei Landungen von Orion-Raumkapseln durchgeführt [6].

Das bei diesen Betrachtungen für den menschlichen Körper verwendete Koordinatensystem ist wieder das in Abbildung 3.2 dargestellte.

Stech et al.[12] schlägt eine Bewertung von einwirkenden Beschleunigungen mit einem einfachen Feder-Dämpfer-Masse Modell vor (Abbildung 4.1).

Beschleunigungen in die verschiedenen Koordinatenrichtungen werden bei diesem Modell voneinander unabhängig betrachtet. Jede Koordinatenrichtung wird mit einem Feder-Dämpfer-Masse System mit folgender Differentialgleichung beschrieben:

$$\ddot{\delta}(t) + 2 * \zeta * \omega_n * \dot{\delta}(t) + \omega_n^2 * \delta(t) = a(t)$$

ζ ... Dämpfungskoeffizient

ω_n ... Eigenfrequenz

$a(t)$... auf das System aufgebrachte Beschleunigung

$\delta(t)$... zeitabhängige Auslenkung der Masse

$\dot{\delta}(t)$... zeitabhängige Geschwindigkeit der Masse

$\ddot{\delta}(t)$... zeitabhängige Beschleunigung der Masse

g ...Erdbeschleunigung

Aus der resultierenden Auslenkung $\delta(t)$ wird dann der so genannte Dynamic

Tabelle 4.1: Eigenfrequenzen und Dämpfungskonstanten [6]

	<i>x-Richtung</i>	<i>y-Richtung</i>	<i>z-Richtung</i>
ω_n [rad/s]	62.8	58.0	52.9
ζ	0.2	0.09	0.224

Tabelle 4.2: Grenzwerte Dynamic Response [2]

	<i>DRL +Gx</i>	<i>DRL -Gx</i>	<i>DRL Gy</i>	<i>DRL +Gz</i>
Geringes Risiko	35	28	14	15.2
Moderates Risiko	40	35	17	18
Hohes Risiko	46	46	22	22.8

Response (DR) berechnet:

$$DR(t) = \frac{\omega_n^2 * \delta(t)}{g}$$

Für die Eigenfrequenz und die Dämpfung werden die Werte von Lawrence et al. [6] herangezogen (Tabelle 4.1). Natürlich wird sich der menschliche Körper nicht wie ein ideales lineares Feder-Dämpfer Modell verhalten. Im Rahmen der Modellbildung wird jedoch diese Vereinfachung getroffen, um eine relativ einfache Bewertung von Unfällen durchführen zu können.

Von Brinkley et al. [2] sind, basierend auf etlichen Untersuchungen, DR-Grenzwerte für geringes, moderates und hohes Verletzungsrisiko angegeben. Diese beruhen in der positiven z-Richtung auf einer statistischen Auswertung und stehen für eine Wahrscheinlichkeit einer Wirbelsäulenverletzung von 0.5%, 5% bzw. 50%. Über die Verletzungsschwere wird hier keine Aussage getroffen. Für die anderen Richtungen war die Datenlage nicht so umfassend. Hier wurden die Grenzwerte wie folgt festgelegt: Für hohes Verletzungsrisiko wurden Belastungen, welche bekanntermaßen schwere Verletzungen hervorriefen, auf das System aufgebracht und die Spitzenwerte des DR berechnet. Beim geringen Risiko wurde das gleiche Vorgehen gewählt. Hier stammten die Belastungen aus Untersuchungen mit Freiwilligen, welche keine Verletzungen erlitten hatten. Für moderates Risiko wurde der Mittelwert zwischen geringem und hohem Risiko angenommen. Aus Tabelle 4.2 können die entsprechenden Werte entnommen werden.

Für die x- und z-Richtung gibt es für die jeweils positive und negative Richtung unterschiedliche Grenzwerte. Bei aufgebrachten Beschleunigungen entlang der y-Achse sind die Belastungsgrenzwerte für die positive und negative Richtung ident. Abgeleitet wurden diese Grenzwerte aus verschiedensten Versuchen, so wurden für die Beschleunigungen in z-Richtung unter ande-

rem Erfahrungen mit Schleudersitzen verschiedener Kampfflugzeuge herangezogen. Generell, im Speziellen aber für die y-Achse, wird bemerkt, dass die Schätzungen auf eher wenigen Daten beruhen. Versuche mit freiwilligen Personen können nur in Bereichen geringer Belastungen durchgeführt werden, um diese nicht zu gefährden. Auch kann es keine allgemein gültigen Werte geben, da diese in Abhängigkeit vom allgemeinem Körperzustand, Alter, Geschlecht, sowie vielen weiteren Einflussfaktoren variieren können. Man kann so aber zumindest eine gewisse Abschätzung über die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Verletzungen treffen.

Die Lösung der obigen Differentialgleichung erfolgt numerisch mit dem Softwarepaket Matlab. Als Erregung $a(t)$ dienen die Beschleunigungen in die jeweiligen Koordinatenrichtungen aus den Simulationen bzw. Experimenten. Für die Validierung der Berechnungen in Matlab wurden von Brinkley et al. [2] Beschleunigungsverläufe und zugehörige DR-Werte entnommen und mit den Ergebnissen der eigenen Berechnungen verglichen. Es wurden damit die gleichen DR-Werte wie beschrieben erzielt.

Wie ebenfalls von Brinkley et al. [2] dargestellt, muss bei gleichzeitig auftretenden Beschleunigungen in verschiedene Koordinatenrichtungen der resultierende DR-Wert innerhalb eines von den Grenzwerten aufgespannten Ellipsoids liegen, um das jeweilige Risikolevel nicht zu überschreiten:

$$\beta(t) = \sqrt{\left(\frac{DR_x(t)}{DRL_x}\right)^2 + \left(\frac{DR_y(t)}{DRL_y}\right)^2 + \left(\frac{DR_z(t)}{DRL_z}\right)^2} \leq 1$$

Je nach gewähltem Risikolevel ergibt sich durch die verschiedenen Grenzwerte ein anderer Wert für β .

In Abbildung 4.2 sind in der x-z-Ebene Ellipsen, aufgespannt durch die obigen DRL-Werte, eingezeichnet (grüne, schwarze und rote Kurven). Sieht man Protokortests vom DHV an, beträgt die während des Aufpralls verstreichende Zeit etwa 60 ms. Aus Diagrammen von Eiband [4] wurden Tests mit einer ähnlichen Belastungsdauer ausgelesen. Es handelt sich bei den Belastungen um Trapezimpulse. Als Einwirkdauer ist die Zeit angegeben, welche die maximale Beschleunigung unverändert einwirkte. Diese stammen aus Versuchen mit Personen, welche die Belastungen freiwillig („Voluntary“) ertragen haben und der Grenzwert, ab dem ernste („Severe“) Verletzungen zu erwarten sind, von Versuchen mit Schimpansen als Probanden. Abzulesen sind sie in Tabelle 4.3 für die x-Richtung bzw. in Tabelle 4.4 für die z-Richtung. Die Abschätzung der Verletzungsschwere erfolgte bei Eiband [4] mit der Verletzungsskala von Hasbrook [5]. Belastungen, die unterhalb der Schwelle „Freiwillig“ („Voluntary“) angeführt sind, sollten zu keinerlei Auswirkungen auf den Menschen führen. Der Bereich zwischen „Freiwillig“ und „Ernst“ („Severe“) erfasst leichte, moderate bis hin zu schweren Verletzungen, bei welchen jedoch ein Überleben normalerweise sicher ist. Die strichlierte und die durchgehende blaue Ellipse in Abbildung 4.2 stellen die

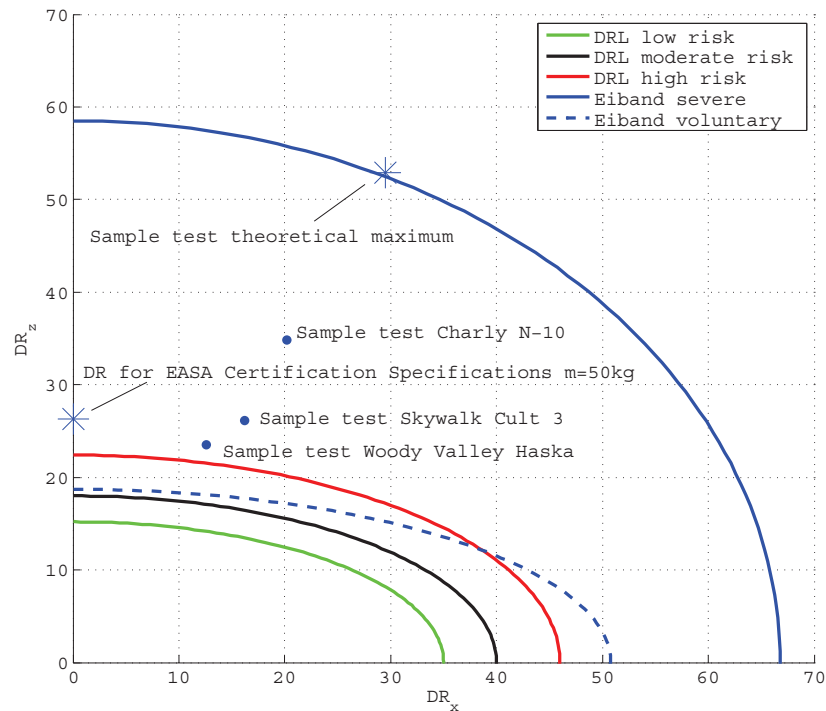


Abbildung 4.2: Vergleich verschiedener Belastungsgrenzwerte und von DR-Werten beim Protektortest

Tabelle 4.3: Trapezimpulse x-Richtung

	<i>Einwirkdauer der max. Beschleunigung [s]</i>	<i>max. Beschleunigung [g]</i>	<i>Ruck [g/s]</i>
Freiwillig [10]	0.1	35	1156
Ernst [11]	0.064	49	1065

Übergänge dieser Verletzungsniveaus dar. Für die aufgebrachten Beschleunigungen wurde numerisch, unter Verwendung der obigen Dämpfungskonstanten und Eigenfrequenzen, die zugehörigen DR-Werte ermittelt und diese als Hauptachsenlängen herangezogen.

Daneben wurde der Grenzwert für die Kompression zwischen Becken und Lendenwirbelsäule von 680 kg herangezogen [16] und ebenfalls mit obigen Parametern der zugehörige DR-Wert bestimmt. Als Einwirkdauer wurden dabei 50 ms und als zeitliche Änderung der Beschleunigung 1000 g/s ge-

Tabelle 4.4: Trapezimpulse z-Richtung

	<i>Einwirkdauer der max. Beschleunigung [s]</i>	<i>max. Beschleunigung [g]</i>	<i>Ruck [g/s]</i>
Freiwillig [14]	0.04	16	180
Ernst [11]	0.048	42	1000

wählt. Die in der Quelle genannten 680 kg wurden mit der Erdbeschleunigung multipliziert, um eine Kraft zu erhalten und anschließend durch die relevante Körpermasse (Annahme: gesamter Oberkörper ohne Beine hat circa 50kg) dividiert, um auf die einwirkende Beschleunigung zu schließen. Im Diagramm sind die resultierenden DR-Werte für drei verschiedene Protektortests eingezeichnet. Der Skywalk Cult 3 ist jener Protektor, der später im Simulationsmodell nachgebildet wurde. Vom Protektortest beim DHV dieses Gurtzeugs, durchgeführt am 15.09.2010, lagen die Messdaten nicht als Rohdaten vor, sondern nur als Diagramme aus dem auf der Homepage veröffentlichten Bericht. Deshalb wurden die Simulationsergebnisse verwendet. Dies erscheint aufgrund der guten Übereinstimmung zulässig (siehe Abbildung 5.4). Das Gurtzeug Charly N-10 mit einem 14 cm dicken Schaumstoffprotektor bestand die Prüfung am 12.10.2010 sehr knapp. Im Gegensatz dazu schnitt das Modell Hasky von Woody Valley, ein Gurtzeug mit Airbagprotektor, beim Protektortest ausgesprochen gut ab. Für diese beiden Gurtzeuge wurden die Messwerte vom DHV zur Verfügung gestellt. Es wurden bei allen drei Gurtzeugen jene Versuche herangezogen, welche ohne Rettungsgerät durchgeführt wurden. Die Versuche mit eingebautem Rettungsfallschirm sind nicht eingezeichnet. Diese schneiden zwar etwas besser ab, der Unterschied beim DR ist jedoch klein. Der Punkt „Protektortest Maximum“ zeigt den resultierenden DR, wenn die in Abschnitt 1.3 beschriebenen Grenzen vollständig ausgenutzt werden. Der DR liegt für die ausgewählten Gurtzeuge in einem Bereich, in dem schon mit einer relativ großen Wahrscheinlichkeit Verletzungen erwartet werden.

An den stark unterschiedlichen Ellipsen kann man schon sehen, dass eine Festlegung von Grenzwerten sehr schwer ist. Die Liste der Einflussfaktoren ist lang und es kann im Modell nicht alles erfasst werden. Ein Vorteil des Modells ist seine Richtungsabhängigkeit. Wie gut sich das Modell für die Bewertung von Gleitschirm-Unfällen eignet wird sich erst später zeigen.

Für die Bewertung der verschiedenen untersuchten Situationen in dieser Arbeit werden die Beschleunigungen in die verschiedenen Richtungen, sowie auch die aus diesen Beschleunigungen resultierenden Dynamic Response-Werte herangezogen.

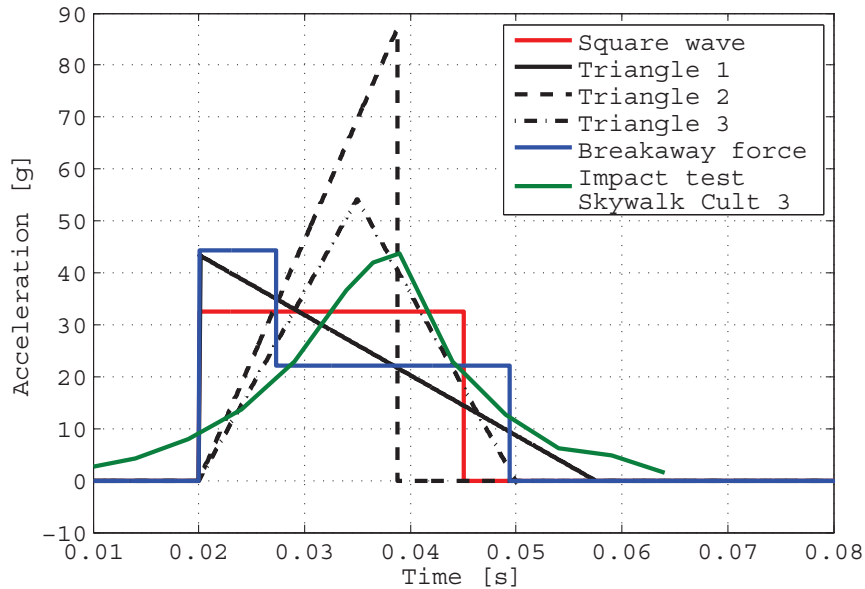


Abbildung 4.3: Gewählte Beschleunigungsverläufe über der Zeit

4.1 Auswirkungen verschiedener Beschleunigungsverläufe auf den Dynamic Response

Sowohl die Einwirkdauer als auch die Höhe der Beschleunigung wirken sich auf den DR-Wert aus. Für verschiedene Beschleunigungs-Zeit-Kurven soll untersucht werden, inwieweit der resultierende DR-Wert beeinflusst wird. Eine vertikale Geschwindigkeit von -8 m/s soll auf Stillstand verzögert werden. Unter Annahme einer konstanten Beschleunigung und eines zur Verfügung stehenden Weges von 0.1 m ergibt sich 320 m/s^2 oder 32.6 g als Beschleunigung. Die Zeit bis zum Stillstand beträgt 25 ms . Für den gleichen Verzögerungsweg sollen auch noch andere Beschleunigungsverläufe untersucht werden. Es wurden drei verschiedene Dreiecksformen, sowie ein Verlauf mit einer anfangs kurzzeitig höheren Beschleunigung gewählt (Abbildung 4.3). Zum Vergleich ist noch die Beschleunigung bei der Aufprall-Prüfung des Gurtzeuges Skywalk Cult 3 eingezeichnet.

Die in Tabelle 4.5 dargestellten DR-Werte ergeben sich bei gleichmäßiger Aufteilung der gewählten Beschleunigungen auf die drei Koordinatenrichtungen. Am besten schneidet der Verlauf mit einer kurzzeitigen hohen Losbrechkraft und anschließend konstanter Beschleunigung ab. Hier ist die Beschleunigung in dem Bereich hoch, wo auch die Geschwindigkeit noch hoch ist. Im Gegensatz dazu ist die Beschleunigung beim zweiten Dreiecksverlauf gerade dort klein, wo die Geschwindigkeit am höchsten ist. Daher ist bei die-

Tabelle 4.5: DR-Werte für verschiedene Beschleunigungsverläufe

	<i>Rechteck</i>	<i>Dreieck 1</i>	<i>Dreieck 2</i>	<i>Dreieck 3</i>	<i>Losbrechkraft</i>
DR_x	28.7	26.8	38.6	33.1	24.8
DR_y	32.7	30.2	42.0	36.8	28.2
DR_z	26.9	24.3	33.0	29.5	22.8

sem Verlauf auch am Ende eine wesentlich höhere maximale Beschleunigung erforderlich, um auf gleichem Bauraum die Verzögerung zu vollziehen. Das hat auch wesentlich höhere DR-Werte zur Folge. Die DR-Werte spiegeln hier gut wider, was für die vorgegebenen Verläufe zu erwarten war: Wenn der vorhandene Weg zur Verzögerung begrenzt ist, dann sollte die Beschleunigung gleich am Anfang möglichst hoch sein. Dadurch sinkt die Geschwindigkeit schnell und der vorhandene Weg kann bestmöglich ausgenützt werden. Je später der Anstieg der Beschleunigung erfolgt, desto mehr Weg ist bis dahin schon zurückgelegt. Kurven von durchgeführten Protokortests entsprechen bisher am ehesten dem Dreieck 3. Dieser Verlauf schnitt von den Gezeigten am zweitschlechtesten ab. Durch einen Übergang auf einen günstigeren Verlauf könnte man die maximal auftretenden Beschleunigungen und DR-Werte deutlich senken.

Kapitel 5

Simulationsmodell

In einem ersten Schritt soll für ein bestehendes Gurtzeug der Musterprüfungstest in einer Simulation nachgestellt werden. Als Pre- und Postprozessor wurde das Softwarepaket HyperWorks verwendet. Für die Lösung wird der explizite Finite-Elemente-Methode Gleichungslöser LS-Dyna in der Version R7.0.0 (R7.79069) verwendet. Die Berechnung erfolgt auf einem Linux-Cluster. Danach sollen weitere Experimente im Modell nachgestellt und das Modell so validiert werden. Beim bestehenden Protektortest ist die Bewegung durch die Führung stark eingeschränkt. Ein Vergleich von Simulationen mit freier und geführter Bewegung soll Aufschluss über den Einfluss dieser Führung bringen.

5.1 Auswahl Gurtzeug

In den Fragebögen wurde die Verwendung von Schaumstoffen dicker als 15 cm und von Staudruckairbags für die Protektoren in etwa gleich oft genannt. Auch die Form und Größe der Protektoren variiert. Es gibt welche, bei denen sich der Schutz von den Oberschenkeln über das Gesäß bis zum Rücken hinaufzieht, bei anderen ist fast ausschließlich der beim Protektortest relevante Bereich des Gesäßes geschützt. Zusätzlich zum vorgeschriebenen Mustertest wurden vom DHV 2008 Versuche in Zusammenarbeit mit dem allgemeinen deutschen Automobilclub (ADAC) durchgeführt. Dabei wurden ein Hybrid III 50th Male Dummy und das Gurtzeug Skywalk Cult XC verwendet. Neben dem Aufprall mittig auf das Gesäß im freien Fall wurden auch zwei Versuche mit seitlichem Aufprall durchgeführt. Einmal wurde dabei der für das verwendete Gurtzeug erhältliche Seitenprotektor verwendet und einmal wurde der Versuch ohne diesen durchgeführt. Vom DHV wurden die dabei erfassten Messdaten zur Verfügung gestellt. Somit stehen neben den Ergebnissen der Protektorprüfung für dieses Gurtzeug zusätzliche Daten zur Validierung des Modells zur Verfügung und deshalb wird dieses zur Modellierung herangezogen. Das beim ADAC-Test verwen-

deute Gurtzeug ist jedoch heute nicht mehr erhältlich. Deshalb fällt die Wahl auf das Nachfolgemodell Skywalk Cult 3. Dieses Gurtzeug wurde vom DHV zur Verfügung gestellt. Die verwendeten Protektoren bei diesem neueren Modell sind baugleich zum Vorgänger. Der Schaumstoffprotector, welcher bei diesem Gurtzeug verwendet wird, weist an seiner dicksten Stelle eine Stärke von 17 *cm* auf, der Seitenprotector hat eine Dicke von 2.3 *cm*. In Abbildung 1.1 ist das Gurtzeug Skywalk Cult XC zu sehen. Form und Größe der Protektoren sind in Abbildung 3.3 ersichtlich. Der Rückenprotector dieses Modells ist im Bereich des Beckens und der unteren Wirbelsäule am stärksten ausgeführt. In Richtung vorderer Sitzbrettkante und oberer Rückenbereich nimmt dann die Dicke ab.

5.2 Ermittlung der Materialkennwerte

Für die Simulation mussten die Materialkennwerte für die Schaumstoffe des Rücken- und Seitenprotectors bestimmt werden. Daneben sind im Gurtzeug noch andere Materialien verbaut. Es wird jedoch angenommen, dass diese für das Verhalten des Gurtzeugs beim Aufprall eher eine untergeordnete Rolle spielen. Deshalb wurden für diese weiteren Materialien, sofern sie modelliert wurden, die erforderlichen Materialkennwerte nur abgeschätzt und nicht durch Versuche ermittelt. Für die Modellierung des Schaums in LS-Dyna wurde das Material „MAT_FU_CHANG_FOAM“ ausgewählt. Bei diesem Materialmodell kann die nominelle Spannung über der Dehnung für verschiedene Dehnraten angegeben werden [17]. Diese Kurven wurden experimentell bestimmt. Dazu wurde ein senkrecht geführter zylindrischer Fallkörper mit 150 *mm* Durchmesser und einem Gesamtgewicht samt Aufhängung von $m = 7712$ *g* auf Materialproben der Protektoren aus verschiedenen Höhen fallen gelassen. Die Dicke der quaderförmigen Schaumstoffprobe des Rückenprotectors betrug mit 17 *cm* gleich viel, wie an der dicksten Stelle des Protectors. Beim Versuch wurde die Beschleunigung $a(t)$ mit einer Abtastrate von 20 *kHz* aufgezeichnet. Als Höhen wurden $h_0 = 459$ *mm*, 815 *mm*, 1274 *mm* und beim Rückenprotector zusätzlich noch 1800 *mm* gewählt. Dies entspricht Aufprallgeschwindigkeiten von $v = 3$ *m/s*, 4 *m/s*, 5 *m/s* und 5.94 *m/s*. Der Aufprall bei der derzeitigen Musterprüfung erfolgt mit 4.81 *m/s* im gleichen Geschwindigkeitsbereich. Die ungefilterte gemessene Beschleunigung wurde im Programm Microsoft Excel zur Geschwindigkeit und zum Weg aufintegriert. Dabei wird von einer für einen Zeitschritt stückweise konstanten Beschleunigung ausgegangen. Als Geschwindigkeit beim Aufprall wurde die Freifallgeschwindigkeit ohne Verluste angenommen. Diese lässt sich mit $v = \sqrt{2 * g * h}$ berechnen. Die aktuelle Kraft auf die Oberfläche ergibt sich aus $F(t) = m * a(t)$ und die Dehnung aus der aktuellen Länge $l(t)$ und der ursprünglichen Länge l_0 mit $\epsilon = \frac{l(t) - l_0}{l_0}$. Der Druck $p(t)$ wurde aus der aktuellen Kraft und aus der Kreisfläche A bei einem Durchmesser

von 128 mm mit $p(t) = \frac{F(t)}{A}$ ermittelt. Die anfängliche Dehnrate $\dot{\epsilon}$ ergibt sich aus der zeitlichen Ableitung der Dehnung: $\dot{\epsilon} = \frac{d}{dt} \frac{l(t)-l_0}{l_0} = \frac{1}{l_0} \frac{dl(t)}{dt} = \frac{v(t)}{l_0}$. Überschlagsmäßig wird für die ganze Bewegung diese Dehnrate unterstellt, in Wirklichkeit sinkt diese aber mit abnehmender Geschwindigkeit. Die so ermittelten Dehnungs-Druck-Kurven wurden mit ca. 15-20 Stützpunkten als Funktion für die Materialkarten verwendet. Für die statische Belastung wurden die Kurven bei der geringsten Fallhöhe (geringste Dehnrate) herangezogen. Mit den so erhaltenen Kennwerten wurde der beschriebene Fallimpaktortest mit den verschiedenen Fallhöhen anschließend in numerischen Simulationen mit LS-Dyna nachgestellt.

5.2.1 Ergebnisse

Die Abbildungen 5.1 und 5.2 zeigen beispielhaft den Vergleich zwischen Rechnung und Versuch für den Seitenprotector bei einer Fallhöhe von 815 mm. Es ist ersichtlich, dass sowohl für die wirkende Beschleunigung über der Zeit, als auch für die Beschleunigung über der Eindringtiefe eine relativ gute Übereinstimmung erzielt werden konnte. Die Ergebnisse für die anderen durchgeführten Tests sind in Anhang A zu finden. Hochfrequente Schwingungen im Beschleunigungssignal der Simulationen wurden mit einem SAE-600 Filter herausgefiltert. Zusätzlich wurden die Videos vom Versuch der Simulation gegenübergestellt, wobei die Ergebnisse auch gut übereinstimmen (Abbildung 5.3). Damit steht nun für die weiteren Simulationen für den Schaum des Seiten- und des Rückenprotectors je eine Materialkarte zur Verfügung, mit der die durchgeführten Materialtests gut wiedergespiegelt werden.

5.2.2 Diskussion

Nach einem ersten Simulationsdurchgang wurden die Ergebnisse mit dem Versuch verglichen. Punktuell wurden anschließend noch Werte in den Kurven angepasst, um eine noch genauere Übereinstimmung zu erzielen. Die so erzielten Resultate stimmen, sowohl bei der Beschleunigung über der Zeit als auch bei der Beschleunigung über der Eindringtiefe, zufriedenstellend mit den Versuchen überein.

5.3 Modellierung des Protectors

Auch die Protectorprüfung, wie in Abschnitt 1.3 beschrieben, wurde in einem Simulationsmodell nachgestellt. Dazu wurden das Gurtzeug und der Fallkörper modelliert. Das Gurtzeug wurde vereinfacht aus den Komponenten Rückenprotector mit Überzug, Bodenplatte, sowie den Gurten aufgebaut. Der Rückenprotector und die Bodenplatte wurden am Gurtzeug abgemessen, im Programm PROEngineer gezeichnet und im Programm Hyper-

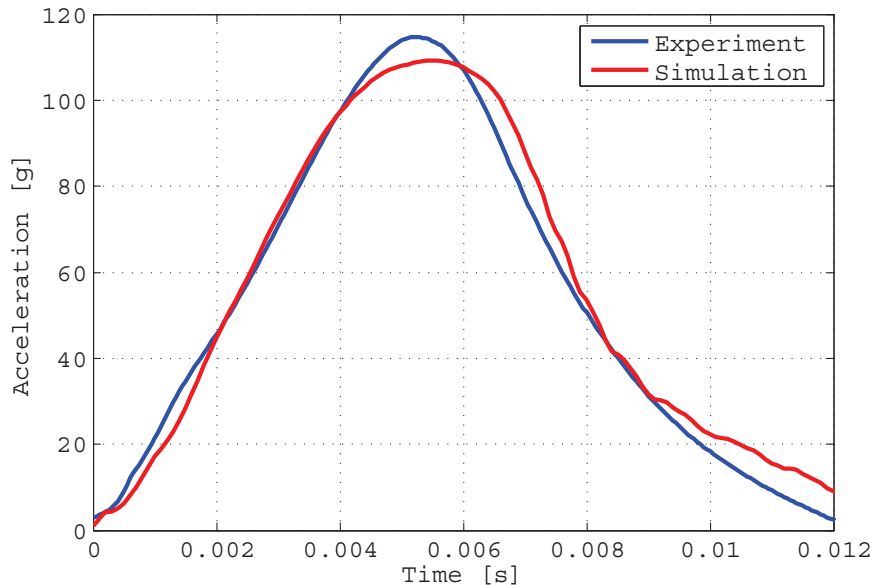


Abbildung 5.1: Vergleich Simulation/Experiment für Seitenprotector bei 815 mm Fallhöhe: Beschleunigung über Zeit

Mesh als Geometrie importiert. Der Fallkörper wurde mit Hilfe von Zeichnungen des DHV ebenfalls in PROEngineer nachgezeichnet und in HyperMesh importiert. Die so erstellten Geometrien wurden anschließend vernetzt. Für das Material des Rückenprotectors wurden vorerst die ermittelten Materialkennwerte verwendet. Ob sich der mit einem Stoff überzogene und ins Gurtzeug eingebaute Schaumprotector gleich wie der Schaum bei den Materialtests verhält kann erst nach Gegenüberstellung der Ergebnisse aus Simulation und Realversuch beurteilt werden. Auf den Seitenprotector wurde hier noch verzichtet, da dieser bei dieser Prüfung ohnehin nicht beansprucht wird. Die Masse des Gurtzeuges beträgt insgesamt 5 kg und die des Fallkörpers 50 kg. Für den Fallkörper wurde nur eine translatorische Bewegung in der z-Richtung zugelassen. Translationen in die anderen Koordinatenrichtungen sowie sämtliche Rotationsfreiheitsgrade wurden, entsprechend dem Aufbau der Prüfung, gesperrt. Die Lage im Raum wurde dem Prüfungsaufbau beim DHV angepasst. Als Anfangsgeschwindigkeit wurde mit 4.85 m/s die beim DHV-Test für dieses Gurtzeug erreichte Geschwindigkeit eingestellt. Der Aufprall in der Simulation erfolgt auf einen starren, waagrechten Boden. Derart konnte die Simulation mit den vorhandenen Ergebnissen der Protectorprüfung des Gurtzeugs verglichen und so das Modell des Gurtzeugs validiert werden.

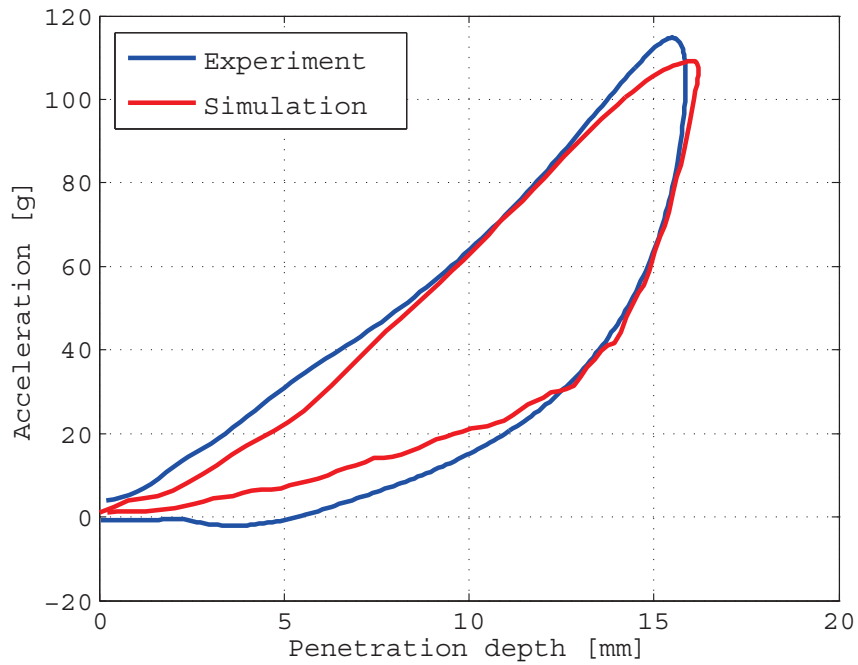


Abbildung 5.2: Vergleich Simulation/Experiment für Seitenprotector bei 815 mm Fallhöhe: Beschleunigung über Eindringtiefe

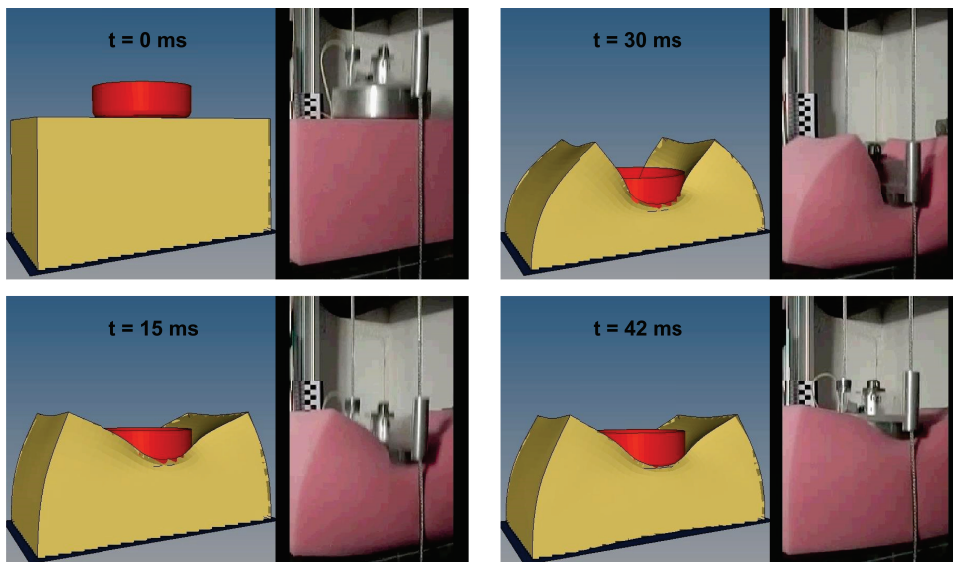


Abbildung 5.3: Vergleich Simulation/Experiment für Rückenprotectorschaum bei 1800 mm Fallhöhe: Videos

5.4 Validierung des Simulationsmodells anhand des Protektortests

Nachdem die erforderlichen Kenngrößen für den Schaumstoff des Rückenprotektors gefunden wurden, wurde untersucht, ob mit diesen die Simulation des Protektortests mit den Ergebnissen des realen Tests für das Gurtzeug Skywalk Cult 3 übereinstimmt. Im Gurtzeug ist der Schaumstoff des Protektors noch mit einem Stoff überzogen und so eingebaut. Dieser Stoffüberzug hat eine dämpfende Wirkung auf die ausströmende Luft und scheint außerdem zu einer gewissen Vorverdichtung zu führen. Im Simulationsmodell wurde zwar der Protektor auch mit einer Membran überzogen, welche die Querkontraktion begrenzt, diese hat hier aber keine Dämpfung zur Folge. Eine erste Simulation des Tests brachte ein viel zu weiches Schaumverhalten gegenüber der Realität. Zuerst wurde in der Simulation der Schaumstoff stark verdichtet ohne relevanten Anstieg der Beschleunigung. Am Ende bei einer starken Verdichtung erfolgte dann ein sehr steiler Anstieg und es kam zu sehr hohen Beschleunigungsspitzen. Dieses Verhalten wurde auf das Fehlen der dämpfenden und vorverdichtenden Wirkung des Stoffüberzugs zurückgeführt. Zur Abhilfe wurde der Schaumstoff in der Simulation als vorverdichtet angenommen. Wie weiter unten beschrieben, war dies nicht ganz zielführend, deshalb wurde ein neuer Ansatz gewählt: Eine Verdichtung von 90% entspricht einer Dehnung von rund -47% . Der Bereich vor dieser Dehnung in den Dehnungs-Druck-Kurven wurde abgeschnitten und die restliche Kurve dann auf den gesamten Bereich ausgedehnt. So kann ein ähnliches Verhalten wie durch eine Vorverdichtung erzielt werden. Die im Endeffekt verwendeten Dehnungs-Druck-Kurven bilden nicht mehr unbedingt den Schaum alleine ab. Jedoch kann damit das Verhalten des mit einer Stoffhülle überzogenen und in den Protektor eingebauten Schaums gut nachgestellt werden.

5.4.1 Ergebnisse

In Abbildung 5.4 sind die Resultate aus der Simulation mit den gedehnten Dehnungs-Druck-Kurven den Ergebnissen des Protektortests gegenübergestellt. Es sind, wie in den Prüfberichten des DHV, die Beschleunigungen in vertikaler Richtung eingezeichnet. Die Grenzwerte für das Bestehen der Protektorprüfung sind in Grün eingezeichnet. Für die Kurve vom Experiment wurden aus dem zugehörigen Prüfbericht des Gurtzeuges Skywalk Cult 3, erstellt vom DHV am 15.09.2010, Punkte aus den beiden durchgeführten Tests ohne Rettung ausgelesen und das arithmetische Mittel gebildet. Da im Prüfbericht die Relativbeschleunigung zur Erdbeschleunigung eingezeichnet ist, wurden die Werte für den Vergleich zur Simulation um $-1 g$ korrigiert. Welcher Filter für diese Kurven verwendet wurde, ist, wie bereits früher erwähnt, nicht bekannt. Bei den Beschleunigungen aus der Simulation wurde ein SAE-180 Filter verwendet. Auch hier ist wieder eine gute Übereinstim-

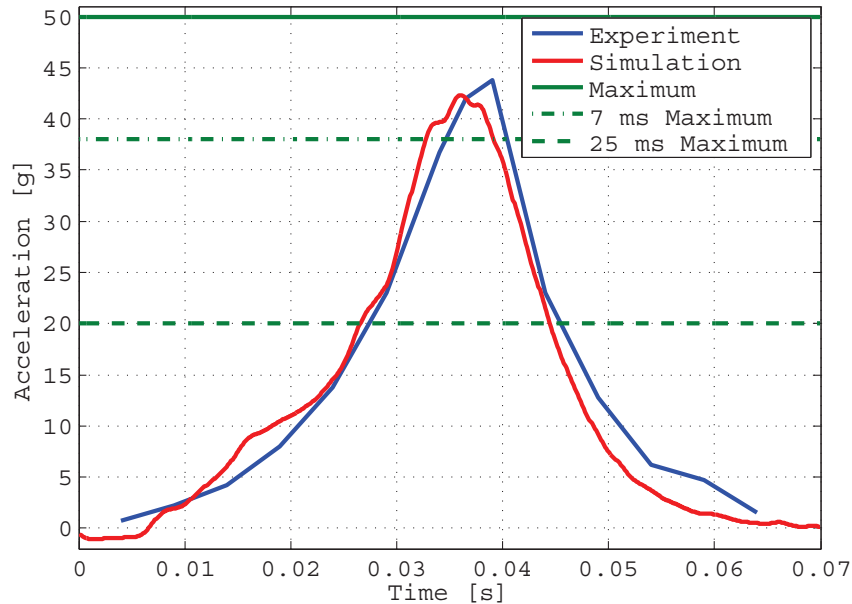


Abbildung 5.4: Vergleich Simulation/Experiment: Protektortest

mung der Kurven über den gesamten Bereich zu erkennen, sowohl bei der Zeitdauer, als auch bei der Amplitude. Mit dem nun vorhandenen Modell kann also das Verhalten beim Protektortest zufriedenstellend vorhergesagt werden. Eine Gegenüberstellung der Videos von Experiment und Simulation konnte mangels eines Videos des Experiments hier nicht durchgeführt werden.

5.4.2 Diskussion

Mehrere Simulationen zeigten, dass mit einer Vorverdichtung von 90% in der Simulation eine gute Übereinstimmung mit den Testergebnissen erzielt werden kann. Jedoch zeigte sich bei den Simulationen, dass durch die Vorverdichtung eine starke Verformung des Protektors mit dem Start der Simulation einherging. Diese Verformung trat auch bei Verwendung einer steiferen Hülle auf. Um eine aufwändige Simulation zur Findung eines Gleichgewichtszustandes zu umgehen, wurde von der Idee der Vorverdichtung wieder Abstand genommen. Beim zweiten vorher beschriebenen Ansatz mit einer Streckung des hinteren Bereichs der Dehnungs-Druck-Kurven war die Übereinstimmung ebenfalls gut, ohne aber eine störende Verformung des Protektors in Kauf nehmen zu müssen. Nachdem die Druckwerte noch etwas nach oben korrigiert wurden, konnte so eine recht gute Übereinstimmung mit dem Protektortest erreicht werden.

5.5 Simulationsmodell mit Dummy

Für das Modell zum Nachstellen der verschiedenen Unfallszenarien wurden dem Modell noch die beiden Seitenprotektoren hinzugefügt. Diese wurden wieder abgemessen, in PROEngineer modelliert und danach als Solid-Elemente vernetzt. Es wurde der gleiche Materialkartentyp wie beim Rückenprotector verwendet, die Dehnungs-Druck-Kurven kamen aus Materialversuchen mit dem Seitenprotector. Anstatt des Fallkörpers wurde für dieses Modell der, in LS-Dyna als FE-Komponente verfügbare, Hybrid-III Rigid Body-Dummy verwendet. Der in seiner Ursprungsconfiguration aufrecht stehende Dummy wurde durch Anpassen der Winkel an den verschiedenen Gelenken und durch Verschiebung ins Gurtzeug „hineingesetzt“. Die Gesamtmasse von Dummy und Gurtzeug beträgt 85 kg . Die Gurte wurden zuerst, wie beim Protector-testmodell, mit 1-D Elementen und Führungen an bestimmten Punkten modelliert. Dabei traten jedoch Probleme beim Kontakt zwischen Dummy und den Gurten auf. Deshalb wurden die Gurte neu als Flächen modelliert. Hier traten zu Beginn sehr starke Schwingungen der Gurte auf, diese konnten jedoch durch einen Brustgurt, welcher ursprünglich im Modell nicht vorhanden war, in den Griff bekommen werden. Bei diesem Modell wurden zwei verschiedene Einstellungen der Freiheitsgrade gewählt: einerseits wie bei der Protectorprüfung mit nur einem translatorischen Freiheitsgrad senkrecht zum Boden, andererseits mit in allen Richtungen freigeschalteten Freiheitsgraden für Translation und Rotation. Durch einen Vergleich sollte später eine Aussage darüber möglich sein, ob trotz einer geführten Bewegung beim Protector-test die Ergebnisse mit jenen einer freien Bewegung vergleichbar sind. Prinzipiell sind alle Simulationen mit dem gleichen Modell durchgeführt worden. Folgende Parameter wurden je nach Bedarf angepasst:

- Orientierung der Wand
- Richtung der Erdbeschleunigung
- Geschwindigkeit
- Freiheitsgrade
- Protector-konfiguration

5.6 Nachstellen von Dummyversuchen in der Simulation

Der DHV ließ 2008 beim ADAC Freifallversuche mit einem Hybrid III 50th Male Dummy durchführen. Aus einer Höhe von 1.125 m wurde der Dummy um 45° nach hinten geneigt in seitlich aufrechter Position, sowie aus gleicher Höhe mit einer Neigung von 45° zur Seite fallen gelassen. Der Versuch mit seitlicher Neigung wurde je einmal mit und ohne Seitenprotector durch-

geführt. Durch das Fehlen einer Führung kam es vor allem beim seitlich geneigten Dummy zu einer Änderung der Position vor dem Aufprall. Wie die genaue Lage beim Aufprall war, musste mittels der vorhandenen Videos der Tests abgeschätzt werden. Es war klar ersichtlich, dass beim Test mit Seitenprotector die seitliche Schräglage deutlich größer als beim Test ohne Seitenprotector war. Der seitliche Aufprallwinkel beim Test mit Seitenprotector betrug rund 55° , beim Test ohne Seitenprotector etwa 41° . Wirklich genau lässt sich die Lage aber aus den Videos nicht bestimmen, der tatsächliche Winkel könnte durchaus um einige Grad in den verschiedenen Richtungen abweichen. Zur Abschätzung der Sensitivität bezüglich der Seitenlage wurden zusätzliche Simulationen mit 53° bzw. 43° durchgeführt. Dem Dummy fehlten bei diesen Versuchen beide Arme, von den Beinen waren nur die Oberschenkel vorhanden. In dieser Konfiguration beträgt die Masse des Dummies etwa 56 kg . Einzelne Gliedmaßen können beim frei verfügbaren Dummymodell in LS-Dyna nicht entfernt werden. Deshalb ist für die Vergleichbarkeit zwischen Versuch und Simulation die Geschwindigkeit in der Simulation soweit herabgesetzt, dass sich die gleiche kinetische Energie beim Aufprall ergibt. Diese Konfiguration wurde für eine zusätzliche Validierung des Gurtzeugmodells, bei anderer Beanspruchung als beim Protokortest, herangezogen.

5.6.1 Ergebnisse der verschiedenen Dummyversuche

Die dargestellten Ergebnisse aus den Simulationen wurden mit einem SAE-180 Filter gefiltert. Ob und wie die Messdaten aus den Experimenten gefiltert wurden, konnte vom DHV leider nicht beantwortet werden. Die Messdaten für die Beckenbeschleunigung vom Dummyversuch standen nur in Form von Diagrammen in einem Bericht zur Verfügung. Aus diesen Diagrammen wurden einige Punkte ausgelesen und der Bereich dazwischen linear interpoliert.

Dummytest senkrecht

Die gemessenen Beschleunigungen vom 45° nach hinten und seitlich nicht geneigten Test in Versuch und Simulation sind in Abbildung 5.5 zu sehen. Da keine nennenswerte Belastung in y-Richtung erfolgt, ist diese nicht dargestellt. Anstieg und Abfall sind bei der Simulation etwas steiler als im Experiment. Für beide Richtungen sind die Ergebnisse aber sowohl vom zeitlichen Verlauf als auch von der Höhe recht ähnlich. Die DR-Werte sind für das Experiment jedoch deutlich größer als für die Simulation (Tabelle 5.1).

Dummyversuche seitlich mit Seitenprotector

Für den Versuch mit Seitenprotector sind die Ergebnisse in Abbildung 5.6 ersichtlich. Die Simulation mit einer Seitenlage von 55° lieferte wesentlich

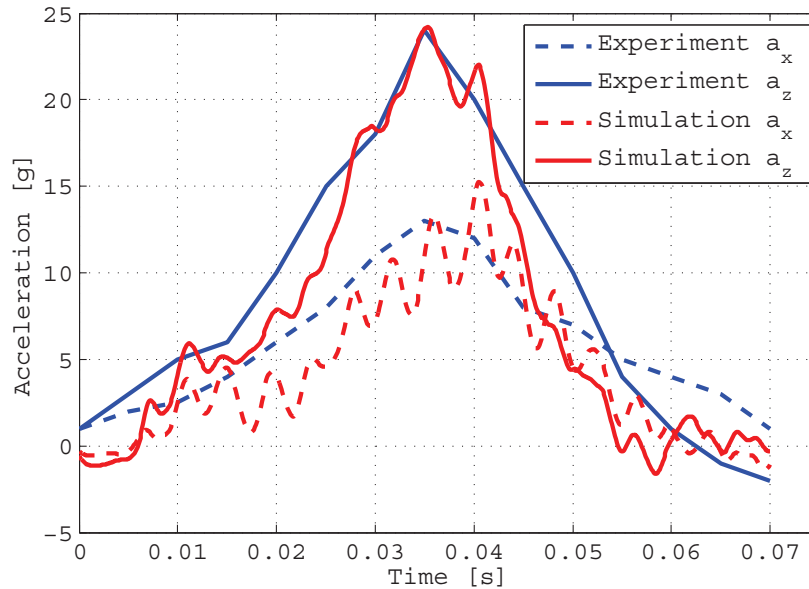


Abbildung 5.5: Vergleich Simulation/Experiment: Senkrechter Dummyversuch

Tabelle 5.1: Vergleich Simulation/Experiment: senkrechter Dummyversuch

	<i>Experiment</i>	<i>Simulation</i>
DR_x	15.0	11.7
DR_z	26.1	18.0
$Max. a_x$ [g]	13	15.3
$Max. a_z$ [g]	24	24.2

höhere Beschleunigungen als der Versuch, jene mit 53° wesentlich geringere. Beim Experiment traten mit Abstand größere DR-Werte gegenüber den Simulationen auf (Tabelle 5.2).

Dummyversuche seitlich ohne Seitenprotector

Auch die Ergebnisse in Abbildung 5.7 zeigen keine sehr gute Übereinstimmung. Wieder fällt die Beschleunigung je nach Seitenlage einmal wesentlich höher und einmal wesentlich geringer als im Versuch aus. Wie vorher fällt der DR auch hier wieder für das Experiment mit Abstand am höchsten aus (Tabelle 5.3).

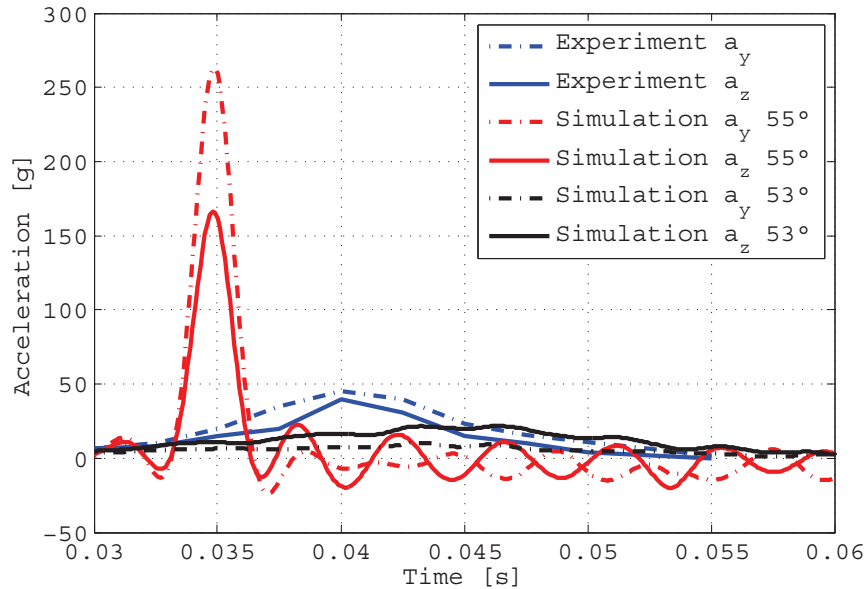


Abbildung 5.6: Vergleich Simulation/Experiment: Seitlicher Dummyversuch mit Seitenprotector

Tabelle 5.2: Vergleich Simulation/Experiment: Seitlicher Dummyversuch mit Seitenprotector

	<i>Experiment</i>	<i>Simulation 53°</i>	<i>Simulation 55°</i>
DR_x	10.5	9.6	7.4
DR_y	44.5	10.7	26.2
DR_z	25.7	14.7	12.0
$Max. a_x$ [g]	10	11.1	57.7
$Max. a_y$ [g]	45	10.4	263.3
$Max. a_z$ [g]	40	21.8	166.2

5.6.2 Diskussion der verschiedenen Dummyversuche

Dummytest senkrecht

Erste Simulationen mit gleicher Aufprallgeschwindigkeit wie beim ADAC-Realtest zeigten wesentlich höhere Beschleunigungen in der Simulation gegenüber dem Versuch. Da die Masse in der Simulation um rund 30 kg höher war, entsprach dies auch den Erwartungen. In weiterer Folge wurde, mangels der Option das Gewicht des Dummies in der Simulation durch Entfernen der

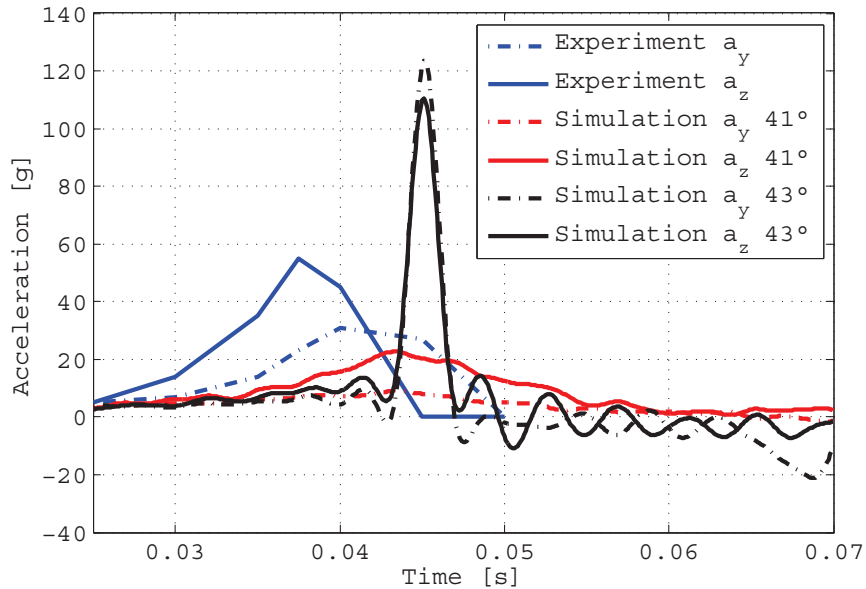


Abbildung 5.7: Vergleich Simulation/Experiment: Seitlicher Dummyversuch ohne Seitenprotector

Tabelle 5.3: Vergleich Simulation/Experiment: Seitlicher Dummyversuch ohne Seitenprotector

	<i>Experiment</i>	<i>Simulation 41°</i>	<i>Simulation 43°</i>
DR_x	8.9	8.8	8.6
DR_y	32.4	10.6	17.8
DR_z	36.6	13.9	13.6
$Max. a_x$ [g]	11	9.8	35.5
$Max. a_y$ [g]	31	9.2	123.5
$Max. a_z$ [g]	55	22.7	110.5

Gliedmaßen zu verringern, die Geschwindigkeit in der Simulation herabgesetzt, sodass die kinetische Energie vor dem Aufprall in beiden Fällen gleich hoch war. Wie man in Abbildung 5.5 sehen kann wurde damit eine zufriedenstellende Übereinstimmung erreicht. Trotzdem sind die DR-Werte deutlich unterschiedlich, was wahrscheinlich an der etwas längeren Einwirkdauer der Belastung im Experiment liegt. Das der Unterschied so groß ausfällt ist überraschend.

Dummytest seitlich mit Seitenprotector

Eine Simulation der um 45° nach hinten und 55° zur Seite geneigten Konfiguration führte zuerst zu wesentlich höheren Beschleunigungen als im Versuch. Hier war es wieder sehr hilfreich die Videos gegenüberzustellen. Zwischen Protectorunterseite und Boden konnte im Realversuch kein Verrutschen beobachtet werden. Aus diesem Grund wurde der Reibungsbeiwert für diesen Kontakt in der Simulation auf 0.99 erhöht. Dadurch wurde ein seitliches Abrutschen verhindert. Auch beim Kontakt zwischen Sitzplatte und Rückenprotector wurde die Reibung von ursprünglich 0.2 auf 1 erhöht. Damit wurde die Relativbewegung zwischen diesen Teilen stark verringert. Im realen Gurtzeug werden diese beiden Komponenten von einer weiteren Hülle zusammengehalten, welche eine Relativbewegung stark einschränkt. Ebenso kann es zwischen Dummy und Sitzplatte durch richtig verschlossene Beingurte zu keinen großen Verschiebungen kommen. Dieser Eindruck wurde nicht nur im Video vermittelt, sondern auch beim Hineinsetzen ins Gurtzeug und Verschließen der Gurte bestätigt. Im Modell wurde, da die modellierten Beingurte durch ein gewisses Spiel zum Dummy das seitliche Verrutschen nicht genug begrenzen, auch für diesen Kontakt die Reibung auf 0.8 erhöht. Schließlich wurden noch die Spalte im Modell zwischen Protector, Bodenplatte und Dummy durch Erhöhen der Kontaktdicke der Bodenplatte eingeschränkt.

Die Ergebnisse in Abbildung 5.6 sind für die verschiedenen Lagen sehr unterschiedlich. Bei der geringeren Schräglage erfolgte nur eine Belastung des Rückenprotectors. Im Gegensatz dazu kam es bei der stärkeren Schräglage auch zu einem Auftreffen am Seitenprotector und dadurch zu einer wesentlich höheren Beschleunigung. Ob im Versuch der Seitenprotector belastet wurde, lässt sich mit Hilfe der Videos nicht mit Sicherheit bestimmen. Des Weiteren ist relevant, ob der Dummy beim Aufprall mittig auf der Bodenplatte sitzt und fest angeschnallt ist. Inwieweit dies beim Versuch der Fall war, lässt sich nicht sagen.

Durch weitere Simulationen könnte vielleicht eine Lage gefunden werden, bei der die Ergebnisse übereinstimmen. Ob die Lage in der Simulation dann der des Versuchs entspricht, kann man jedoch nicht sagen, deshalb wurde auf weitere Parametervariationen verzichtet.

Wie vorher fallen auch hier die DR-Werte wieder überraschend aus. Sehr eigenartig aufgrund der Beschleunigungsverläufe ist, dass der DR aus der Simulation mit 55° seitlicher Neigung besser abschneidet als der aus dem Experiment. Dies zeigt, dass das DR-Modell bei entsprechend kurzer Einwirkdauer kaum anschlägt.

Dummytest seitlich ohne Seitenprotector

Beim Versuch ohne Seitenprotector erfolgte der Aufprall des Dummies in einer deutlich kleineren Schräglage als beim Test mit Seitenprotector. Vermutlich lagen aus diesem Grund die bei den Versuchen gemessenen Beschleunigungen ohne Seitenprotector sogar leicht unterhalb jener mit Seitenprotector.

In der Simulation mit 41° Seitenneigung kam es zu keinem Kontakt zwischen Becken und Boden. Dadurch fiel die Höhe der Beschleunigung in der Simulation wesentlich geringer aus. Bei einer zweiten Simulation dieses Lastfalls bei einer Schräglage von 43° schlug der Dummy nach Belastung des Rückenprotectors mit dem Becken am Boden auf. In diesem Fall war die gemessene Beschleunigung dann wieder höher als im Versuch.

Für den ursprünglichen Zweck des Versuchs, dem Nachweis der Schutzwirkung des Seitenprotectors, wurde eine zu geringe seitliche Neigung gewählt. Der Großteil der Aufprallenergie wird bei dieser Konfiguration vom Rückenprotector abgebaut. Die Sensitivität bezüglich der Lage beim Aufprall ist sehr groß.

Für den DR zeigt sich wieder das gleiche Bild wie beim Aufprall mit Seitenprotector. Bei sehr kurzer Einwirkdauer bleibt er, trotz relativ hoher Beschleunigung, eher gering.

5.7 Vergleich freie/geführte Bewegung mittels Simulation

Bei der Musterprüfung erfolgt die Bewegung des Fallkörpers samt Gurtzeug geführt. Es ist nur eine translatorische Bewegung in vertikaler Richtung und keine Rotation möglich. Bei Realunfällen ist jedoch kein einziger Freiheitsgrad eingeschränkt. Deshalb stellt sich die Frage, wie gut mit der Prüfkongfiguration das reale Verhalten nachempfunden wird. Der Vorteil der geführten Bewegung besteht darin, dass Versuche wesentlich einfacher wiederholt werden können. Der freie Fall wird aufgrund niemals exakt gleicher Bedingungen immer etwas anders ausfallen, bei der geführten Bewegung hat man wesentlich weniger Einflüsse. Bei den Versuchen vom ADAC konnte man diese Problematik auch schon gut erkennen. Der Seitenaufprall sollte mit und ohne Seitenprotector bei einer Schrägstellung von 45° erfolgen. Eine Analyse der Winkel kurz vor dem Aufprall ergab jedoch Winkel von 41° bzw. 55° zur Senkrechten. Für eine Musterprüfung wäre eine solche Streuung aufgrund fehlender Wiederholbarkeit wahrscheinlich nicht zulässig. Mit entsprechendem Aufwand ließe sich sicher noch eine höhere Genauigkeit erreichen. Es wäre jedoch wünschenswert, dass die Musterprüfung ohne allzu hohen Aufwand durchgeführt werden kann. Zur Untersuchung dieser Problematik wurden die in Abschnitt 3.3 erarbeiteten Konfigurationen mit dem

Tabelle 5.4: Vergleich Simulation Seitlich 70° , freie und geführte Bewegung

	<i>frei</i>	<i>geführt</i>
DR_x	3.6	7.0
DR_y	35.3	51.4
DR_z	10.2	10.8
$Max. a_x$ [g]	47.9	90.3
$Max. a_y$ [g]	470.7	528.6
$Max. a_z$ [g]	189.7	169.8

Realgurtzeug sowohl im freien Fall, als auch mit nur einem translatorischen Freiheitsgrad beim Aufprall durchgeführt. Der Lastfall mit zusätzlicher horizontaler Geschwindigkeit wurde ausgenommen, da dieser mit Führung nicht sinnvoll erscheint. Zusätzlich wurde noch ein um 90° nach hinten geneigter Aufprall simuliert. Falls der Aufprall direkt auf den Rücken auch in einem zukünftigen Protektortest eine Rolle spielen soll, dann ist auch für diesen Fall die Vergleichbarkeit der Ergebnisse bei freier und geführter Bewegung relevant. Bei der bisherigen Protektortestkonfiguration lässt sich ein ähnliches Verhalten zwischen freier und geführter Bewegung vermuten, bei einem seitlichen Aufprall erscheint dies jedoch nicht mehr so sicher. Der Vergleich der jeweiligen Simulationen soll darüber Aufschluss geben. Die Aufprallgeschwindigkeit wurde bei diesen Vergleichen mit 4.81 m/s gewählt. Bei der freien Bewegung wird sich durch Verdrehung die Belastung auf die verschiedenen Richtungen anders aufteilen als bei der geführten. Bei richtungsabhängigen Grenzwerten könnte dies auch etwas ausmachen.

5.7.1 Ergebnisse

In Abbildung 5.8 ist beispielhaft ein Vergleich der freien und geführten Bewegung für den um 70° zur Seite abgeknickten Lastfall zu sehen. Man sieht, dass der Beschleunigungsverlauf sehr ähnlich ist. In diesem Fall ist die Amplitude in y-Richtung beim gesperrten Modell etwas höher, die in z-Richtung eine Spur niedriger. Bei der freien Bewegung erfolgt der Anstieg zeitlich ein wenig früher. Tabelle 5.4 zeigt die aus den Beschleunigungen gewonnenen DR-Werte, hier ist der Unterschied in y-Richtung sehr groß. Die Ergebnisse der weiteren für diesen Vergleich durchgeführten Simulationen folgen in Anhang B.

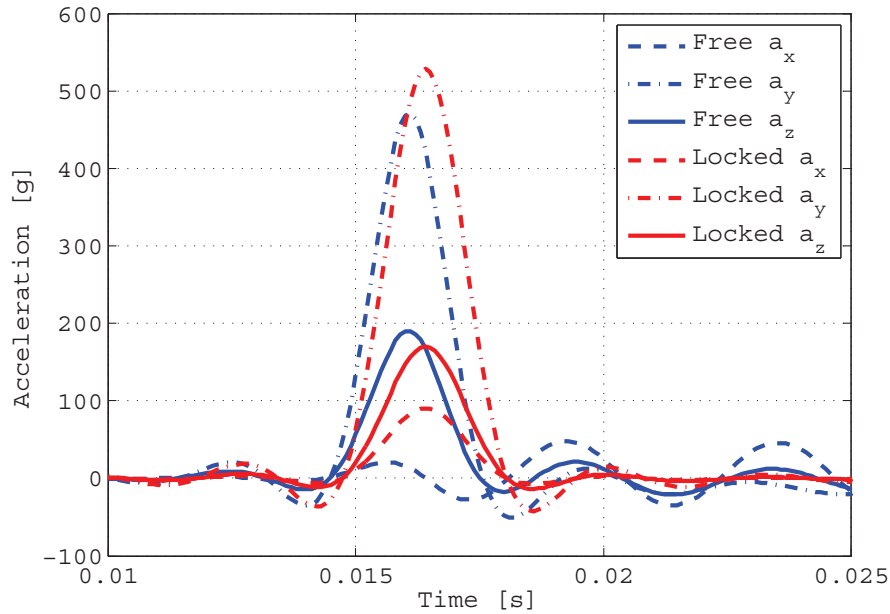


Abbildung 5.8: Vergleich Simulation Seitlich 70° , freie und geführte Bewegung

5.7.2 Diskussion

Es wurde für die vorher beschriebenen Konfigurationen ein Vergleich zwischen freier und geführter Bewegung durchgeführt. Dazu wurden sowohl die Beschleunigungen als auch die resultierenden DR-Werte verglichen. Die jeweils auftretenden Belastungen waren unabhängig von der gewählten Konfiguration immer ungefähr in der gleichen Größenordnung für freie und geführte Bewegung. Die neben den maximalen Beschleunigungen in Tabelle 5.4 dargestellten DR-Werte sind sehr unterschiedlich. Die Einwirkdauer der Beschleunigung bei der geführten Bewegung ist etwas höher. Der DR ist in y-Richtung aber sehr viel größer, was nicht ganz nachvollziehbar ist. Bei der geführten Bewegung fielen die Amplituden tendenziell etwas höher aus. Höhere Beschleunigungen bei der geführten Bewegung sind auch zu erwarten, da hier sämtliche Gelenke gesperrt sind und deshalb die gesamte Masse zeitgleich verzögert werden muss. Bei frei beweglichen Gelenken wird ein Teil der Energie dafür aufgewendet, die Gliedmaßen in Rotation zu versetzen und diese werden auch nicht zwangsweise gleich schnell wie der Rumpf verzögert. Der relevante Erstaufprall fällt so etwas weniger stark aus. Eine Durchführung der Versuche mit Führung ist wesentlich einfacher möglich und vor allem viel besser wiederholbar.

Kapitel 6

Unfallsimulationen unter Verwendung verschiedener Protektorkonfigurationen

Mit Hilfe eines validierten numerischen Modells sollen verschiedene Lastfälle und mögliche Verbesserungen des Protektors in realen Unfallkonfigurationen untersucht werden.

6.1 Simulationskonfigurationen

Um die Anzahl der Simulationen zu begrenzen, wurden die in Abschnitt 3.3 beschriebenen Unfallkonstellationen mit einer Aufprallgeschwindigkeit von 4.81 m/s nachgebildet. Dabei kam das unmodifizierte und validierte Modell zur Anwendung. Anhand der Ergebnisse sollte die Anzahl der Lastfälle eingeschränkt werden. Für den untersuchten Protektor waren die Ergebnisse für die Lage wie beim vorgeschriebenen Protektortest (28° nach hinten geneigt) und für den um 45° nach hinten geneigten Lastfall recht ähnlich. Wenn man den Protektor betrachtet, kann man erkennen, dass in beiden Fällen aufgrund der Protektorform der Aufprall im dicksten Bereich erfolgt. Von diesen beiden Lastfällen soll in weiterer Folge nur der 28° -Test berücksichtigt werden.

Bei der Validierung mit den ADAC-Tests wurde festgestellt, dass bei Schräglagen um 45° die Übereinstimmung der Simulation mit der Realität nicht einwandfrei gewährleistet werden kann. Deshalb soll die stärkere Schrägstellung von 70° weiter untersucht werden. Bei dieser starken Schräglage hat der Rückenprotektor kaum mehr einen Einfluss, es wird hauptsächlich der Seitenprotektor belastet.

Als dritter Lastfall wird der Aufprall um 10° nach vorne geneigt beibehalten. Dieser wird einmal mit rein senkrechter und einmal mit zusätzlicher horizontaler Geschwindigkeit simuliert. So sollen auch die Belastungen für den

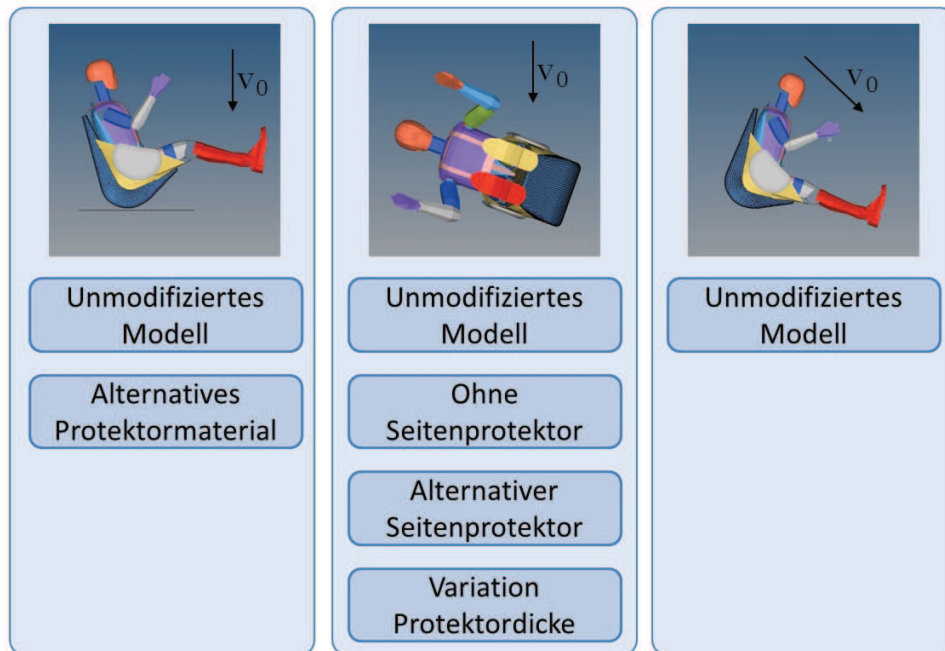


Abbildung 6.1: Simulationskonfigurationen für die Parameterstudie

ungünstigen Fall einer insgesamt höheren Geschwindigkeit ermittelt werden. Bei dieser Konfiguration liegen die Oberschenkel nicht wie sonst am Sitzbrett auf, sondern sind etwas nach oben gehoben. In ersten Simulationen wurde dies noch nicht so ausgeführt. Der Aufprall erfolgte zuerst mit der Unterseite des Oberschenkels direkt auf den Boden. Diese beiden Komponenten sind im Modell als Starrkörper ausgeführt. Beim Aufprall entstanden große Schwingungen in den Beschleunigungssignalen. Durch das Anheben der Beine wird dies nun verhindert. Dies erscheint auch zulässig, da nicht zu erwarten ist, dass der Aufprall mit den Beinen wesentlich Energie dissipiert.

Abbildung 6.1 zeigt eine Übersicht der Simulationskonfigurationen. Wenn nicht anders für eine bestimmte Situation beschrieben, wurde die Aufprallgeschwindigkeit jeweils mit 4.81 m/s , 6.8 m/s , 8 m/s und 14 m/s variiert.

6.1.1 Vorschlag Seitenprotector

Aus den Unfallbefragungen und -videos geht hervor, dass ein Seitenaufprall durchaus relevant ist. Deshalb soll untersucht werden, welchen Effekt ein stärker dimensionierter Seitenprotector hat. Wie dieser im Detail ausgeführt wird, spielt für diese Untersuchungen noch keine Rolle. Die Verzögerungswerte beim Protektortest von Staudruckairbags und Schaumstoffprotektoren liegen in der gleichen Größenordnung, die Simulationen sollten also für beide Systeme repräsentative Werte liefern. Natürlich wäre wie beim Rückenpro-

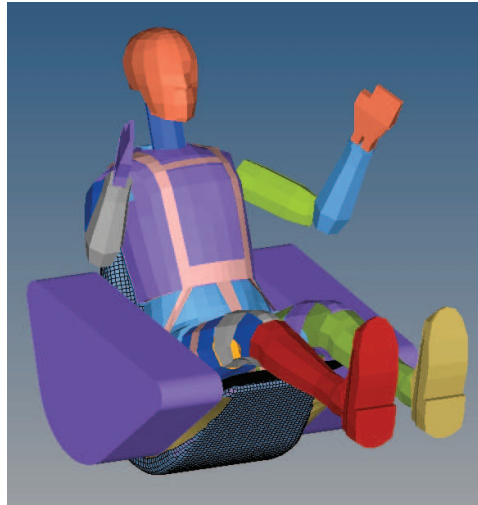


Abbildung 6.2: Entwurf eines dickeren Seitenprotectors

tektor ein möglichst dicker und großflächiger Schutz wünschenswert. Für den Entwurf wurde eine Geometrie gewählt, die den Seitenbereich relativ großflächig abdeckt. Der Entwurf für den Seitenprotector ist in Abbildung 6.2 dargestellt. Er weist eine Dicke von 17 cm auf. Zur Veranschaulichung der Auswirkungen der Seitenprotectorstärke wird bei einer Aufprallgeschwindigkeit von 4.81 m/s die Seitenprotectorstärke von 5 cm bis 17 cm variiert. Der Seitenprotector wird mit dem gleichen Material wie der Rückenprotector ausgeführt. Eine zusätzliche Simulation wird ohne Seitenprotector ebenfalls mit einer Geschwindigkeit von 4.81 m/s durchgeführt. Dies soll Aufschluss über die Schutzwirkung des derzeitigen Seitenprotectors bringen.

Abschätzung der Widerstandserhöhung durch den dickeren Seitenprotector

Die verwendete Form ergibt eine projizierte Fläche von $A_{\text{projiziert}} = 0.17\text{ m} * 0.406\text{ m} * 2 = 0.138\text{ m}^2$. Die projizierte Fläche von Pilot und Leinen beträgt etwa 1 m^2 [13, S. 53]. Unter der Annahme eines konstanten Luftwiderstandsbeiwertes führt dies folglich zu einer Erhöhung des Luftwiderstands von rund 14%. Der am Schirm induzierte Widerstand und der Widerstand durch die Leinen ändern sich nicht. Wie groß im Endeffekt die Unterschiede im Flug tatsächlich sind, könnte entweder durch Untersuchungen im Windkanal geklärt werden oder durch Testflüge mit einem entsprechend ausgerüsteten Gurtzeug.

6.1.2 Alternatives Material für Rückenprotector

Die Dehnungs-Druck-Kurven im Materialmodell wurden so angepasst, dass sie einen schnellen Anstieg aufweisen und dann auf einem konstanten Niveau bleiben. Dieses wird dann bis zu einer relativ großen Dehnung gehalten. Am Ende erfolgt wieder ein starker Anstieg um die vollständige Verdichtung des Materials zu simulieren. Es wurde versucht, mit dem Schaum die idealisierten Verzögerungskurven aus Abschnitt 7.4 möglichst gut zu erreichen. Bei der höheren Geschwindigkeit von 14 m/s reichen die Verzögerungswerte dieses Schaums nicht mehr aus, um den Piloten gleichmäßig über den zur Verfügung stehenden Weg abzubremesen. Für diesen Lastfall werden deshalb die Parameter angepasst. Es ist eine konstante Verzögerung von etwa 100 g über einen Zeitraum von 14 ms erforderlich.

Mit sogenannten Honeycomb-Materialien lassen sich zum Beispiel solche Beschleunigungsverläufe erzielen. Diese sind jedoch stark anisotrop. Es gibt auch Schäume mit einem ähnlichen Verhalten, bei diesen unabhängig von der Belastungsrichtung. Im Falle einer praktischen Umsetzung müssten natürlich noch viele weitere Kriterien berücksichtigt werden. Es spielen dann zum Beispiel auch Packmaß, Gewicht oder Kosten eine Rolle.

6.2 Senkrechter Aufprall in der Lage wie beim Protortest

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Protortestkonfiguration für die entsprechenden Konfigurationen dargestellt. Das Beschleunigungssignal wurde mit einem SAE-180 Filter gefiltert.

6.2.1 Geschwindigkeitsvariation

In Abbildung 6.3 sind die Beschleunigungsverläufe für die Geschwindigkeitsvariationen mit dem Rückenprotector von Skywalk dargestellt. Mit steigender Aufprallgeschwindigkeit nehmen klarerweise auch die Amplituden der Beschleunigungen zu. Der Anstieg der Beschleunigung erfolgt steiler, dies ist zum einen auf die Dehnratenabhängigkeit des Materials zurückzuführen. Zum anderen kommt es bei höheren Geschwindigkeiten zu schnelleren Verformungen und auch dadurch steigt die Kraft schneller an. Somit erklärt sich die immer kürzer werdende Dauer der Belastung mit steigender Geschwindigkeit. Gemäß der Lage im Raum bei dieser Unfallsituation sind hier die auftretenden Beschleunigungen in z -Richtung am höchsten. Die aus den auftretenden Beschleunigungen resultierenden DR-Werte sind in Tabelle 6.1 dargestellt.

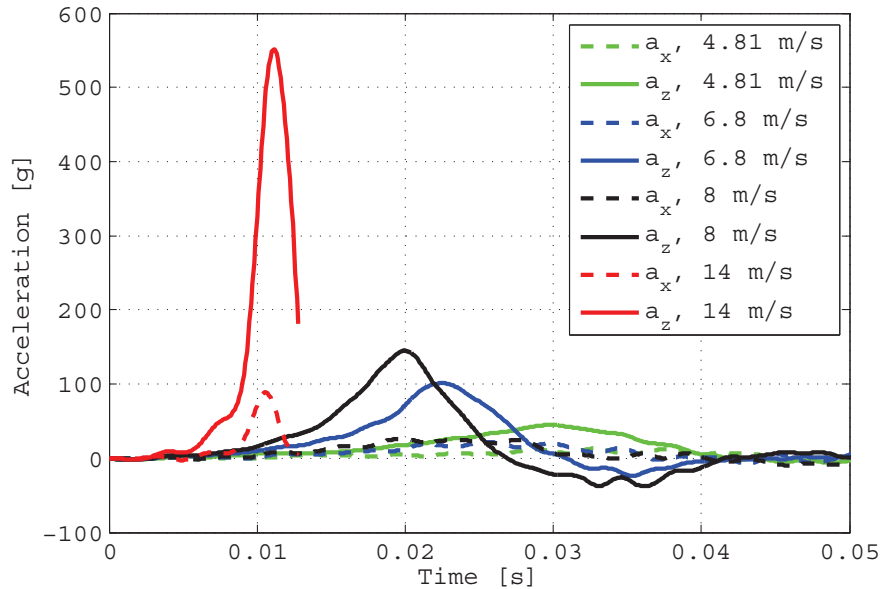


Abbildung 6.3: Ergebnisse Geschwindigkeitsvariation mit Skywalk Rückenprotektor

Tabelle 6.1: Ergebnisse Geschwindigkeitsvariation mit Skywalk Rückenprotektor

	$v = 4.81 \text{ m/s}$	$v = 6.8 \text{ m/s}$	$v = 8 \text{ m/s}$	$v = 14 \text{ m/s}$
DR_x	9.1	14.1	16.9	9.9
DR_z	25.2	33.9	39.1	61.9
$Max. a_x \text{ [g]}$	12.9	21.8	26.5	88.9
$Max. a_z \text{ [g]}$	45.0	101.1	145.0	551.1

6.2.2 Geschwindigkeitsvariation mit alternativem Protektormaterial

Die Simulationsergebnisse aus dem Modell mit geänderten Materialkennwerten für eine möglichst konstante Verzögerung sind in Abbildung 6.4 dargestellt. Für die Geschwindigkeiten v_1 bis v_3 wurde das gleiche Materialmodell verwendet. Der Anstieg der Aufprallgeschwindigkeit führt zu etwas höheren Beschleunigungswerten und etwas längerer Einwirkdauer. Exakt gleiche Verzögerungswerte bei den verschiedenen Geschwindigkeiten konnten nicht erreicht werden. Bei der höchsten Geschwindigkeit liegt das Beschleunigungsniveau aufgrund des geänderten Materials wesentlich höher. Die ein-

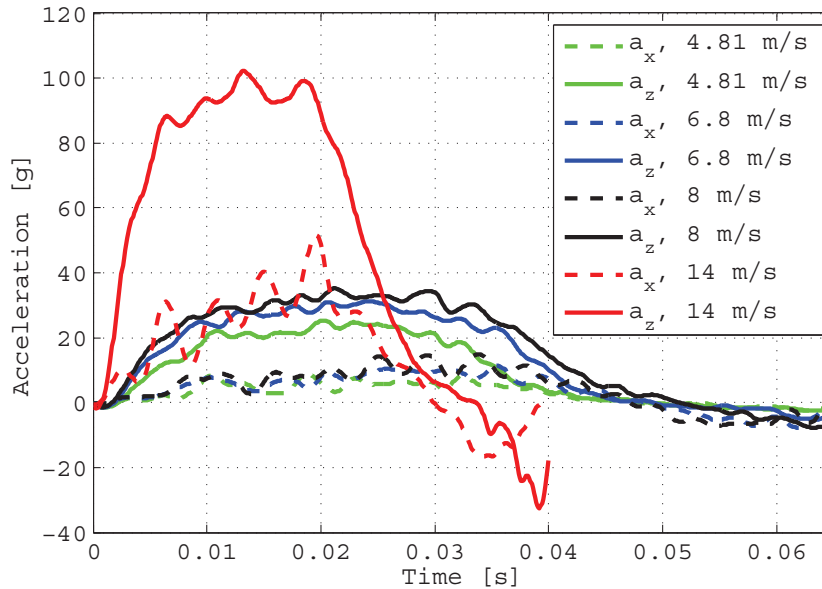


Abbildung 6.4: Ergebnisse Geschwindigkeitsvariation mit alternativem Protektormaterial

Tabelle 6.2: Ergebnisse Geschwindigkeitsvariation mit alternativem Protektormaterial

	$v = 4.81 \text{ m/s}$	$v = 6.8 \text{ m/s}$	$v = 8 \text{ m/s}$	$v = 14 \text{ m/s}$
DR_x	7.4	10.9	13.2	28.1
DR_z	22.5	30.9	35.8	72.1
$Max. a_x \text{ [g]}$	9.2	11.3	15.0	51.5
$Max. a_z \text{ [g]}$	25.3	31.3	35.2	102.2

wirkenden Beschleunigungen sind für alle Geschwindigkeiten über der Einwirkdauer, wie mit dieser Konfiguration gewünscht, relativ konstant. Bei den DR-Werten, zu sehen in Tabelle 6.2, ist durchwegs ein Anstieg mit steigender Geschwindigkeit zu beobachten.

6.2.3 Diskussion der Ergebnisse

Der Vergleich der Resultate mit verschiedenen Materialien für den Rückenprotektor zeigt das Potential, das hier steckt. Beim bisherigen Material sind schon bei moderaten Aufprallgeschwindigkeiten relativ hohe Beschleunigungen, wenn auch klarerweise bei kleiner Einwirkdauer, zu erwarten. Wie man

beim alternativen Material sieht, können mit dem zur Verfügung stehenden Bremsweg selbst bei höheren Geschwindigkeiten noch relativ moderate Beschleunigungswerte erzielt werden. Um die höchste untersuchte Geschwindigkeit von 14 m/s mit einer Beschleunigung auf gleichem Niveau abzubremsen, wäre jedoch mehr Deformationsweg erforderlich. Die DR-Werte für das alternative Material fallen auch kleiner aus. Nur bei der höchsten Geschwindigkeit ist es umgekehrt. Ob wirklich die kurze hohe Belastung besser ertragen werden kann als die niedrigere für eine längere Einwirkdauer, ist in Frage zu stellen, da die auftretende Beschleunigung von über 400 g schon recht hoch erscheint.

Die Beschleunigung für den Skywalk Rückenprotektor mit der höchsten Aufprallgeschwindigkeit ist abgeschnitten. An dieser Stelle wurde die Simulation mit einem sogenannten „Negative Volume“-Fehler abgebrochen. Dieser kann bei Verwendung von weichen Materialien, wie hier dem Schaumstoff für den Protektor und hohen Verformungen auftreten. Es kommt zu einer so großen Verformung eines Elements, dass für dieses ein negatives Volumen berechnet wird. Unter anderem könnte eine Versteifung des Materials bei hohen Verformungen Abhilfe schaffen. Da jedoch der für die Bewertung interessante Erstaufprall zum Zeitpunkt des Abbruchs bereits größtenteils erfolgt ist, wird darauf verzichtet. So wird auch vermieden, dass für eine einzelne Simulation ein geändertes Materialmodell Verwendung findet.

6.3 Seitenaufprall

Beim Seitenaufprall mit einer Neigung von 70° ist die Beschleunigung in y -Richtung am größten. Daneben treten auch in x - und z -Richtung Belastungen auf. In den Abbildungen 6.5 und 6.8 ist hier für mehr Übersichtlichkeit nur die y - und z -Richtung eingezeichnet, in den Abbildungen 6.6 und 6.7 nur die y -Richtung. Die DR-Werte sind jedoch für alle drei Richtungen angegeben.

6.3.1 Geschwindigkeitsvariation mit unmodifiziertem Seitenprotektor

Wegen des dünneren Protektors kommt es beim Seitenaufprall zu höheren Beschleunigungen bei kürzerer Einwirkdauer. Die vorher erklärten Effekte eines schnelleren Anstiegs mit Erhöhung der Aufprallgeschwindigkeit sind jedoch prinzipiell die gleichen. Die Ergebnisse für diese Konfiguration sind in Abbildung 6.5 und in Tabelle 6.3 dargestellt.

6.3.2 Geschwindigkeitsvariation mit Seitenprotektorentwurf

Die in Abbildung 6.6 dargestellten Beschleunigungen für den dickeren Seitenprotektor zeigen, gegenüber den Ergebnissen mit dem Protektor von

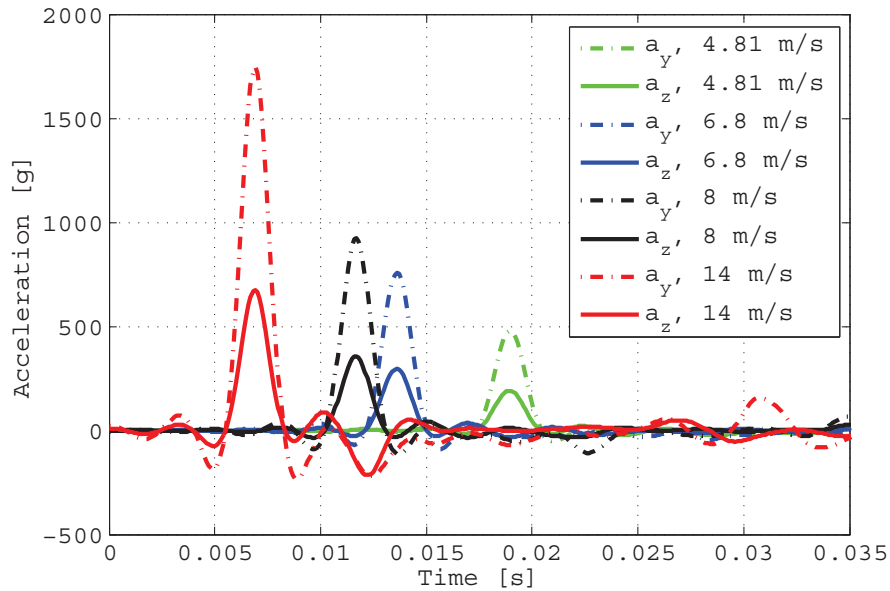


Abbildung 6.5: Ergebnisse Geschwindigkeitsvariation mit unmodifiziertem Seitenprotector

Tabelle 6.3: Ergebnisse Geschwindigkeitsvariation mit unmodifiziertem Seitenprotector

	$v = 4.81 \text{ m/s}$	$v = 6.8 \text{ m/s}$	$v = 8 \text{ m/s}$	$v = 14 \text{ m/s}$
DR_x	3.8	8.3	5.1	13.6
DR_y	35.8	50.7	56.8	93.0
DR_z	9.4	15.0	18.7	31.8
$Max. a_x \text{ [g]}$	48.1	75.7	89.9	168.1
$Max. a_y \text{ [g]}$	479.7	760.2	929.2	1750.2
$Max. a_z \text{ [g]}$	192.5	297.4	358.0	676.7

Skywalk, längere Einwirkdauer der Beschleunigungen bei geringeren Amplituden. Betrachtet man die DR-Werte in Tabelle 6.4, so sind diese jedoch größtenteils höher als vorher.

6.3.3 Variation der Seitenprotectordicke

Bei Variation der Dicke des Seitenprotectors bei einer Aufprallgeschwindigkeit von 4.81 m/s sinkt zwar die Einwirkdauer mit Abnahme der Dicke

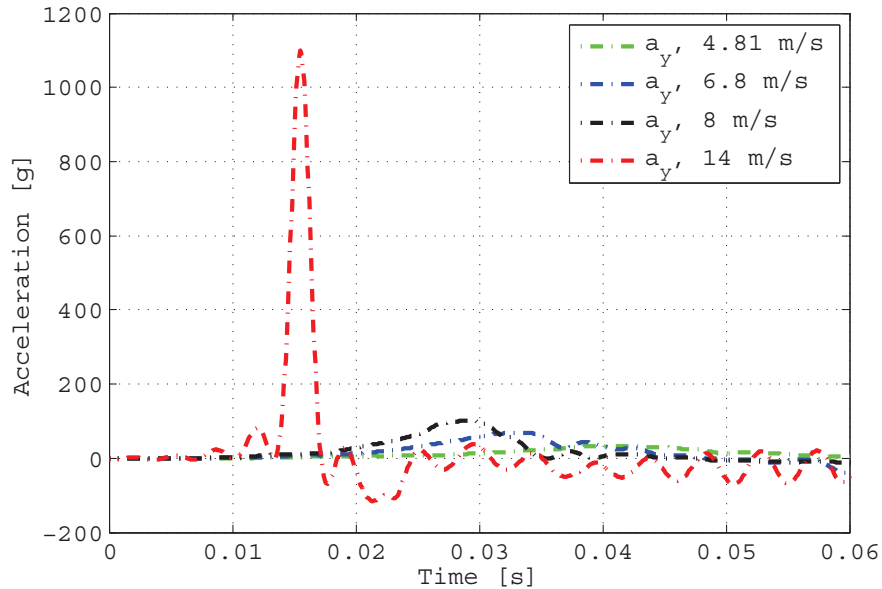


Abbildung 6.6: Ergebnisse Geschwindigkeitsvariation mit Seitenprotector-entwurf

Tabelle 6.4: Ergebnisse Geschwindigkeitsvariation mit Seitenprotectorentwurf

	$v = 4.81 \text{ m/s}$	$v = 6.8 \text{ m/s}$	$v = 8 \text{ m/s}$	$v = 14 \text{ m/s}$
DR_x	3.3	5.0	6.2	12.1
DR_y	36.5	56.4	63.8	100.0
DR_z	12.2	18.2	22.6	40.0
$Max. a_x$ [g]	6.4	10.7	14.1	118.7
$Max. a_y$ [g]	33.1	69.2	101.3	1098.3
$Max. a_z$ [g]	14.0	27.9	43.5	471.5

stark, die Höhe der auftretenden Beschleunigung steigt jedoch ebenso stark an (Abbildung 6.7). Bei den DR- Werten in Tabelle 6.5 fällt auf, dass diese in y- und z-Richtung für die dünner werdenden Protectors ab einer Dicke von 13 cm relativ gleich bleiben bzw. sogar wieder abnehmen. Für den Seitenprotector wurden hier die Materialkennwerte des Rückenprotectors, welcher mit einer Dicke von 17 cm validiert wurde, verwendet. Bei geringeren Schaumdicken könnte das Materialverhalten durchaus anders sein. Für genauere Untersuchungen müsste man hier die verschiedenen Dicken einzeln

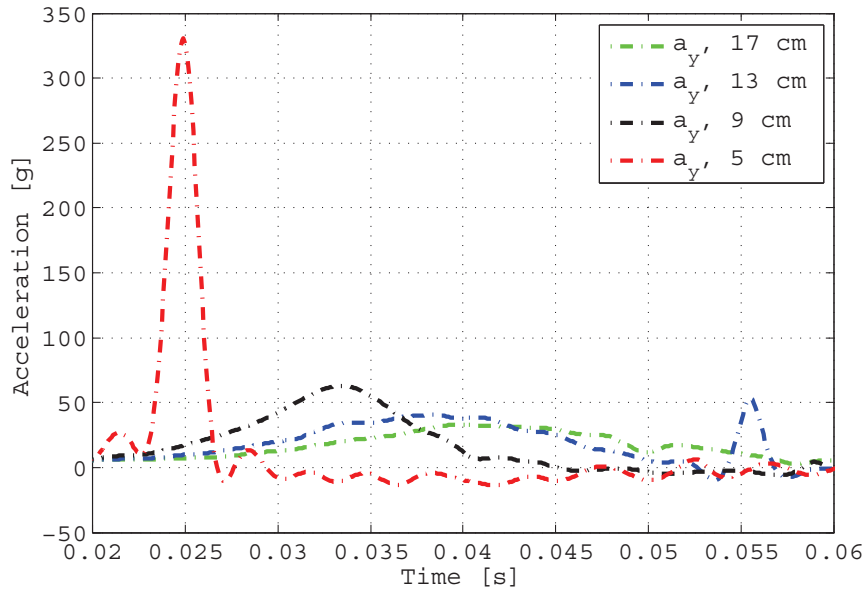


Abbildung 6.7: Ergebnisse Variation der Seitenprotektordicke

Tabelle 6.5: Ergebnisse Variation der Seitenprotektordicke

	$s = 17 \text{ cm}$	$s = 13 \text{ cm}$	$s = 9 \text{ cm}$	$s = 5 \text{ cm}$
DR_x	3.3	3.6	2.7	2.6
DR_y	36.5	40.3	38.8	36.6
DR_z	12.2	12.6	12.8	10.8
$Max. a_x$ [g]	6.4	14.5	12.0	27.0
$Max. a_y$ [g]	33.1	53.7	62.9	330.6
$Max. a_z$ [g]	14.0	16.5	25.7	132.1

validieren.

6.3.4 Seitenaufprall ohne Seitenprotektor

Abbildung 6.8 zeigt für den Aufprall ohne Seitenprotektor höhere Beschleunigungen. Bei den DR-Werten, dargestellt in Tabelle 6.6, sind jedoch kaum Unterschiede in den Ergebnissen mit und ohne Seitenprotektor vorhanden.

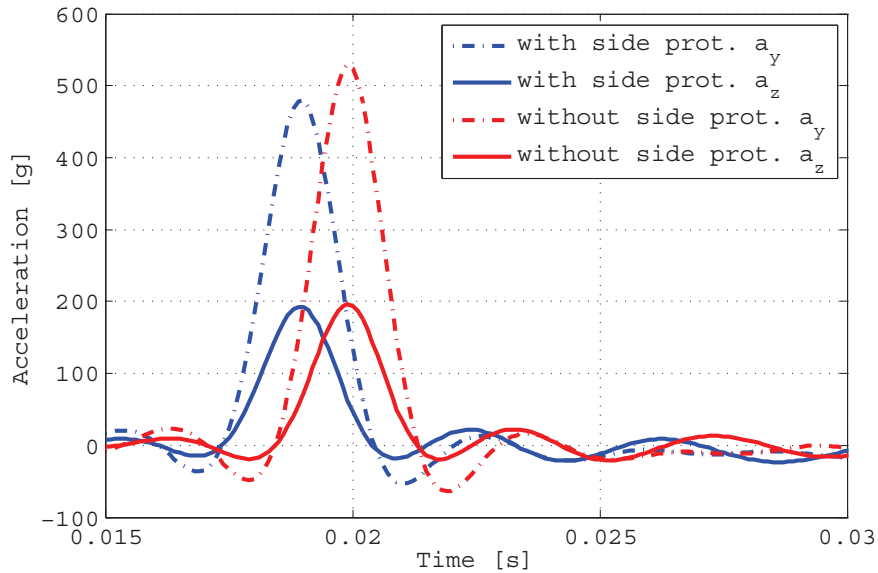


Abbildung 6.8: Vergleich mit und ohne Seitenprotector

Tabelle 6.6: Vergleich mit und ohne Seitenprotector

	<i>mit Seitenprotector</i>	<i>ohne Seitenprotector</i>
DR_x	3.8	4.0
DR_y	35.8	36.3
DR_z	9.4	9.7
$Max. a_x$ [g]	48.1	45.3
$Max. a_y$ [g]	479.7	529.1
$Max. a_z$ [g]	192.5	196.0

6.3.5 Diskussion der Ergebnisse

Vergleicht man das unmodifizierte mit dem modifizierten Modell, ließen sich durch die zusätzliche Dicke die maximalen Beschleunigungen stark reduzieren. Auch die Ergebnisse für die Beschleunigung bei Variation der Seitenprotectordicke entsprechen den Erwartungen. Je mehr Weg zum Abbremsen zur Verfügung steht, desto länger auch die hierfür verstreichende Zeit und desto geringer die erforderliche Beschleunigung. Ohne Seitenprotector erhält man klarerweise die höchste Beschleunigung, denn für die Geschwindigkeitsänderung steht hier kaum ein Weg zur Verfügung. Gegenüber dem unmodifizierten Seitenprotector zeigt sich ein deutlicher Unterschied. Durch dicke-

ren Schutz könnten die auftretenden maximalen Beschleunigungen nochmals erheblich gesenkt werden, wie die Simulationen für den Seitenprotektorvorschlag zeigen.

Bei den DR-Werten ist für den unmodifizierten sowie für den unmodifizierten Seitenprotektor ein Anstieg mit steigender Geschwindigkeit eingetreten. Für die Aufprallgeschwindigkeit von 4.81 m/s schneidet der Seitenprotektorenwurf mit einer Stärke von 17 cm am besten ab. Bei Erhöhung der Geschwindigkeit dreht sich dies jedoch um. Die Beschleunigungen sind beim dicken Protektor zwar wesentlich kleiner, die Einwirkdauer aber länger. Dies bedeutet nicht unbedingt, dass der dünnere Protektor hier eine bessere Schutzwirkung bietet. Es ist auch die Anwendbarkeit des DR-Modells zu hinterfragen, insbesondere wenn die Einwirkdauer der Beschleunigung sehr kurz wird. Auch die höheren Beschleunigungen aus der Simulation ohne Seitenprotektor führen, wohl aufgrund der extrem kurzen Einwirkdauer, zu fast gleichen DR-Werten wie mit Seitenprotektor. Generell liegt der DR-Wert beim Seitenaufprall in y -Richtung selbst beim dicken Protektor bei der geringsten Geschwindigkeit schon weit über dem Grenzwert, der für ein hohes Verletzungsrisiko angegeben wird. Wie in Tabelle 4.2 ersichtlich, liegt dieser bei 22.

Ein Vergleich der verschiedenen Protektorkonfigurationen zeigt Folgendes: Beim dicken Seitenprotektor wirkt eine maximale resultierende Beschleunigung von 36.5 g , wobei für rund 30 ms eine Beschleunigung von 10 g überschritten wird. Für den unmodifizierten Seitenprotektor kommt man auf maximal 479.7 g , die Zeitdauer mit Beschleunigung von über 10 g beträgt dabei nur 3.5 ms . Ohne Seitenprotektor erhält man 529.1 g maximal, aber nur mehr eine Zeitspanne von 3.0 ms mit über 10 g Beschleunigung. Die zugehörigen DR-Werte liegen sehr eng beieinander. Dass diese Belastungen auf den menschlichen Körper tatsächlich die gleiche Auswirkung haben, ist zu bezweifeln. Vom dünnen Protektor kann man keine Wunder erwarten, es fehlt der Weg, um die Geschwindigkeit mit einem moderaten Beschleunigungsniveau abzubremesen.

6.4 Nach vorne geneigter Aufprall

6.4.1 Ohne horizontale Geschwindigkeit

Im Gegensatz zu den anderen Lastfällen erfolgt aufgrund der Lage des Körpers hier die Beschleunigung der x -Richtung in negativer Richtung. Auch die zugehörigen DR-Werte sind deshalb negativ. Hier treten wieder, wie beim Rückenprotektortest, nur in x - und z -Richtung relevante Werte auf, die y -Richtung ist daher in Abbildung 6.9 und bei den DR-Werten in Tabelle 6.7 nicht dargestellt.

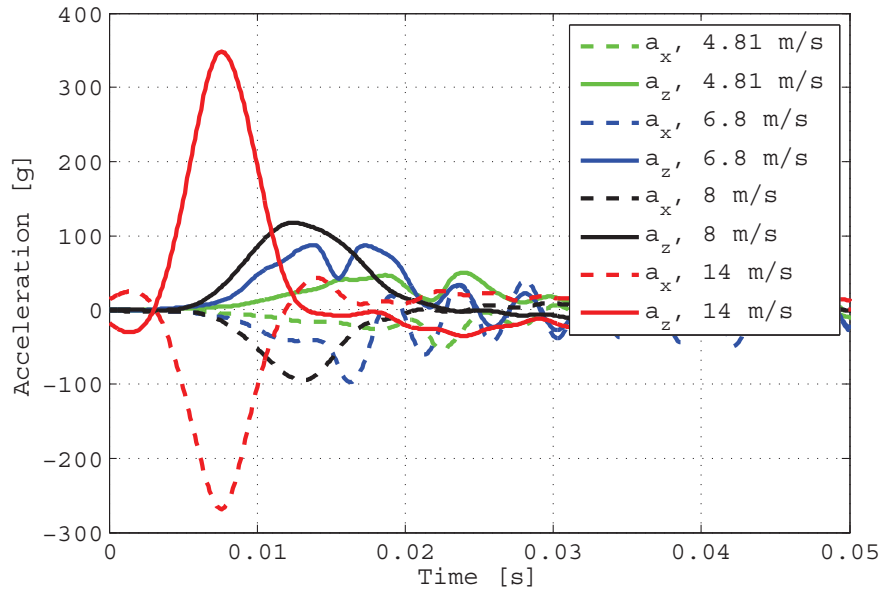


Abbildung 6.9: Ergebnisse Geschwindigkeitsvariation nach vorne geneigter Aufprall ohne horizontale Geschwindigkeit

Tabelle 6.7: Ergebnisse Geschwindigkeitsvariation nach vorne geneigter Aufprall ohne horizontale Geschwindigkeit

	$v = 4.81 \text{ m/s}$	$v = 6.8 \text{ m/s}$	$v = 8 \text{ m/s}$	$v = 14 \text{ m/s}$
DR_x	-18.4	-25.6	-28.7	-44.7
DR_z	23.1	32.0	37.2	59.2
$Min. a_x \text{ [g]}$	-53.5	-97.3	-94.9	-268.5
$Max. a_z \text{ [g]}$	50.1	87.6	117.6	348.1

6.4.2 Mit horizontaler Geschwindigkeit

Die Ergebnisse dieser Konfiguration sind in Abbildung 6.10 bzw. Tabelle 6.8 zu sehen. Zwischen den verschiedenen Geschwindigkeiten sind hier die Unterschiede, aufgrund geringerer Differenz der resultierenden Geschwindigkeit, nicht so deutlich ausgeprägt. Gegenüber dem Aufprall mit rein vertikaler Geschwindigkeit sind die auftretenden Beschleunigungen in x- und in z-Richtung deutlich höher.

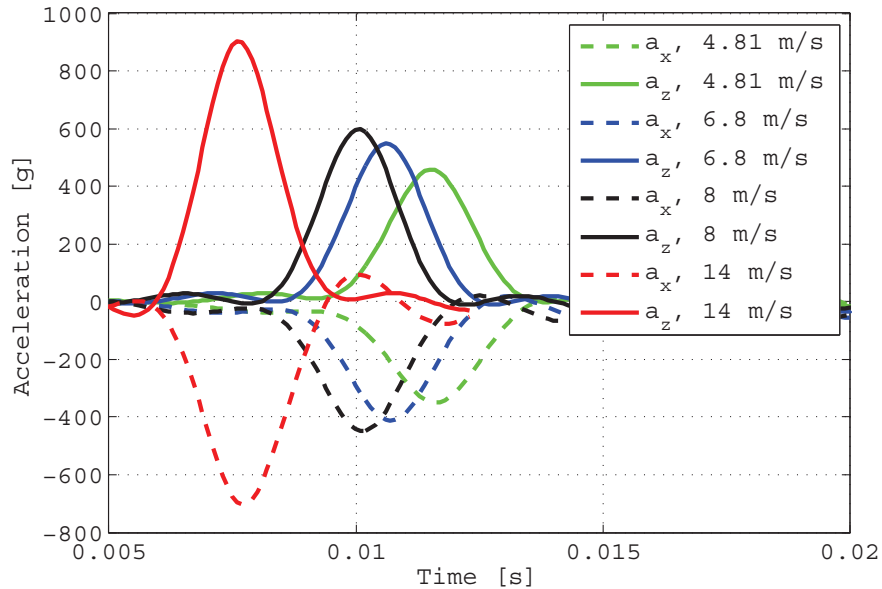


Abbildung 6.10: Ergebnisse Geschwindigkeitsvariation nach vorne geneigter Aufprall mit horizontaler Geschwindigkeit

Tabelle 6.8: Ergebnisse Geschwindigkeitsvariation nach vorne geneigter Aufprall mit horizontaler Geschwindigkeit

	$v = 4.81 \text{ m/s}$	$v = 6.8 \text{ m/s}$	$v = 8 \text{ m/s}$	$v = 14 \text{ m/s}$
DR_x	-41.2	-42.6	-44.8	-62.7
DR_z	33.7	36.3	38.0	62.1
$Min. a_x \text{ [g]}$	-350.8	-412.5	-447.8	-703.2
$Max. a_z \text{ [g]}$	457.9	548.9	596.9	902.0

6.4.3 Diskussion der Ergebnisse

Mit der überlagerten Geschwindigkeit in horizontaler Richtung ergibt sich schon für die geringste Sinkgeschwindigkeit eine resultierende Geschwindigkeit von 11.1 m/s , die kinetische Energie beträgt somit mehr als das fünffache als bei rein vertikaler Geschwindigkeit. Im Gegensatz zu den anderen Lastfällen treten hier gleichzeitig sehr hohe Beschleunigungen in zwei verschiedene Richtungen auf. Dass sich mit der horizontalen Geschwindigkeit auch die Beschleunigung in z-Richtung erhöht, kommt dadurch zustande, dass der Dummy nach vorne rutscht bzw. der Protektor verzerrt wird. Die Belastung erfolgt somit in einem Bereich, wo der Protektor schon deutlich

dünnere ist. Durch die Form des Protektors besteht hier für den Piloten nur ein recht mäßiger Schutz. Eine Verbesserung könnte eine weniger starke Verjüngung des Protektors bringen. Gleiches gilt auch nach oben hin für den Rückenprotektor, für den Fall eines Aufpralls direkt auf den Rücken.

Bei der Konfiguration ohne horizontale Geschwindigkeit sind die Beschleunigungen ähnlich hoch wie bei der Protektortestkonfiguration. Trotz der Neigung nach vorne erfolgt der Aufprall in einem Bereich, wo der Protektor noch fast seine maximale Dicke aufweist.

Wie in Abschnitt 3.3 beschrieben geht aus den Unfallfragebögen nicht gut hervor, wie relevant der nach vorne geneigte Lastfall ist. In Videos wurde die Kombination aus horizontaler und vertikaler Geschwindigkeit öfters beobachtet, teilweise mit Neigung nach vorne. Wenn man den Rettungsschirm beispielsweise im Brustbereich des Piloten anstatt unter dem Sitzbrett anbringt, könnte man den Protektor in entsprechender Dicke problemlos weiter nach vorne ziehen. Die in Flugrichtung projizierende Fläche und damit auch der Luftwiderstand würden sich dadurch kaum ändern. Auch das zusätzliche Gewicht wäre nicht sehr groß.

Kapitel 7

Vorschläge für Änderungen des Protektortests

In den vorherigen Kapiteln wurden relevante Lastfälle ermittelt und der Einfluss der Führung bei der Protektorprüfung mit Hilfe des erstellten Simulationsmodells analysiert. Außerdem wurden verschiedene Realunfallszenarien in Simulationen nachgestellt und die auftretenden Belastungen untersucht. Nun soll ein Vorschlag erarbeitet werden, wie die gewonnenen Erkenntnisse in einem abgeänderten Protekortest umgesetzt werden könnten.

7.1 Masse des Prüfkörpers und Aufprallgeschwindigkeit

Die Masse des Prüfkörpers bei der Musterprüfung beträgt 50 kg . Von den Gleitschirmpiloten, welche beim DHV Mitglied sind, sind etwa 90% männlich [22]. Laut einer aktuellen Studie beträgt der Median des Körpergewichts von Männern zwischen 18 und 79 Jahren in Deutschland 83.8 kg , für Frauen beträgt er 68 kg [19]. Sinnvoll wäre, je nach Größe des Gurtzeugs das Gewicht des Fallkörpers vorzugeben. Bei den weiteren Überlegungen wird eine Masse des Piloten von 80 kg und für das Gurtzeug eine Masse von 5 kg angenommen. Die Masse fließt linear in die kinetische Energie ein. Um die gleiche kinetische Energie wie bei der derzeitigen Protektorprüfung mit einer Gesamtmasse von 85 kg anstatt von 55 kg zu erreichen, ist schon eine Fallhöhe von 0.76 m ausreichend.

In den Prüfberichten des DHV wird die Minimalgeschwindigkeit beim Aufprall mit 4.81 m/s angegeben, was einer effektiven Fallhöhe von 1.18 m im Freifall entspricht. Der Median für die senkrechte Aufprallgeschwindigkeit aus der Videoanalyse beträgt aber 7.6 m/s , das 75%-Quantil 8.7 m/s . Als neue Aufprallgeschwindigkeit beim Test werden 8 m/s vorgeschlagen. Für die Ermittlung der Geschwindigkeiten standen nicht sehr umfassende Daten zur Verfügung. Wenn zu einem späteren Zeitpunkt entsprechende Daten zur

Verfügung stehen, könnte man die Geschwindigkeit für jedes Aufprallszenario anhand statistisch abgesicherter Werte extra festlegen. Die Geschwindigkeit geht quadratisch in die kinetische Energie ein. Eine Aufprallgeschwindigkeit von 8 m/s entspricht einer Fallhöhe von rund 3.3 m im freien Fall. Vergleicht man die kinetische Energie bei der Musterprüfung unter der Annahme einer Geschwindigkeit von 8 m/s und einer Masse von 85 kg für Gurtzeug und Pilot mit der Energie bei 4.81 m/s und 55 kg , so beträgt diese mehr als das Vierfache. Beide Parameter müssten also deutlich erhöht werden, um die Realität abzubilden.

7.2 Führung des Prüfkörpers

In Abschnitt 5.7 erfolgte ein Vergleich zwischen freier und geführter Bewegung für die verschiedenen Lastfälle. Der Protektortest soll einerseits auftretende Unfälle möglichst breit abdecken. Andererseits muss aber auch eine gute Wiederholbarkeit gewährleistet werden. Diese Wiederholbarkeit lässt sich bei einer ungeführten Bewegung schwerer gewährleisten. Aufgrund der Simulationsergebnisse kann davon ausgegangen werden, dass, unabhängig vom Lastfall, mit einer Führung in senkrechter Richtung brauchbare Ergebnisse bei guter Wiederholbarkeit erzielt werden können.

Noch einfacher könnte man in der Musterprüfung anstatt des Fallkörpers den Boden, auf dem der Aufprall erfolgt, mit der gewünschten Neigung ausführen. Dies würde vielleicht für minimale Neigungen ähnliche Ergebnisse bringen. Für größere stellt dies jedoch einen ganz anderen Lastfall dar, welcher nicht den zu untersuchenden Konfigurationen entspricht.

7.3 Lage beim Aufprall

Bisher werden durch die Musterprüfung rund 50% der Unfälle bezüglich der Lage beim Aufprall abgedeckt. Um diesen Anteil auf etwa 80% zu erhöhen, wird ein neues Testverfahren mit folgenden vier Konfigurationen vorgeschlagen:

Die bisherige Konfiguration sollte beibehalten werden. Als zweiter Lastfall wird der Aufprall im vorderen Bereich des Sitzbretts vorgeschlagen. Eine zusätzliche horizontale Geschwindigkeit kann beim Test jedoch nicht so einfach nachgebildet werden, deshalb soll auch hier der Aufprall rein vertikal erfolgen. Durch diese Konfiguration könnten Unfälle beim nach vorne Pendeln des Piloten abgedeckt werden. Außerdem rutscht der Pilot im normalen Landeanflug am Sitzbrett nach vorne und richtet sich auf. Auch ein Absturz in dieser Situation wäre dadurch halbwegs abgedeckt, auch wenn der Schwerpunkt des Piloten dann eigentlich weiter vorne liegt. Wichtig wäre in beiden Fällen ein Schutz weiter vorne am Sitzbrett.

Der Seitenaufprall sollte in der Protektorprüfung ebenfalls berücksichtigt

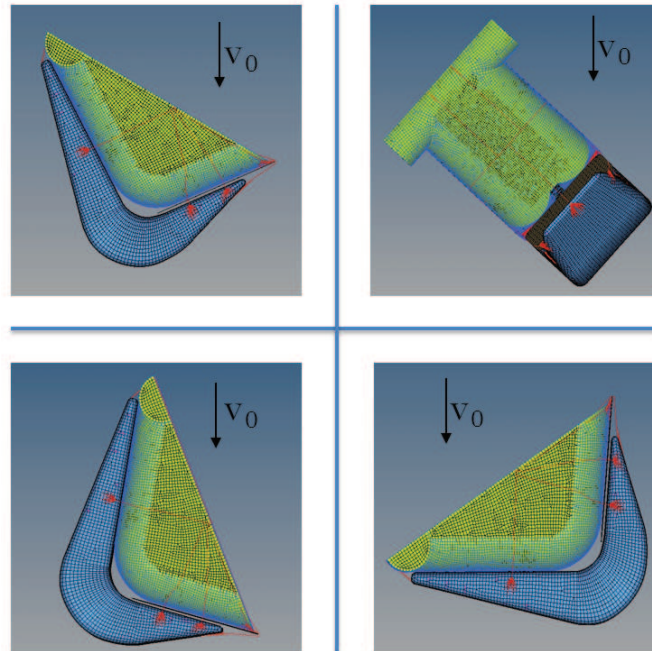


Abbildung 7.1: Vorgeschlagene Prüfkfigurationen für modifizierten Protektortest

werden. Hier wird eine Schräglage von 45° vorgeschlagen. Bei geringen Schräglagen wird der Protektor ähnlich wie im ersten Lastfall beansprucht und eine solche Prüfkfiguration würde keine Aussage zur Schutzfunktion des Seitenprotektors liefern. Bei zu großen Schräglagen besteht die Gefahr, dass Protektoren auf einen rein seitlichen Einschlag hin optimiert werden. Der Aufprall im Zwischenbereich, welcher häufiger auftritt, würde dann vielleicht vernachlässigt werden. Bei den Unfallbefragungen wurde ein Seitenaufprall bei insgesamt 23% der Unfälle genannt.

Um einen Rückenaufrall abzubilden, wird vorgeschlagen, dies mit einer Lage der Wirbelsäule parallel zum Boden zu überprüfen. Bei zu geringer Rückenlage wird der Aufprall wieder im dicksten Bereich des Protektors erfolgen und ähnliche Ergebnisse wie der erste Lastfall bringen. Der Anteil an Unfällen mit mehr als 45° nach hinten geneigtem Aufprall lag bei den Befragungen bei 6%.

Die vorgeschlagenen Prüfkfigurationen sind in Abbildung 7.1 dargestellt. In Tabelle 7.1 sind noch einmal die Eckdaten für der vorgeschlagenen erweiterten Aufprall-Prüfung zusammengefasst. Der Winkel α stellt die seitliche Neigung und der Winkel β die Neigung nach hinten (positiv) oder vorne (negativ) gegenüber der Senkrechten dar.

Tabelle 7.1: Eckdaten der vorgeschlagenen Aufprall-Prüfung

Aufprallgeschwindigkeit:	8 m/s
Geführte Bewegung:	Ja
Masse Prüfkörper:	80 kg
Konfiguration 1:	$\alpha = 0^\circ$ $\beta = 28^\circ$
Konfiguration 2:	$\alpha = 45^\circ$ $\beta = 28^\circ$
Konfiguration 3:	$\alpha = 0^\circ$ $\beta = -10^\circ$
Konfiguration 4:	$\alpha = 0^\circ$ $\beta = 90^\circ$

7.4 Grenzwerte bei der Musterprüfung

Zur Verzögerung steht beim untersuchten Protektor ein Weg von theoretisch 17 cm zur Verfügung. Ganz am Anfang der Belastung ist jedoch ein gewisser Weg erforderlich, bis die Beschleunigung ein nennenswertes Niveau erreicht. Außerdem verbleibt eine gewisse Restdicke für den vollständig verdichteten Protektor. Deshalb soll von einem effektiven Verzögerungsweg von nur 10 cm ausgegangen werden. Daraus errechnet sich eine erforderliche konstante Verzögerung von 320 m/s^2 bzw. 32.6 g über eine Zeitdauer von 25 ms . Damit wäre der Test gerade noch positiv.

Je nachdem inwieweit der Protektortest geändert wird, wäre also eine Unterschreitung der Grenzwerte durchaus möglich, auch wenn der hier betrachtete idealisierte Verzögerungsverlauf natürlich in der Praxis nicht so einfach erreicht werden kann. Ob aktuelle Protektoren ohne Anpassungen den verschärften Protektortest bestünden, ist fraglich. Aber die gesteigerten Anforderungen sollen auch Verbesserungen und Neuentwicklungen in diesem Bereich anregen.

Je nach Aufprall wird die Wirbelsäule in verschiedene Richtungen belastet. Wie in Kapitel 4 beschrieben ist die Belastbarkeit der Wirbelsäule richtungsabhängig. Es wird empfohlen, richtungsabhängige Grenzwerte festzulegen. Für eine Belastung in x- und z-Richtung könnten bezüglich Höhe und Einwirkdauer beispielsweise die Untersuchungen von Eiband [4] gute Anregungen beinhalten. Das DR-Modell lieferte schon beim Nachstellen der

Dummyversuche und beim Vergleich der freien und geführten Bewegung fragwürdige Ergebnisse. Auch bei den später beschriebenen Unfallsimulationen konnte das Modell nicht überall überzeugen. Eine Umstellung auf dieses Bewertungssystem wird deshalb nicht empfohlen.

Kapitel 8

Fazit

Die angestellten Untersuchungen bestätigten die Sinnhaftigkeit der Verwendung von Protektoren im Gleitschirmsport. Es zeigte sich, dass bei den Schutzvorkehrungen für die Piloten durchaus noch Verbesserungspotential vorhanden ist. Einerseits kann dies mittels Anpassungen der Protektorprüfung durch die zuständigen Stellen erzwungen werden. Andererseits können die Protektoren unabhängig davon von den Herstellern verbessert werden. Bisherige Trends gehen nach Information vom DHV eher nicht in diese Richtung.

Die genauere Analyse von Unfallsituationen zeigte, dass der Lastfall bei der Protektorprüfung in etwa 50% abdeckt. Um noch mehr Unfälle zu adressieren wurden Vorschläge zur Anpassung der bestehenden Prüfung vorgestellt. So könnte man in Zukunft rund 80% der Unfallsituationen abdecken. Mithilfe der Unfallvideos konnten Geschwindigkeiten und Lage des Piloten beim Aufprall abgeschätzt werden. Aufgrund der wenigen verfügbaren Daten sind die Geschwindigkeitswerte jedoch statistisch nicht belastbar. Aus den Schätzungen ergibt sich der Vorschlag für eine Prüfgeschwindigkeit von 8 m/s . Damit sind bezüglich der Auftreffgeschwindigkeit 50% der Unfälle abgedeckt. Um auch Extremfälle abzudecken, müsste die Geschwindigkeit noch deutlich erhöht werden. Die Masse des Fallkörpers bei der Prüfung sollte der Größe des Gurtzeugs entsprechen. Die zur Zeit generell verwendete Masse des Fallkörpers von 50 kg ist, außer vielleicht für sehr kleine Gurtzeuge, zu gering. Allein schon aus Gründen der Wiederholbarkeit sollte die Führung des Prüfkörpers wie bisher beibehalten werden. Was dieses verbesserte Testszenario in Hinblick auf Häufigkeit und Schwere von Verletzungen letztendlich bringt, kann erst abgeschätzt werden nachdem eine Umstellung des Tests erfolgt ist und alle Piloten neue Protektoren verwenden.

Für die Protektoren könnte man verschiedene Schutzklassen einführen. So könnte man den bisherigen Test als niedrigste erforderliche Schutzklasse heranziehen. Eine nächste Klasse könnte beispielsweise für Protektoren, welche mit höherer Geschwindigkeit und Masse des Fallkörpers den Test auch noch

bestehen, vorgesehen werden. Protektoren, welche bei den neuen Anforderungen mit zusätzlichen Lastfällen unter gewissen Grenzwerten abschneiden, könnte man eine noch höhere Schutzklasse zuweisen. Eine solche Unterteilung hätte den Vorteil, dass die bisherigen Protektoren von den Piloten weiter verwendet werden können. Zusätzlich würde dadurch aber auch eine Weiterentwicklung der Protektoren angeregt werden, da eine Einstufung in eine höhere Schutzklasse auch ein zusätzliches Verkaufsargument darstellt. Dem Käufer wird dann vielleicht auch mehr als bisher bewusst, dass seine Wahl Einfluss auf seine Sicherheit bei einem Unfall hat. Es ist auch im Interesse der Versicherungen, dass ihre Klienten mit einem bestmöglichen Schutz ausgestattet sind. Sie könnten Rabatte bei Verwendung von Protektoren aus höheren Schutzklassen anbieten.

Die Festlegung der Grenzen für die Tests ist nicht einfach. Das bisherige System mit kombinierten Grenzwerten aus Höhe und Einwirkdauer der Belastung erscheint grundsätzlich sinnvoll. Das vorgestellte Dynamic Response Modell lieferte teilweise widersprüchliche Ergebnisse. Eine generelle Umstellung auf dieses System kann daher nicht empfohlen werden. Es wird empfohlen das alte System prinzipiell beizubehalten, jedoch in Zukunft richtungsabhängige Grenzwerte festzulegen.

Für derzeit verwendete Protektoren liegen betreffend der Schutzwirkung fast ausschließlich die Ergebnisse der Protektorprüfung vor. In Kapitel 6 wurde versucht, unter der Verwendung von höheren Geschwindigkeiten und einer höheren Masse des Piloten eine größere Anzahl an Unfallszenarien zu adressieren. Hier wurde die Vermutung eines mäßigen Schutzes beim Seitenaufprall und beim nach vorne geneigten Aufprall bestätigt.

Daneben zeigte sich, dass der Schutz selbst bei Situationen, die dem aktuellen Protekortest entsprechen, nicht unbedingt zufriedenstellend ist. Durch die höhere Masse und Geschwindigkeit muss wesentlich mehr Energie abgebaut werden. Dafür sind wohl die meisten marktüblichen Protektoren nicht ausgelegt. Mit den ausgearbeiteten Vorschlägen für Verbesserungen wurde aufgezeigt, welches Potenzial in der Verwendung alternativer Materialien für den Protektor, sowie in der Anbringung zusätzlicher Protektoren steckt. Die höchste Beschleunigung tritt jetzt meist zum Zeitpunkt der höchsten Kompression des Protektors auf. Um den verfügbaren Weg bestmöglich auszunützen, sollte die Beschleunigung aber gleich zu Beginn hoch sein. Weiters wäre ein gleichmäßigerer Verlauf der Beschleunigung wünschenswert.

Kapitel 9

Ausblick

In der europäischen Norm ist derzeit die Verwendung von Protektoren im Gleitschirmsport noch nicht vorgeschrieben. Zur Zeit wird in einer Arbeitsgruppe, unter Mitwirkung des Sicherheitsreferenten des DHV, untersucht, wie die Norm an den Stand der Technik angepasst werden könnte. Diese Arbeit wird dem DHV vorgelegt und könnte so einen Input für mögliche Verbesserungen liefern.

Wie die in der Arbeit vorgeschlagenen Prüfkonfigurationen in einer Prüfanlage umgesetzt werden könnten, soll in einer auf dieser Arbeit aufbauenden Bachelorarbeit ermittelt werden.

Für die Generierung von Lastfällen wurden die vorliegenden Daten aus den Befragungen und Videos so gut wie möglich eingebunden. Bei den Befragungen ging durch Vorgabe gewisser Antwortmöglichkeiten oft nicht genau hervor, wie die Unfallsituation tatsächlich aussah. Mittlerweile wird laut Auskunft vom DHV bei den Unfallmeldungen die Lage des Piloten beim Aufprall erfasst. So sollte in Zukunft die Relevanz der verschiedenen Szenarien noch besser als jetzt abgeschätzt werden können.

Das Verständnis von Unfallsituationen könnte man vielleicht mit dem Einsatz von Datenloggern noch verbessern. Diese könnten nach einem Unfall ausgelesen und die aufgezeichneten Daten analysiert werden. Auch der Einsatz von GPS-Geräten zum Aufzeichnen des Flugs ist im Gleitschirmsport recht üblich. Wenn Piloten Aufzeichnungen ihres Unfalls haben, könnten diese in Bezug auf die Beurteilung der Aufprallgeschwindigkeit eventuell hilfreich sein. Darum könnte man dies in Zukunft in den Unfallmeldungen abfragen und sich die Daten falls vorhanden übermitteln lassen.

In der Arbeit wurde die Verwendung alternativer Materialien vorgeschlagen. Für die diesbezüglichen Simulationen wurde ein fiktives Material verwendet, da es nur um die prinzipielle Umsetzbarkeit gegangen ist. Welche Materialien hier tatsächlich Verwendung finden könnten, wäre ein interessantes Thema für weitere Untersuchungen.

Anhang A

Materialtests

Im Anhang A sind die Ergebnisse aus den Fallimpaktor-Versuchen bei verschiedenen Fallhöhen für die Schäume des Rücken- und Seitenprotectors zu finden.

A.1 Seitenschaum $h_0 = 459mm$

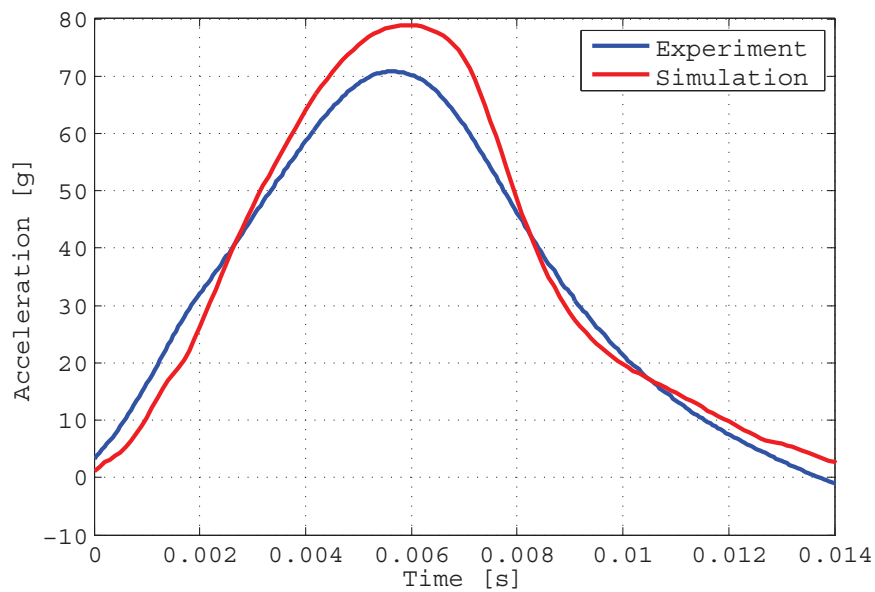


Abbildung A.1: Vergleich Simulation/Experiment: Beschleunigung über Zeit

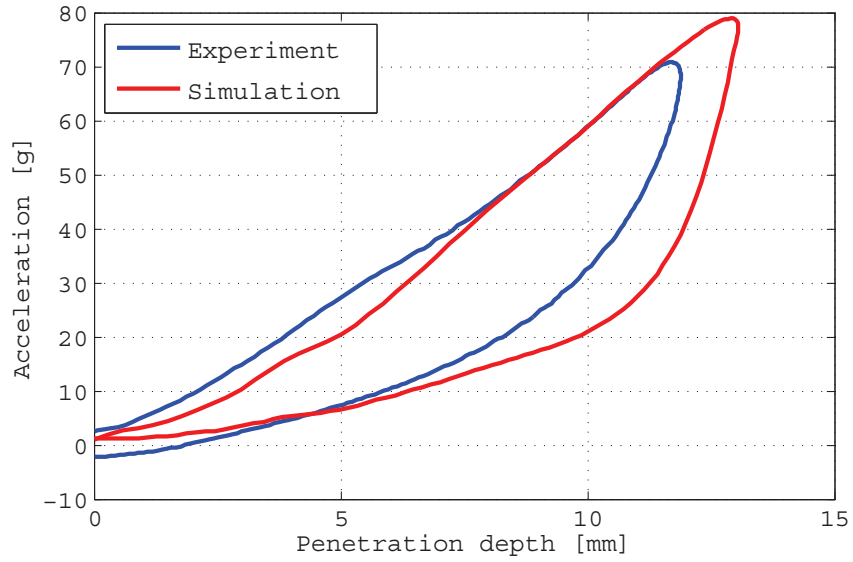


Abbildung A.2: Vergleich Simulation/Experiment: Beschleunigung über Eindringtiefe

A.2 Seitenschaum $h_0 = 1274mm$

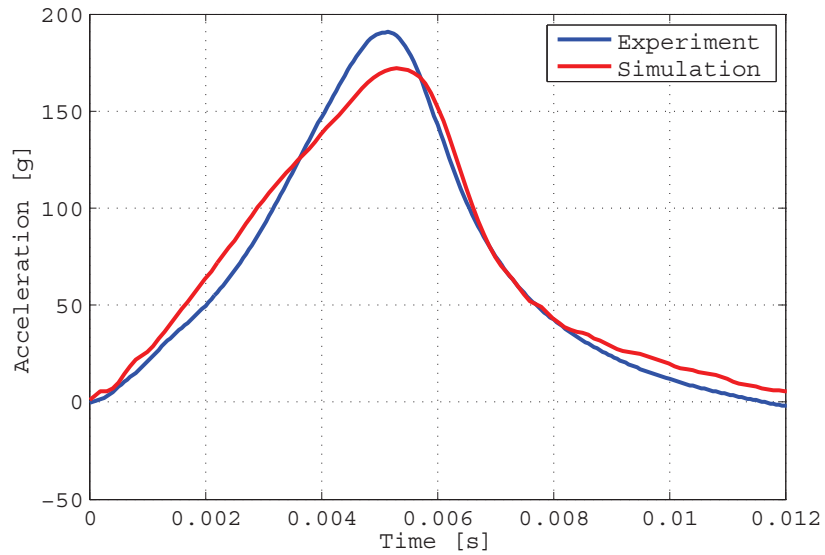


Abbildung A.3: Vergleich Simulation/Experiment: Beschleunigung über Zeit

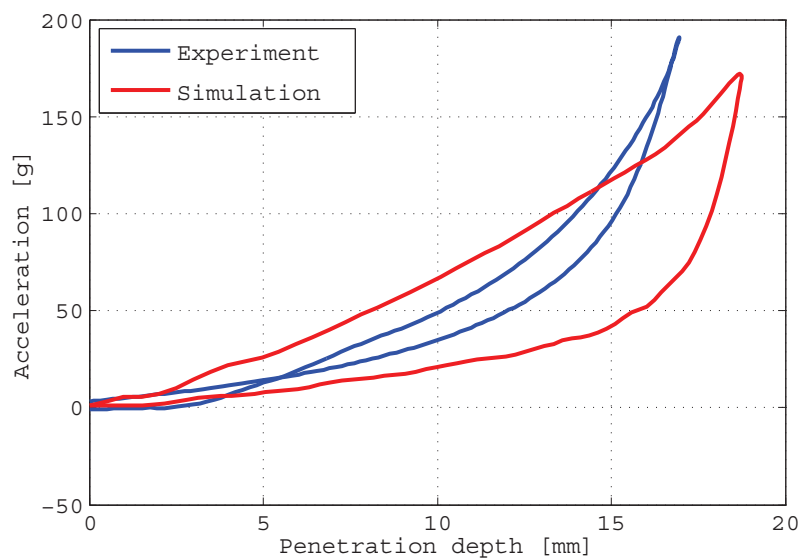


Abbildung A.4: Vergleich Simulation/Experiment: Beschleunigung über Eindringtiefe

A.3 Rückenschaum $h_0 = 459\text{mm}$

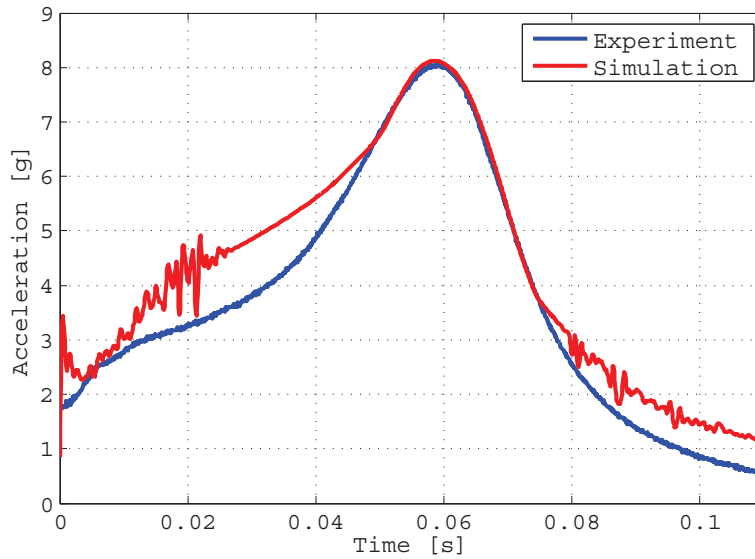


Abbildung A.5: Vergleich Simulation/Experiment: Beschleunigung über Zeit

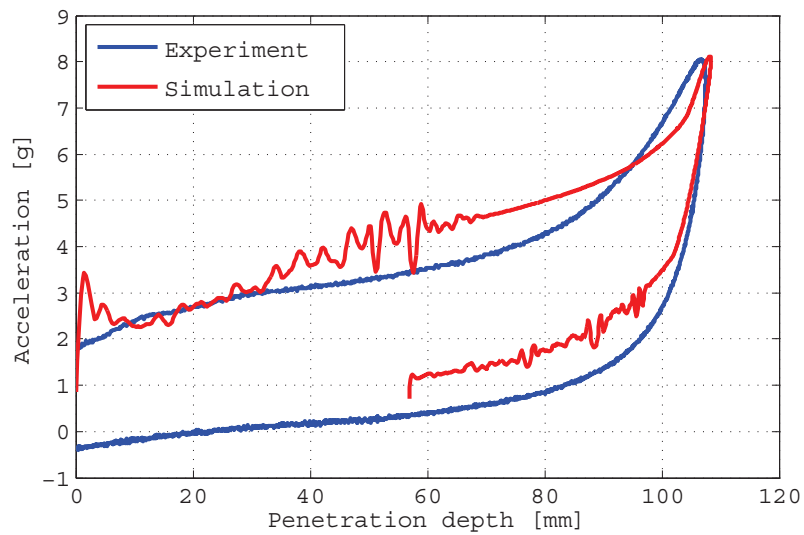


Abbildung A.6: Vergleich Simulation/Experiment: Beschleunigung über Eindringtiefe

A.4 Rückenschaum $h_0 = 815\text{mm}$

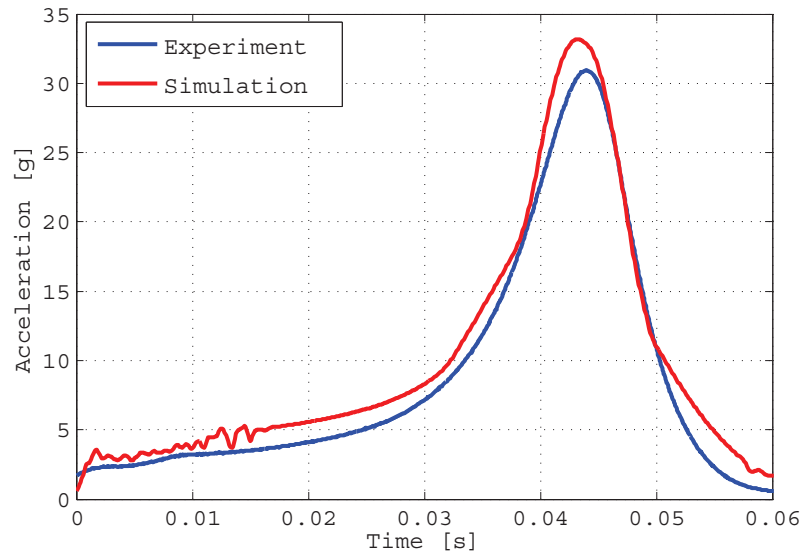


Abbildung A.7: Vergleich Simulation/Experiment: Beschleunigung über Zeit

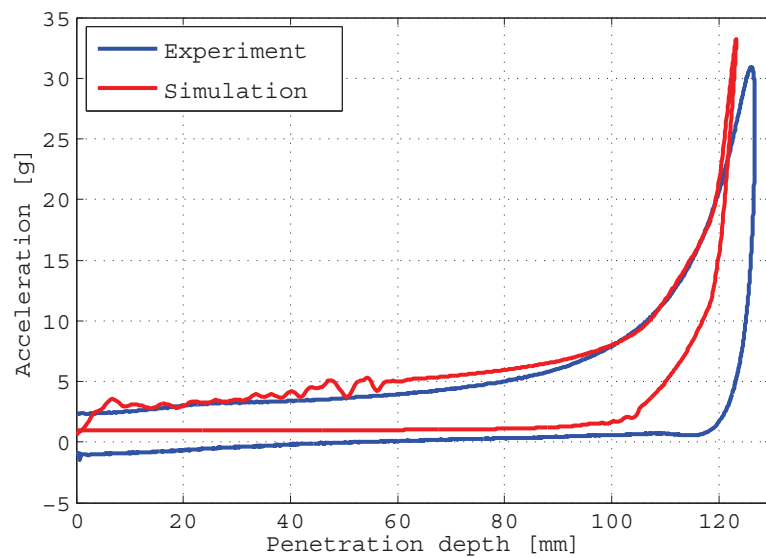


Abbildung A.8: Vergleich Simulation/Experiment: Beschleunigung über Eindringtiefe

A.5 Rückenschaum $h_0 = 1274mm$

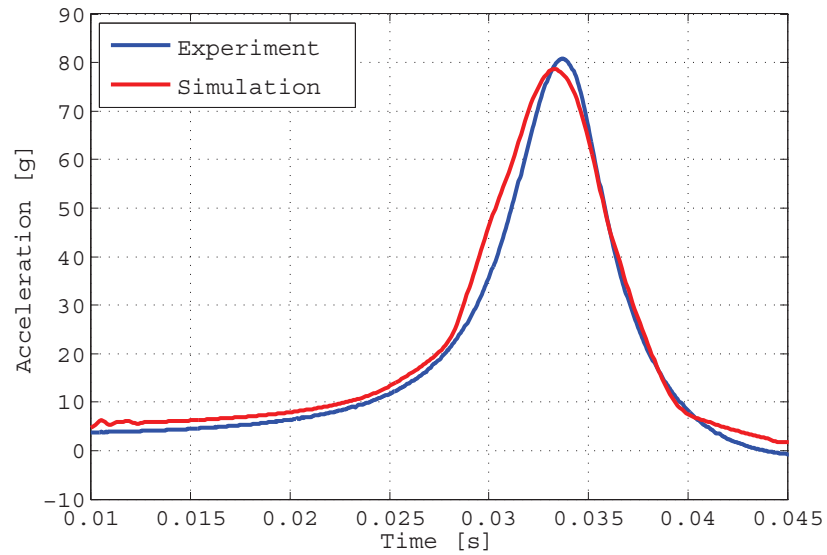


Abbildung A.9: Vergleich Simulation/Experiment: Beschleunigung über Zeit

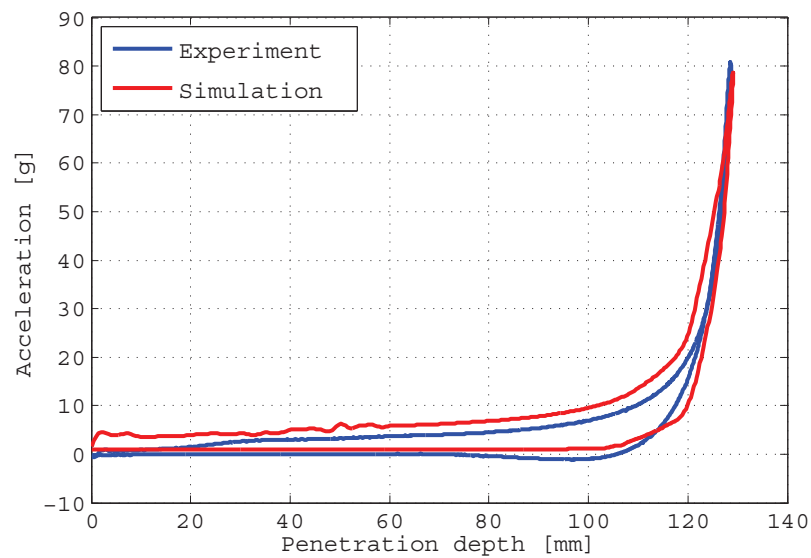


Abbildung A.10: Vergleich Simulation/Experiment: Beschleunigung über Eindringtiefe

A.6 Rückenschaum $h_0 = 1800\text{mm}$

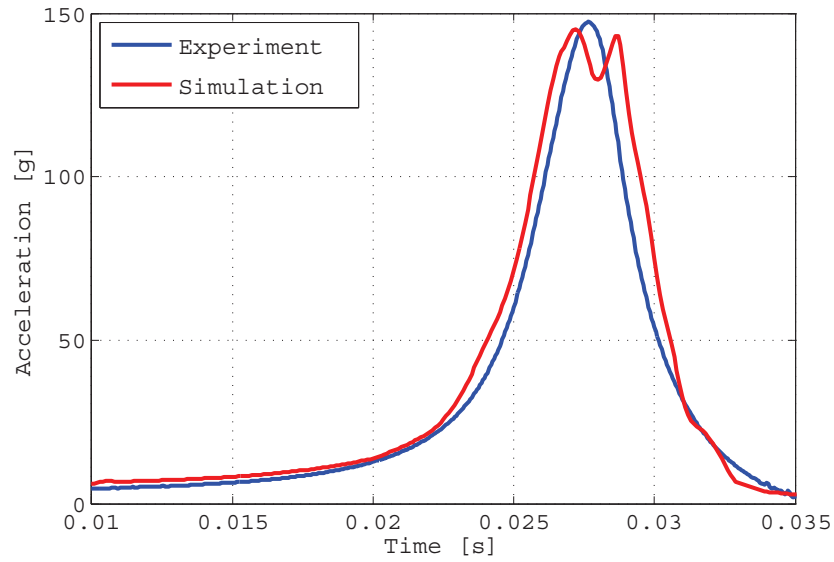


Abbildung A.11: Vergleich Simulation/Experiment: Beschleunigung über Zeit

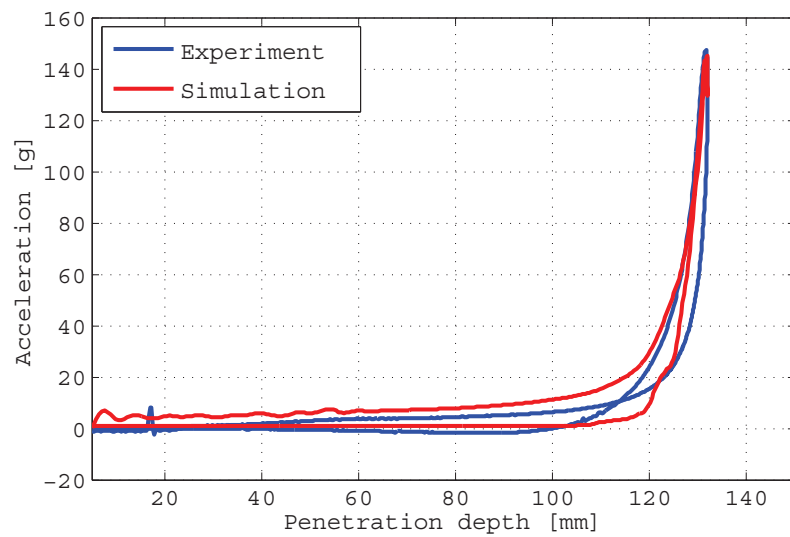


Abbildung A.12: Vergleich Simulation/Experiment: Beschleunigung über Eindringtiefe

Anhang B

Vergleich freie und geführte Bewegung

Der Anhang B beinhaltet die Ergebnisse des Vergleichs zwischen freier und geführter Bewegung für die verschiedenen Aufprallszenarien.

B.1 Protektortestkonfiguration, 28° nach hinten geneigt

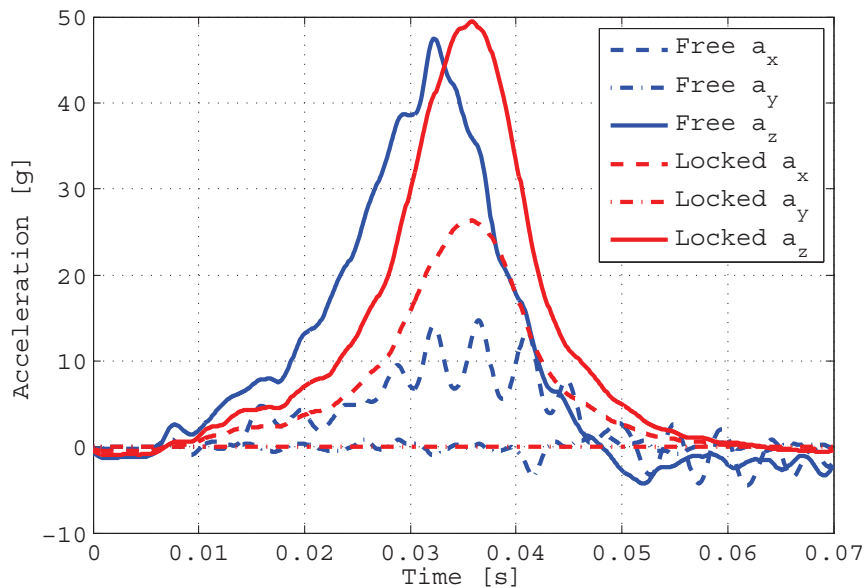
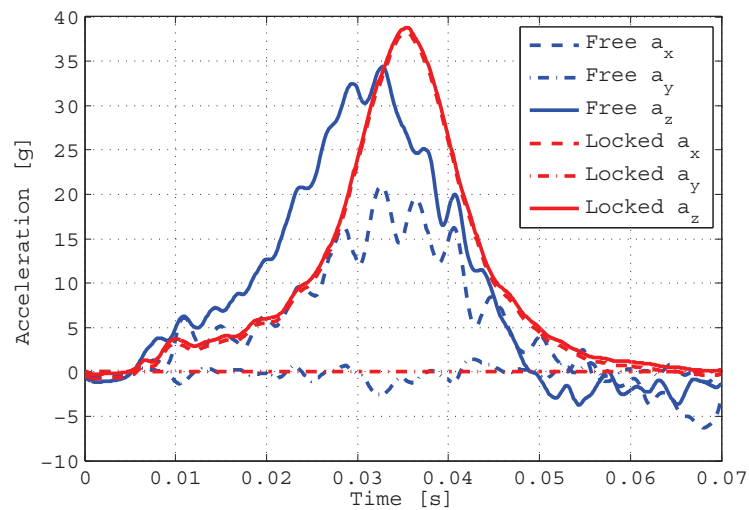


Abbildung B.1: Vergleich Simulation Protektortestkonfiguration, freie und geführte Bewegung

Tabelle B.1: Vergleich Simulation Protektortestkonfiguration, freie und geführte Bewegung

	<i>frei</i>	<i>geführt</i>
DR_x	9.3	17.4
DR_z	26.2	27.6
$Max. a_x$ [g]	14.7	26.3
$Max. a_z$ [g]	47.4	49.5

B.2 Konfiguration 45° nach hinten geneigt

**Abbildung B.2:** Vergleich Simulation 45° nach hinten geneigt, freie und geführte Bewegung**Tabelle B.2:** Vergleich Simulation 45° nach hinten geneigt, freie und geführte Bewegung

	<i>frei</i>	<i>geführt</i>
DR_x	15.6	26.0
DR_z	23.4	22.0
$Max. a_x$ [g]	21.0	38.3
$Max. a_z$ [g]	34.4	38.3

B.3 Konfiguration 30° seitlich geneigt

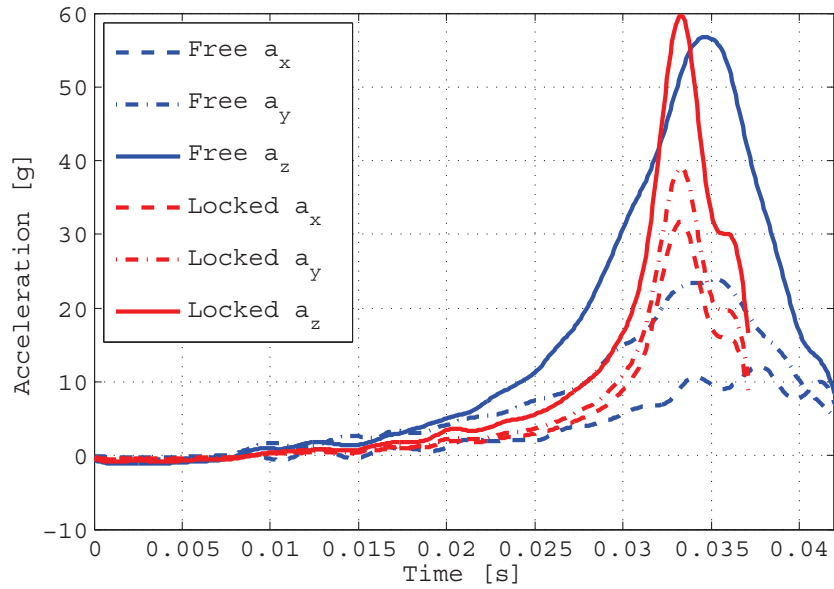


Abbildung B.3: Vergleich Simulation 30° seitlich geneigt, freie und geführte Bewegung

Tabelle B.3: Vergleich Simulation 30° seitlich geneigt, freie und geführte Bewegung

	<i>frei</i>	<i>geführt</i>
DR_x	6.4	8.3
DR_y	17.2	12.8
DR_z	22.5	12.9
$Max. a_x$ [g]	12.0	31.7
$Max. a_y$ [g]	24.0	39.0
$Max. a_z$ [g]	56.8	59.7

B.4 Konfiguration 10° nach vorne geneigt

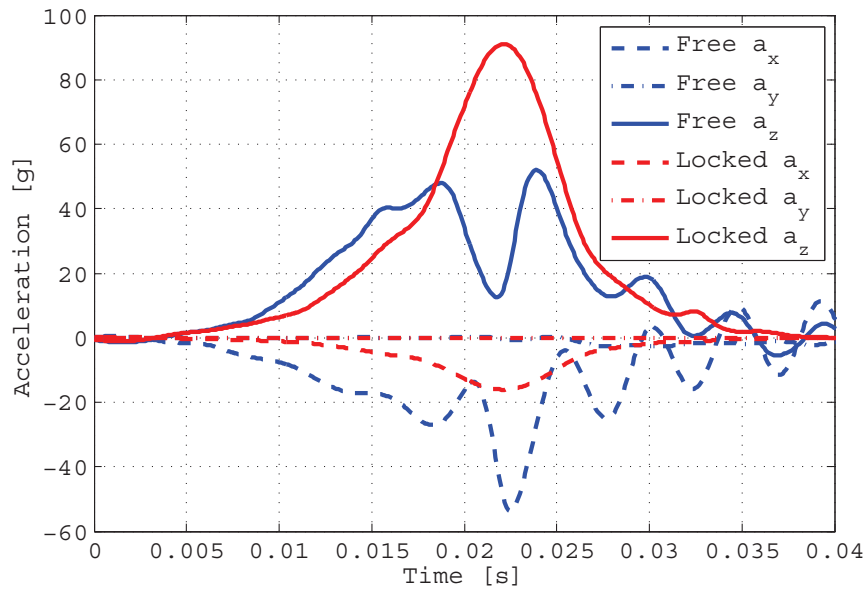


Abbildung B.4: Vergleich Simulation 10° nach vorne geneigt, freie und geführte Bewegung

Tabelle B.4: Vergleich Simulation 10° nach vorne geneigt, freie und geführte Bewegung

	<i>frei</i>	<i>geführt</i>
DR_x	-19.2	-6.9
DR_z	23.6	32.2
$Min. a_x$ [g]	-53.7	-16.1
$Max. a_z$ [g]	52.0	91.0

B.5 Konfiguration 90° nach hinten geneigt

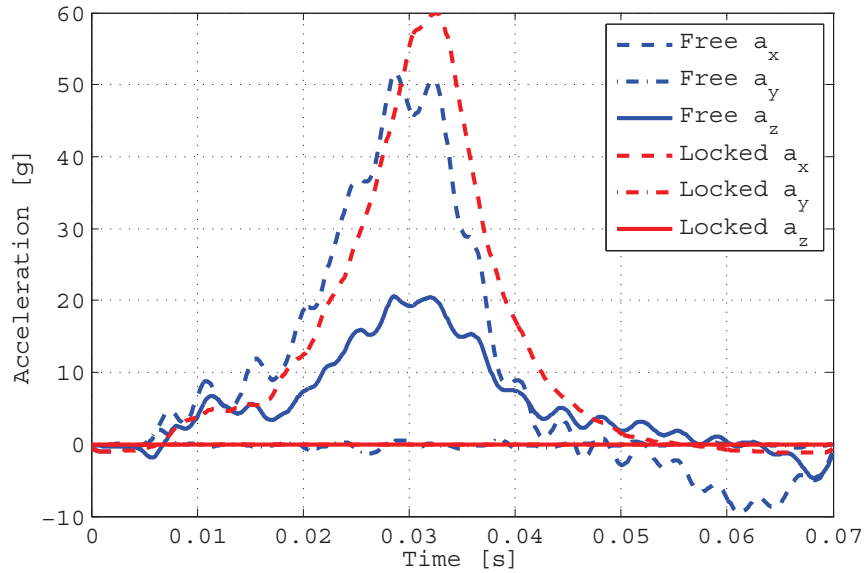


Abbildung B.5: Vergleich Simulation 90° nach hinten, freie und geführte Bewegung

Tabelle B.5: Vergleich Simulation 90° nach hinten, freie und geführte Bewegung

	<i>frei</i>	<i>geführt</i>
DR_x	34.0	37.5
DR_z	13.7	0.0
$Max. a_x$ [g]	51.7	60.0
$Max. a_z$ [g]	20.6	0.0

Quellenverzeichnis

Literatur

- [1] M. Bohnsack und E. Schröter. „Verletzungsmuster und sportartbedingte Belastungen beim Gleitschirmfliegen“. In: *Der Orthopäde* 34.5 (Mai 2005), S. 411–418.
- [2] J.W. Brinkley, L.J. Specker und S.E. Mosher. „Development of Acceleration Exposure Limits for Advanced Escape Systems“. In: *Implications of Advanced Technologies for Air and Spacecraft Escape, NATO AGARD Proceedings, AGARD-CP-472* (Feb. 1990), Session 1, Report No. 1.
- [3] Luftfahrt Bundesamt. *A-Z - NfL II - 91/09*. Bekanntmachung von Lufttüchtigkeitsforderungen für Hängegleiter und Gleitsegel. 2009. URL: [http : / / www . lba . de / SharedDocs / Downloads / NfLs / NfL _ Technik / NfL _ II _ 91 _ 09 . html](http://www.lba.de/SharedDocs/Downloads/NfLs/NfL_Technik/NfL_II_91_09.html) ; jsessionid = 1D0CFD7EF21249B4D7663A0AF7DFDA7C . live2052 ? nn = 20286 (besucht am 11.02.2013).
- [4] A.M. Eiband. *Human Tolerance to Rapidly Applied Accelerations: A Summary of the Literature*. Techn. Ber. NASA Memorandum 5-19-59E. Juni 1959.
- [5] A.H. Hasbrook. *Crash Survival Study of a Survivable Accident Involving a Piper PA-1 zitiert nach [4]*. Cornell-Guggenheim Aviation Safety Center. Mai 1954.
- [6] C. Lawrence u. a. *The Use of a Vehicle Acceleration Exposure Limit Model and a Finite Element Crash Test Dummy Model to Evaluate the Risk of Injuries During Orion Crew Module Landings*. Techn. Ber. NASA/TM-2008-215198. 2008. URL: <http://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20080018587> (besucht am 13.02.2013).
- [7] J.K. Nelson und Waugh P.J. „Injury criteria of the IMO and the Hybrid III dummy as indicators of injury potential in free-fall lifeboats“. In: *Ocean Engineering* 5 (1996), S. 385–401.
- [8] T. Schlager. *Gleitschirmfliegen. Das Praxisbuch für Anfänger und Profis*. Neuauflage. Bruckmann, Juli 2006.

- [9] NATO Science und Technology Organization. *RTO-TR-HFM-090 - Test Methodology for Protection of Vehicle Occupants against Anti-Vehicular Landmine Effects*. Techn. Ber. Apr. 2007.
- [10] J.P. Stapp. *Human Exposures to Linear Deceleration zitiert nach [4]*. United States Air Force, Wright Air Development Center, 1951.
- [11] J.P. Stapp. „Tolerance to abrupt deceleration“. In: *AGARDograph, No. 6, 1955, p. 122-139 zitiert nach [4]*. Collected Papers on Aviation Medicine. 1955.
- [12] E.L. Stech und P.R. Payne. *Dynamic models of the human body*. Techn. Ber. Frost Engineering Development Corporation, Nov. 1969.
- [13] O. Voigt. *Aerodynamik und Flugmechanik des Gleitschirms*. 2003.
- [14] D.T. Watts, A.T. Kornfield und E.S. Mendelson. *Human Tolerance to Accelerations Applied from Seat to Head During Ejection Seat Tests zitiert nach [4]*. TED No. NAM 256005, Report No. 1, Naval Air Material Center. 1947.
- [15] R.E. Zimmerman und N.A. Merritt. *Aircraft Crash Survival Design Guide. Volume 1. Design Criteria and Checklists*. Techn. Ber. SIMULA INC, Dez. 1989.

Online-Quellen

- [16] European Aviation Safety Agency. *Certification Specifications for Normal, Utility, Aerobatic, and Commuter Category Aeroplanes. CS-23. Amendment 3*. Juli 2012. URL: <http://www.easa.europa.eu/agency-measures/docs/certification-specifications/CS-23/CS-23%20Amdt%203.pdf> (besucht am 19.04.2013).
- [17] Livermore Software Technology Corporation. *LS-Dyna Keyword User's Manual Version 971*. Mai 2007. URL: http://lstc.com/pdf/ls-dyna_971_manual_k.pdf (besucht am 03.10.2013).
- [18] *Gurtzeug Skywalk Cult XC*. URL: <http://www.dhv.de/web/typo3temp/pics/839c0e913a.jpg> (besucht am 18.04.2013).
- [19] G.B.M. Mensink u. a. *Übergewicht und Adipositas in Deutschland*. Bundesgesundheitsbl 2013 · 56:786-794 · Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Abteilung für Epidemiologie und Gesundheitsmonitoring, Robert Koch-Institut, Berlin. Mai 2013. URL: <http://edoc.rki.de/oa/articles/rec5I0tIFMfd2/PDF/23JuqX9byg62Q.pdf> (besucht am 10.10.2013).
- [20] *Protektorprüfanlage*. URL: http://www.dhv.de/web/fileadmin/user_upload/files/2011/sicherheit/Bericht_Auswertung_Fragebogen_Rueckenschutz.pdf (besucht am 25.09.2013).

- [21] K. Slezak. *Gleitschirm Jahres-Unfallstatistik 2012*. Deutscher Hängegleiterverband e.V. URL: <http://www.dhv.de/web/piloteninfos/sicherheit-und-technik/unfallforschung/unfall-jahresstatistik/gleitschirm-jahres-unfallstatistik-2012/> (besucht am 18.04.2013).
- [22] K. Tänzler und B. Liebermeister. *Hintergrundinformationen zum Gleitschirmfliegen und Drachenfliegen*. Deutscher Hängegleiterverband e.V. URL: http://www.dhv.de/web/fileadmin/user_upload/aktuell_zu_halten/dhv/Presseseite/Hintergrundinfos.pdf (besucht am 27.09.2013).
- [23] Deutscher Hängegleiterverband e.V. *Hintergrundinformationen über den Deutschen Hängegleiterverband e.V. (DHV)*. URL: <http://www.dhv.de/web/verband/der-dhv/hintergrundinformationen/>.
- [24] Deutscher Hängegleiterverband e.V. *Internet-Mediadaten 2012*. URL: http://www.dhv.de/web/fileadmin/user_upload/aktuell_zu_halten/dhv/info/Mediadaten-internet_2012_01.pdf (besucht am 06.02.2013).