

Zusammenfassung der

Diplomarbeit

mit dem Thema:

Rechnergestützte Simulation des Falltests eines
Motorradhelms

von

Florian Mintgen

im

Fachbereich Bauingenieurwesen

an der

Fachhochschule Koblenz

In dieser Arbeit wurde mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) ein nach der europäischen Norm ECE 22.05 gesetzlich vorgeschriebener Falltest eines Motorradhelms simuliert, aus den fünf zu testenden Punkten wurde der am Hinterkopf liegende Punkt gewählt. Die Firma *Uvex* stellte Geometriedaten eines Helms zur Verfügung, die Berechnung erfolgte im Ingenieurbüro *Huß & Feickert* mit dem FE-Programm *LS-Dyna*. Als Preprozessor wurde das Programm *Hypermesh*, als Postprozessoren die Programme *Hypergraph* und *Animator* verwendet. Ziel der Arbeit war die realitätsnahe Abbildung der vorgeschriebenen Prüfkriterien.

Die Finite-Elemente-Methode basiert auf der Unterteilung eines beliebigen Systems (z.B. einer mechanischen Struktur oder eines magnetischen Feldes) in eine endliche Anzahl von Elementen, die über Kompatibilitätsbedingungen miteinander verbunden sind. Für diese Elemente sind alle systembestimmenden Parameter bekannt bzw. können aus den bekannten Parametern berechnet werden. Somit lassen sich aus den auf ein statisches System wirkenden Kräften und den Steifigkeiten der Elemente die Verschiebungen des Systems ermitteln. Da es sich im vorliegenden Fall um einen dynamischen Vorgang handelt, mussten auch die Trägheit und die Dämpfung des Systems sowie der zeitliche Ablauf berücksichtigt werden. Letzteres geschieht in *LS-Dyna* mittels einer modifizierten Form der zentralen Differenzenmethode, die Systemgleichungen werden zu diskreten Zeitpunkten erstellt und unter Annahme eines linearen Verlaufs gelöst. Der durch die Diskretisierung zweier eigentlich kontinuierlicher Systeme - der Struktur und der Zeit - entstehende Fehler wird durch die Wahl genügend kleiner Elemente bzw. Zeitschritte minimiert.

Die ECE 22.05 regelt sowohl den Aufbau von Motorradhelmen als auch die für diese vorgeschriebenen Sicherheitsprüfungen. Ein Helm muss aus einer harten Außenschale, einer stoßdämpfenden Schutzpolsterung, einer Komfortpolsterung sowie einer Trageeinrichtung bestehen, weitere Teile wie ein Visier oder Lufteinlässe sind optional. Vor den vorgeschriebenen Tests werden die Helme verschiedenen Konditionierungen bei hoher und niedriger Temperatur sowie unter UV-Strahlung unterzogen. Für den Falltest sind zwei Ambossformen vorgeschrieben, ein flacher und ein gewinkelter Amboss. Auf diese werden die auf einem Prüfkopf sitzenden Helme mit einer vorgeschriebenen Geschwindigkeit geführt fallen gelassen. Dabei wird im Schwerpunkt des Prüfkopfs die Beschleunigung über die Zeit gemessen, die ermittelte Maximalbeschleunigung sowie der daraus berechnete Parameter der Kopfverletzung (HIC) dürfen das 275-fache der Erdbeschleunigung g respektive den dimensionslosen Wert von 2400 nicht überschreiten.

Die Simulation erfolgte auf Grundlage der von der Firma *Uvex* erhaltenen Geometrie des Helmmodells *Boss 525*. Dieser Helm besteht hauptsächlich aus zwei Polymeren: die Außenschale aus Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS), die Schutzpolsterung aus expandiertem Polystyren (EPS). Bei ABS handelt es sich um einen amorphen Thermoplast, der durch Spritzgießen in die Schalenform gebracht wird und aufgrund seiner unregelmäßigen Atomgitterstruktur große Impulsbelastungen aufnehmen kann. EPS wird durch Aufschäumen in die entsprechende Form gebracht und weist durch seine Schaumstruktur gute Stoßdämpfungseigenschaften auf.

Für das ABS konnten von Seiten der Firma *Uvex* Materialkennwerte zur Verfügung gestellt werden, für EPS lagen jedoch zunächst keine Materialdaten vor. In der Berechnung wurde daher vorläufig mit den frei verfügbaren Kennwerten eines expandierten Polypropylen (EPP) gearbeitet. Dieses weist ein dem EPS ähnliches Materialverhalten auf, es wird ebenfalls zur Stoßdämpfung eingesetzt.

Die weiteren Teile des Helms (Visier, Lufteinlässe, Trageeinrichtung) wurden nicht in die Berechnung einbezogen, da ihr Einfluss bei einem Falltest am Hinterkopf zu vernachlässigen ist.

Die Geometrie des Helms wurde mit Hilfe des Preprozessors *Hypermesh* für die Berechnung aufbereitet, d.h. aus den vorhandenen Geometriedaten wurde ein Netz aus finiten Elementen erstellt. Ebenso wurden die FE-Modelle des Kopfs und des Amboss' mittels *Hypermesh* erstellt.

Bei der Vernetzung mit finiten Elementen müssen einige Grundregeln beachtet werden. Das Netz sollte möglichst regelmäßig aufgebaut sein, Dreiecks- und Tetraederelemente sollten vermieden werden und die Elemente sollten ein gegen 1 tendierendes Kantenlängenverhältnis aufweisen.

Aufgrund ihrer geringen Dicke wurde die Helmschale mit Schalenelementen modelliert. Da es sich bei Schalenelementen um zweidimensionale Elemente handelt, denen erst zu einem späteren Zeitpunkt eine Dicke zugewiesen wird, wurden die Mittelflächen der Helmschale benötigt. Diese wurden durch einen automatischen Algorithmus erzeugt, wegen der komplizierten Geometrie der Schale mussten die auf diese Weise generierten Mittelflächen jedoch manuell nachbearbeitet werden. Auf den Mittelflächen wurden, ebenfalls zunächst automatisch, Schalenelemente erzeugt. Bei dieser sogenannten *Auto-Mesh*-Funktion können die gewünschten Elementparameter - wie Kantenlänge, Winkel, Verwölbung - vorgegeben werden. Da auch dieser Algorithmus kein optimales Ergebnis lie-

ferte, wurden auch die Elemente manuell nachbearbeitet. Die kleinste Kantenlänge des FE-Netzes - ein für die Zeitschrittlänge ausschlaggebender Parameter - der Helmschale betrug 1,2 mm,

Die Schutzpolsterung des Helms wurde mit Tetraederelementen vernetzt, die zwar eigentlich vermieden werden sollten, für Schaummaterialien jedoch, wie eine Voruntersuchung bestätigen sollte, zu akkuraten Ergebnissen führen. Zunächst wurde auf den Oberflächen der Schutzpolsterung automatisch ein Netz aus Dreieckselementen generiert, welches manuell nachbearbeitet wurde. Auf Grundlage dieses zweidimensionalen Netzes konnte anschließend automatisch ein Volumennetz aus Tetraederelementen erstellt werden. Da der für die manuelle Bearbeitung eines Volumennetzes benötigte Aufwand in keinem Verhältnis zum Nutzen steht, wurde hier eine kleinste Elementkantenlänge von 0,6 mm akzeptiert.

Der nach ECE 22.05 vorgeschriebene Prüfkopf wurde aus den dort enthaltenen Polarkoordinaten erstellt. Nach einer Umrechnung in kartesische Koordinaten wurden diese Punkte über ein Textfile in *Hypermesh* importiert und auf deren Grundlage ein Netz aus Schalenelemente generiert. Da entsprechend ECE 22.05 die Beschleunigung im Schwerpunkt des Kopfs ermittelt werden sollte, wurde dort ein zusätzliches Schalenelement erstellt, das durch seine Materialdefinition starr mit den restlichen Elementen des Kopfs verbunden wurde.

Der Amboss wurde, ebenfalls aus Schalenelementen, kreisförmig mit einem Durchmesser von 130 mm modelliert. Am Rand wurden zwei zusätzliche Reihen von Elementen nach unten gezogen, um einem Verhaken der Elemente des Helms vorzubeugen.

Die auf diese Weise erstellten FE-Netze wurden gemeinsam in *Hypermesh* eingelesen, positioniert und über eine Schnittstelle in ein für *LS-Dyna* lesbares Format exportiert.

Das Eingabeformat in *LS-Dyna* basiert auf der Verwendung sogenannter Keywords, auf die in festgelegten Spalten die Eingabebefehle folgen. In der vorliegenden Arbeit wurden die Keywords in Funktionsgruppen unterteilt, die in verschiedenen Textdateien gespeichert wurden:

Das DYN-File stellt die Steuerungsdatei dar, hieraus werden die weiteren Files aufgerufen. Außerdem werden im DYN-File grundlegende Rechenlaufbefehle wie die Dauer der Berechnung, die Mindestlänge des Zeitschritts sowie Art und Frequenz der Ausgabedateien definiert.

Das STRUC-File beinhaltet die mittels *Hypermesh* erstellte Modellgeometrie: die Knoten, die daraus bestehenden Elemente sowie die Parts, in denen die Elemente in Baugruppen organisiert sind. Allen zuvor genannten Teilen des Modells ist jeweils eine Identifikati-

onsnummer (NID, EID und PID) zugewiesen, mittels dieser wird auf sie zugegriffen. Im SEC-File sind alle in *LS-Dyna* verfügbaren Elementtypen (s.u.) jeweils unter einer fünfstelligen Sections-ID (SID) gespeichert, über die auf sie zugegriffen werden kann. Das MAT-File beinhaltet die Materialdefinitionen (z.B. Dichte, E-Modul, Streckspannung) auf die mit der dort definierten Material-ID zugegriffen wird. In *LS-Dyna* gibt es ca. 200 Materialmodelle, die auf unterschiedlichen theoretischen Annahmen beruhen. Im BOUNDCOND-File sind die Kontaktflächen zwischen den Modellteilen definiert, *LS-Dyna* prüft die hier angegebenen Kontaktpartner auf Durchdringung.

Die Elemente werden einerseits durch ihre Form beschrieben, dies geschieht bereits durch die Modellierung in *Hypermesh*. Außerdem gibt es innerhalb der Elementformen noch diverse Elementtypen, die sich durch die Art ihrer Berechnung unterscheiden. In einpunktintegrierten Schalenelementen werden beispielsweise nur Spannungen und Verschiebungen im Mittelpunkt der Mittelebene des Elements berechnet, wodurch sich mit diesem Elementtyp nur zweidimensionale Spannungszustände beschreiben lassen, nicht jedoch dreidimensionale, wie etwa Biegespannungen. Zu diesem Zweck werden höherintegrierte Elementtypen benötigt; in *LS-Dyna* können für Schalenelemente bis zu fünf Integrationspunkte definiert werden. Ebenso verhält es sich mit Balken- und Volumenelementen.

Da es in *LS-Dyna* keine Möglichkeit zur Angabe von Einheiten gibt, muss ein konsistentes Einheitensystem verwendet werden. In dieser Arbeit wurde ein auf der SI-Einheit *kg* sowie den abgeleiteten SI-Einheiten *mm* und *ms* basierendes Einheitensystem verwendet. Die Ausgabe erfolgt in einem Binär-Dateiformat, deren Frequenz im DYN-File festgelegt wird. Diese Ausgabedateien können mit allen für *LS-Dyna* entwickelten Postprozessoren ausgewertet werden. Im der vorliegenden Arbeit erfolgte die graphische Auswertung mit dem Programm *Animator*, die der Funktionsverläufe mit dem Programm *Hypergraph*.

Zur Beurteilung des Steifigkeit von Tetraederelementen wurde eine Voruntersuchung durchgeführt, in der das Verformungsverhalten eines aus Tetraederelementen modellierten Schaumquaders unter einer Stoßbelastung mit dem Verhalten eines aus Hexaederelementen modellierten Quaders verglichen wurde. Es zeigte sich dass die Modellierung von Schaummaterialien mit Tetraederelementen zu akkuraten Ergebnissen führt.

Der Aufbau der Berechnung des Falltests gliederte sich entsprechend den oben erläuterten Funktionsgruppen:

Im DYN-File wurde die Dauer der Simulation zunächst auf 30 ms festgelegt, konnte jedoch auf 15 ms abgesenkt werden. Die graphische Ausgabefrequenz wurde mit 2 ms^{-1} definiert, die der weiteren Ausgabefiles mit 10 ms^{-1} . Diese weiteren Files waren eine Ausgabedatei in der Verschiebung, Geschwindigkeit und Beschleunigung des Knotens

im Schwerpunkt des Kopfs enthalten waren sowie Dateien die den Energieverlauf während der Simulation speicherten. Hier wurde auch der Mindestzeitschritt mit $3,0 \cdot 10^{-4}$ ms und die nach ECE 22.05 geforderte Geschwindigkeit von 7,5 m/s definiert.

Im automatisch von *Hypermesh* generierten STRUC-File wurden den Parts manuell die entsprechenden MIDs und SIDs zugewiesen sowie ihrer Baugruppe entsprechende PIDs definiert. Außerdem befand sich hier ein ebenfalls bereits in *Hypermesh* definiertes Keyword, das die Speicherung der Daten des Knotens im Schwerpunkt in der oben genannten Ausgabedatei steuerte.

Aus dem SEC-File wurden über die SIDs im STRUC-File die benötigten Elementtypen eingelesen. Der Helmschale wurden fünfpunktintegrierte Schalenelemente zugewiesen, der Schutzpolsterung einpunktintegrierte Tetraederelemente und dem Kopf sowie dem Amboss zweipunktintegrierte Schalenelemente.

Im MAT-File wurden die verwendeten Materialien mitsamt ihrer MIDs definiert. Dazu wurden verschiedene Materialmodelle genutzt; für die Helmschale eine linear elastisch-plastische Materialbeschreibung, für die Schutzpolsterung ein zur Abbildung von Schäumen entwickeltes Modell und für Kopf und Amboss ein Starrkörpermaterial, das keinerlei Verformungen zulässt.

Die Kontaktdefinitionen erfolgten im BOUNDCOND-File, die Kontaktflächen Kopf-Helm und Helm-Amboss wurden gegeneinander geprüft, die Teile des Helms wurden wegen der unklaren Kontaktverhältnisse auch auf Durchdringung mit sich selbst geprüft.

Da es in dem ersten Rechenlauf zu einigen Problemen kam, musste das Modell nachbearbeitet werden.

Im Aufschlagbereich kam es zu einer Durchdringung der Elemente von Helmschale und Schutzpolsterung. Dem wurde durch die Definition von Kontaktschalen auf den Elementen der Schutzpolsterung sowie durch eine feinere Vernetzung der Helmschale mit höherintegrierten Elementen begegnet.

Einige Elemente der Schutzpolsterung wurden durch den Aufschlag so stark komprimiert, dass negative Volumina entstanden. Dieses Problem wurde durch Anpassung der Materialkennwerte des Schaums behoben.

Das erstellte Modell unterschied sich hinsichtlich seiner Masse vom realen Helm. Da dies durch das Fehlen diverser Anbauteile, des Visiers und der Trageeinrichtung, die sich alle im vorderen Drittel des Helms befinden, verursacht war, wurden an den dortigen Knoten Massenelemente definiert, durch welche die Differenz ausgeglichen wurde.

Mit diesen Änderungen konnte die Simulation komplett durchgeführt werden. Eine Betrachtung der Beschleunigungs- und Energieverläufe zeigte, dass es dabei zu sinnvollen

Ergbenissen kam, d.h. die Energieverläufe waren stetig und die Ergebnisse lagen in der Größenordnung der nach ECE 22.05 geforderten Werte. Auf Grundlage dieses Modells wurde eine Parameterstudie durchgeführt.

Aufgrund zusätzlich erhaltener Materialkennwerte des Schutzpolsters wurden aus den Kennwerten des EPP die Werte eines EPS abgeleitet. Die dynamischen Spannungs-Dehnungskurven wurden nach oben skaliert, die Entlastungskurve bis zu einer Verformung von 90 % zu Null gesetzt.

Mit den abgeleiteten Materialkennwerten wurde eine erneute Berechnung durchgeführt. Diese ergab eine Maximalbeschleunigung von 233 g und einen HIC von 2106. Die Maximalbeschleunigung war damit etwas höher als in der ersten Simulation, was auf die höhere Steifigkeit des Schaums zurückzuführen ist. Der HIC lag sehr viel niedriger, da der Kopf nach dem Aufschlag aufgrund der herabgesetzten Entlastungskurve weniger stark beschleunigt wurde.

Der Vergleich mit experimentell ermittelten Werten der Beschleunigung und des HIC zeigte, dass die simulierten Werte um ca. 10 % höher liegen als diese. Die Beschleunigung wies auch über die Zeit ein sehr ähnliches Verhalten wie der reale Beschleunigungsverlauf auf. Dies bedeutet, dass die nach ECE 22.05 geforderten Prüfkriterien gut abgebildet wurden.

Es bestehen allerdings noch einige offene Punkte, die Gegenstand zukünftiger Untersuchungen sein sollten. Hier sei vor allem die Ermittlung dehnratenabhängiger Spannungs-Dehnungskurven des EPS genannt, da die Materialkennwerte der Schutzpolsterung großen Einfluss auf die Ergebnisgüte ausüben.