

Kai-Uwe Schmitt · Peter F. Niederer
Markus H. Muser · Felix Walz

Trauma- Biomechanik

Verletzungen in Straßenverkehr und Sport

 Springer

VDI

Trauma-Biomechanik

Kai-Uwe Schmitt · Peter F. Niederer ·
Markus H. Muser · Felix Walz

Trauma-Biomechanik

Verletzungen in Straßenverkehr und Sport

 Springer

PD Dr. Kai-Uwe Schmitt
ETH Zürich
Inst. Biomedizinische Technik
Gloriastr. 35
8092 Zürich
Switzerland
schmitt@ethz.ch

Dr. Markus H. Muser
AGU Zürich
Winkelriedstr. 27
8006 Zürich
Switzerland

Prof. Dr. Peter F. Niederer
ETH Zürich
Inst. Biomedizinische Technik
Gloriastr. 35
8092 Zürich
Switzerland

Prof. Dr. med. Felix Walz
AGU Zürich
Winkelriedstr. 27
8006 Zürich
Switzerland

ISBN 978-3-642-11595-0 e-ISBN 978-3-642-11596-7
DOI 10.1007/978-3-642-11596-7
Springer Heidelberg Dordrecht London New York

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Einbandentwurf: deblik, Berlin

Gedruckt auf säurefreiem Papier

Springer ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.com)

Vorwort

Auf dem Gebiet der Verkehrssicherheit wurden in den vergangenen Jahren große Fortschritte erzielt. Dazu haben zahlreiche Maßnahmen beigetragen. Verbesserte Straßen sind ebenso zu nennen, wie die Gurtanlegepflicht und ein gesellschaftlicher Lernprozess bezüglich des individuellen Umgangs mit Risiken bei der Verkehrsteilnahme. Fahrwerksregelsysteme wie ABS und ESP gehören mittlerweile zur Serienausstattung und helfen viele Unfälle zu vermeiden und anderen eine mildere Verlaufform zu geben. Wenn es dennoch zum Aufprall kommt, sorgen zunehmend verbesserte Karosseriestrukturen in den meisten Fällen für einen Überlebensraum ohne bedrohliche Intrusionen und bauen die kinetische Energie ab. Die Insassen werden durch vielfältige, aufeinander abgestimmte Rückhaltesysteme kontrolliert verzögert, so dass die biomechanischen Grenzen ihrer Belastbarkeit möglichst nicht erreicht werden. Schließlich können Unfallopfer auf eine rasche Alarmierung von Helfern, eine effiziente Rettungskette und eine hoch entwickelte Notfallmedizin rechnen. Tatsächlich ist die Zahl der im Straßenverkehr Getöteten in Deutschland, Österreich und der Schweiz und auch in der EU insgesamt trotz steigenden Verkehrsaufkommens seit Jahren rückläufig. Dennoch müssen noch mehr Fortschritte erreicht werden, wenn das Leitbild eines nahezu opferfreien Straßenverkehrs realisiert werden soll.

Es gibt zahlreiche weitere Ansätze zur Verbesserung der Passiven Fahrzeugsicherheit. Bei gegebener, sehr guter Karosserie müssen die Rückhaltesysteme so ausgelegt werden, dass sie der Vielfalt der tatsächlich auftretenden Unfallsituationen und den interindividuellen Unterschieden der Fahrzeuginsassen gerecht werden können. Eine Voraussetzung dafür ist es, dass die biomechanischen Bedingungen für das Auftreten von Verletzungen bekannt sind.

Der Nachweis der Schutzwirkung bei einem Unfall erfolgt für ein Kfz heute an Hand von Versuchen mit Anthropomorphic Test Devices, also

Dummys. Dazu wurden biomechanisch begründete Schutzkriterien definiert, die den Zusammenhang zwischen den Messwerten am Dummy und der Wirkung auf den Menschen erfassen. Ergänzend werden inzwischen im Entwicklungsprozess in großem Umfang rechnerische Methoden mit numerischen Modellen von Fahrzeug, Rückhaltesystemen, Dummys und gegnerischen Objekten eingesetzt.

In Zukunft werden nicht nur die standardisierten Tests mit durchschnittlichen Personen zu bewerten sein, auch wenn diese für den Nachweis eines Mindestniveaus an Passiver Sicherheit für die Fahrzeugtypprüfung entscheidend bleiben. Zusätzlich ist eine Vielzahl von Unfallsituationen mit unterschiedlich großen, schweren, alten und gesunden Fahrzeuginsassen zu optimieren und zu überprüfen. Auf experimentellem Weg ist das unmöglich. Die Rolle der numerischen Simulation wird daher weiter zunehmen. Dazu sind aussagefähige, numerische Modelle der Biomechanik unter Berücksichtigung der Verschiedenheit der Menschen erforderlich. Untersuchungen zur Verletzungsentstehung können helfen, sie durch konstruktive Verbesserungen zu vermeiden oder in ihrer Schwere zu verringern. Von der Unfallbiomechanik sind also weiterhin wichtige Beiträge zur Verbesserung der Fahrzeugsicherheit zu erbringen.

Prof. Dr. Volker Schindler
Fachgebiet Kraftfahrzeuge
Technische Universität Berlin

Geleitwort

Der Erfolg der bisherigen englischsprachigen Ausgaben dieses Buches hat uns ermutigt, nun auch eine deutsche Übersetzung vorzulegen. Obschon sich das Buch in erster Linie an Einsteiger in die Trauma- bzw. Verletzungsbiomechanik richtet, finden sich zu jedem Kapitel auch umfangreiche Referenzen, die eine entsprechende Vertiefung ermöglichen. Somit dient das Buch auch als Startpunkt für ein intensiveres Studium spezifischer Aspekte der Trauma-Biomechanik.

Wir hoffen, dass das Buch dem Leser nicht nur einen strukturierten Einstieg in die Materie ermöglicht, sondern auch zu weiterführender Beschäftigung anregt. Die sozio-ökonomische Bedeutung von Verletzungen rechtfertigt jedenfalls eine ausgiebige Beschäftigung mit den verschiedenen Aspekten; sei es mit Verletzungsmechanismen oder auch mit Möglichkeiten zur Verletzungsprävention. Die globale Dimension der Thematik ergibt sich einerseits aus dem steigenden Verkehrsaufkommen insbesondere in Schwellen- und Entwicklungsländern, andererseits aus der Vielzahl von Verletzungen, welche im Sport, bei der Arbeit und im Haushalt auftreten. Daraus und aus den vielen, damit zusammenhängenden menschlichen Tragödien ergibt sich die Motivation, zur Reduktion des Verletzungsrisikos beizutragen.

Kai-Uwe Schmitt, Peter Niederer, Markus Muser, Felix Walz

Inhalt

1 Einleitung	1
1.1 Zum vorliegenden Buch	3
1.2 Geschichte	10
1.3 Referenzen.....	17
2 Methoden der Trauma-Biomechanik	19
2.1 Statistik, Feldstudien, Datenbanken	19
2.2 Grundlagen der Biomechanik	24
2.3 Verletzungskriterien, Verletzungsindizes und Verletzungsrisiko	29
2.4 Unfallrekonstruktion	34
2.5 Experimentelle Untersuchungen	39
2.6 Standardisierte Testverfahren	45
2.6.1 Crashtest-Dummys	53
2.7 Numerische Simulationen	62
2.8 Zusammenfassung	67
2.9 Referenzen	68
3 Kopfverletzungen	71
3.1 Anatomie des Kopfes	71
3.2 Verletzungen und Verletzungsmechanismen	74
3.3 Mechanisches Verhalten des Kopfes	79
3.4 Verletzungskriterien für Kopfverletzungen	84
3.4.1 Head Injury Criterion (HIC)	85
3.4.2 Head Protection Criterion (HPC)	87
3.4.3 3 ms Kriterium (a_{3ms})	87
3.4.4 Generalized Acceleration Model for Brain Injury Threshold ...	87
3.5 Kopfverletzungen im Sport	89
3.6 Prävention von Kopfverletzungen.....	95
3.6.1 Prävention von Kopfverletzungen bei Fussgängern	96
3.7 Zusammenfassung	99
3.8 Referenzen.....	99

4	Verletzungen der Wirbelsäule	105
4.1	Anatomie der Wirbelsäule	106
4.2	Verletzungsmechanismen	110
4.3	Biomechanisches Verhalten und Toleranzen	119
4.4	Verletzungskriterien	124
4.4.1	NIC	126
4.4.2	N_{ij}	127
4.4.3	N_{km}	128
4.4.4	LNL	132
4.4.5	Verletzungskriterien in ECE und FMVSS	133
4.4.6	Weitere Verletzungskriterien	134
4.4.7	Korrelation zwischen Verletzungskriterien und -risiko	135
4.5	Wirbelsäulenverletzungen im Sport	138
4.6	Prävention von HWS-Verletzungen	141
4.6.1	Kopfstützen-Geometrie und -Material	142
4.6.2	Systeme zur Optimierung der Kopfstützen-Position	144
4.6.3	Systeme mit kontrollierter Bewegung des Sitzes	146
4.7	Zusammenfassung	149
4.8	Referenzen	149
5	Thoraxverletzungen	157
5.1	Anatomie des Thorax	157
5.2	Verletzungsmechanismen	160
5.2.1	Rippenfrakturen	162
5.2.2	Lungenverletzungen	163
5.2.3	Verletzungen anderer Organe des Thorax	164
5.3	Biomechanisches Verhalten	166
5.3.1	Frontale Belastungen	167
5.3.2	Laterale Belastungen	173
5.4	Verletzungstoleranzen und -kriterien	175
5.4.1	Beschleunigung und Kraft	175
5.4.2	Thoracic Trauma Index (TTI)	175
5.4.3	Compression Criterion (C)	176
5.4.4	Viscous Criterion (VC)	177
5.4.5	Combined Thoracic Index (CTI)	177
5.4.6	Weitere Kriterien	178
5.5	Thorax-Verletzungen im Sport	179
5.6	Zusammenfassung	179
5.7	Referenzen	180

6 Verletzungen des Abdomens	183
6.1 Anatomie des Abdomens	183
6.2 Verletzungsmechanismen.....	185
6.3 Bestimmung des biomechanischen Verhaltens	188
6.4 Verletzungstoleranzen	190
6.4.1 Verletzungskriterien	191
6.5 Einfluss des Sicherheitsgurtes	192
6.6 Verletzungen des Abdomens im Sport.....	193
6.7 Zusammenfassung	194
6.8 Referenzen	194
7 Verletzungen des Beckens und der unteren Extremitäten	197
7.1 Anatomie der unteren Extremitäten	197
7.2 Verletzungsmechanismen.....	200
7.2.1 Verletzungen des Beckens und des proximalen Femurs	204
7.2.2 Bein-, Knie- und Fussverletzungen.....	206
7.3 Belastungstoleranzen für Becken und untere Extremitäten	209
7.4 Verletzungskriterien	214
7.4.1 Kompressionskraft	214
7.4.2 Femur-Kraft-Kriterium (Femur Force Criterion, FFC)	214
7.4.3 Tibia Index (TI)	214
7.4.4 Weitere Kriterien.....	215
7.5 Verletzungen von Becken und unteren Extremitäten im Sport.....	216
7.6 Prävention.....	220
7.6.1 Massnahmen zum Fussgängerschutz	221
7.7 Zusammenfassung	223
7.8 Referenzen.....	223
8 Verletzungen der oberen Extremitäten	227
8.1 Anatomie	227
8.2 Verletzungshäufigkeiten und -mechanismen	229
8.3 Verletzungstoleranzen	232
8.4 Verl.-kriterien und Bewertung des Verl.-risikos durch Airbags ..	234
8.5 Verletzungen der oberen Extremitäten im Sport	236
8.6 Zusammenfassung	241
8.7 Referenzen	242
9 Schädigungen und Verletzungen durch chronische Belastung	247
9.1 Arbeitsmedizin	251
9.2 Sport	254
9.2.1 Allgemeine Betrachtungen.....	254

9.2.2 Kontakt-Sportarten	256
9.3 Hausarbeit.....	256
9.4 Zusammenfassung	257
9.5 Referenzen	257
10 Index	261

Aus Gründen der Lesbarkeit verzichten wir darauf, männliche und weibliche Formulierungen zu verwenden. Wir bitten die Leserschaft um Verständnis.

1 Einleitung

Der menschliche Körper wird täglich mechanischen Belastungen ausgesetzt. Einerseits wirken Kräfte, die allgegenwärtig sein können wie die Schwerkraft oder die über grosse Distanzen übertragen werden können wie elektromagnetische Feldkräfte. Andererseits wirkt eine Vielzahl von Kräften, die durch direkte Berührung mit unserer Umwelt entstehen. Auch durch physiologische Prozesse im Körper selbst werden Kräfte auf Organe und das Gewebe ausgeübt. Im Laufe der Evolution war die Entwicklung immer von solchen mechanischen Wechselwirkungen geprägt, teilweise sind solche Kräfte sogar notwendig, damit der Körper einzelne Funktionen — wie beispielweise den Knochenumbau — überhaupt erst ausüben kann.

Die Biomechanik beschäftigt sich in erster Linie mit der Analyse, der Messung und der Modellierung von Auswirkungen verschiedener mechanischer Belastungen auf den menschlichen Körper, untersucht aber auch die Auswirkungen bei Tieren und Pflanzen. Ein quantitativer Ansatz steht dabei im Vordergrund. Die zu untersuchenden mechanischen Belastungen umfassen innere wie äussere Kräfte. Beispiele sind innere Kräfte im molekularen Bereich, durch kontraktile Fasern auf zellulärem Niveau ausgeübte Kräfte wie auch makroskopisch betrachtete Muskelkräfte oder Drücke und Schubspannungen, die durch Körperflüssigkeiten oder andere aktive biologische Transportprozesse einschliesslich der Osmose entstehen. Äussere Kräfte beinhalten Kräfte, die in unserem Alltag auf uns wirken. Dementsprechend umfassen die in der Biomechanik untersuchten Kräfte Grössenordnungen von pN bis MN (kleinere bzw. grössere Kräfte werden quasi nicht betrachtet, da diese entweder kaum einen Effekt auf den Körper haben oder zu dessen vollständiger Zerstörung führen), die während Zeitdauern von Picosekunden bis Jahren auf den Körper einwirken.

Eine mögliche Folge von inneren wie äusseren auf den Körper wirkenden Kräfte ist das Entstehen von Verletzungen. Solche werden üblicherweise mit dem Auftreten von übermässigen äusseren Kräften und/oder dem Auftreten von Kräften in ungünstigen Konstellationen,

Tabelle 1.1 Die 5 häufigsten Todesursachen der Altersgruppe der 15-24jährigen in den USA im Jahr 1998 (National Vital Statistics Report, Vol. 50, No. 15, 2002).

Ursache	%	Anzahl
Unfälle	51.8	12'752
Tötungsdelikte	21.2	5'233
Selbstmorde	16.3	4'003
Krebserkrankungen	6.8	1'670
Herzerkrankungen	3.9	961

insbesondere im Rahmen von Unfällen, in Verbindung gebracht. Tatsächlich stellen Unfälle die häufigste Todesursache von jüngeren Menschen dar (Tab. 1.1). Bei inneren Kräfte hingegen geht man meist davon aus, dass diese durch anatomische oder physiologische Gegebenheiten derart begrenzt werden, dass sie nicht zu Verletzungen führen. Dies muss jedoch nicht immer der Fall sein: Rippenbrüche als Folge intensiver Hustenanfälle, Muskelfaserrisse durch Krämpfe oder endokardiale Blutungen im Falle eines hypovolämischen Schocks sind Beispiele für Verletzungen, die durch den Körper selbst verursacht wurden.

Der Teilbereich der Biomechanik, der sich mit dem Entstehen von Verletzungen durch mechanische Einwirkungen beschäftigt, wird als Verletzungsbiomechanik oder Trauma-Biomechanik bezeichnet. Das vorliegende Buch konzentriert sich auf diesen Aspekt der Biomechanik.

Dabei gilt es viele verschiedene Arten von Verletzungen, unterschiedliche Verletzungsmechanismen und eine Vielzahl von verletzungsinduzierenden Belastungen zu betrachten. Um dieses Spektrum mit der nötigen Tiefe behandeln zu können, ist die Trauma-Biomechanik ein stark interdisziplinär ausgerichtetes Fach. Es umspannt makroskopische Bewegungsanalysen im Sport genauso wie sub-mikroskopische Modellierungen von molekularen Transportvorgängen in Zellmembranen. Da hier lebendes Gewebe mit den ihm eigenen aktiven Prozessen wie Muskelkontraktionen oder elektrochemischen Prozessen im Mittelpunkt steht sind biologische Aspekte involviert. Das über Jahrzehnte gesammelte vielfältige Wissen aus der Mechanik und der Biologie trägt somit erheblich zum Verständnis der Trauma-Biomechanik, dem Verständnis von