

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

Verletzungen auf makroskopischem wie subzellulärem Niveau, bei.

Daher ist ein Grundwissen aus Mechanik, Anatomie und Physiologie notwendig, um ein Grundverständnis der Trauma-Biomechanik entwickeln zu können.

1.1 Zum vorliegenden Buch

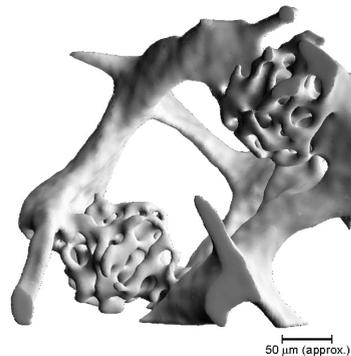
Im Folgenden werden einige Vorbemerkungen zum Inhalt, zur Intention sowie zum Aufbau des Buches aufgeführt:

1. Es ist zu unterscheiden zwischen Verletzungen, die durch unvorhergesehene, plötzliche und einmalige Ereignisse - also durch Unfälle im engeren Sinne - entstehen und Verletzungen infolge chronischer Überbelastung, d.h. durch Belastungen über einen längeren Zeitraum. Der Kopfanprall, den ein Fussgänger im Rahmen einer Kollision durch Anprall an der Fahrzeugfront erfährt und die graduelle Zerstörung von Haarzellen im Innenohr durch chronische Beschallung mit Lärm sind beides Beispiele für Verletzungen, wobei sich jedoch die Art der Verletzung, der Verletzungsmechanismus, die Belastungsgrenzen und Verletzungskriterien, die Methoden zur Rekonstruktion und Analyse der Ereignisse wie auch die Schutzmassnahmen grundsätzlich unterscheiden. Auch im Hinblick auf Versicherungs- und Haftungsfragen sind beide Fälle sehr unterschiedlich zu bewerten.
2. Der Zeitraum, der typischerweise im Rahmen eines Strassenverkehrsunfalls für das Entstehen von Verletzungen relevant ist, beträgt zwischen 100 ms und 200 ms, wobei die frühe Phase oftmals entscheidend ist. Häufig ist sich die involvierte Person der Unfallsituation nicht bewusst, so dass sie nicht im Vorfeld auf die drohende Gefahr reagiert (bzw. reagieren kann). Demnach können Muskelreaktionen, die mit einer Zeitverzögerung von 60 ms bis 80 ms auftreten, oftmals als zweitrangig betrachtet und vernachlässigt werden. Dieser Aspekt ist bei chronischen Belastungen grundsätzlich verschieden, da hier physiologische wie auch psychische Reaktionen immer im Vordergrund stehen.
3. Das Alter stellt einen weiteren wichtigen Aspekt dar. Die mechanischen Eigenschaften menschlichen Gewebes, insbesondere die Verletzungstoleranzen, verändern sich durch das Altern deutlich hin zu geringeren Toleranzen. Dies wird unter anderem durch einen reduzierten Wasseranteil im Körper mit stärkerer (weniger elastischer)

Verknüpfung von Kollagenfasern sowie einer Demineralisierung von Knochen begünstigt. Deutlich häufigere Verletzungen im Alter, vor allem Knochenbrüche, sind die Folge. In diesem Zusammenhang sind auch spontane Brüche bekannt, bei denen der Knochen bereits unter normalen physiologischen Belastungen bricht. In Anbetracht der in den Industrienationen alternden Gesellschaft, verdienen solche Aspekte besondere Aufmerksamkeit.

4. Auch am anderen Ende der Altersspanne, den Heranwachsenden, sind bezüglich Trauma-Biomechanik erhebliche Veränderungen der mechanischen und biologischen Eigenschaften zu beachten. Hinsichtlich der Beschreibung dieser Eigenschaften bestehen jedoch noch grosse Wissenslücken, da Experimente mit Kindern oder gar Leichenversuche kaum denkbar sind. Das Skalieren entsprechender an Erwachsenen bestimmten Eigenschaften auf Kinder ist schwierig ("Kinder sind keine kleinen Erwachsenen"). Die Entwicklung von Kinder-Crashtest-Dummys (siehe Kap. 2.6.1) ist daher nicht einfach. Wegen des Mangels an experimentellen Daten basieren die meisten Arbeiten zu Verletzungen bei Kindern auf statistischen Analysen. Ein signifikanter Beitrag zu diesem Themengebiet wurde beispielsweise durch "The Center for Injury Research and Prevention at The Children's Hospital of Philadelphia" geleistet (<http://stokes.chop.edu/programs/injury/>).
5. Pathologische Veränderungen können die mechanischen Eigenschaften der Körpers erheblich verändern. Aus der Urologie sind beispielsweise Nierenverletzungen als Folge von Spannungskonzentrationen im Bereich einer Zyste bekannt. Auch die Verstärkung von vorbestehenden Nackenbeschwerden durch ein zusätzliches "Schleudertrauma" (siehe auch Kap. 4) wurde mehrfach beschrieben.

Abb. 1.1 Mikrokallus Bildung. Das Bild zeigt eine 3D Aufnahme (Mikro-Computertomographie, μ -CT) einer Biopsie aus dem menschlichen Beckenkamm. Mikrofrakturen haben die Neubildung von Knochen initiiert [Prof. R. Müller, ETH Zürich].



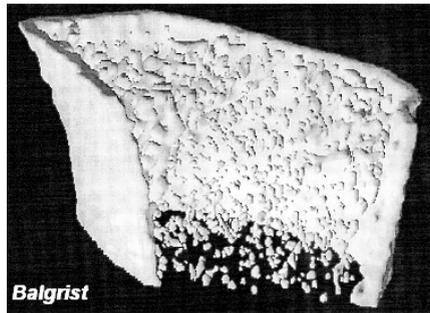


Abb. 1.2 28jährige Frau (links) und μ -CT Aufnahme deren Radius (Elle) nahe dem Handgelenk (rechts). Die extreme Demineralisierung des Knochen ist auf exzessives Training als Marathonläuferin zurückzuführen [Prof. Dr. med. M. Dambacher, Universitätsklinik Balgrist, Zürich].

6. Unter ganz bestimmten Bedingungen könnten Mikro-Verletzungen auf zellulärem Niveau bis zu einem gewissen Grade auch vorteilhaft sein. Abbildung 1.1 zeigt die Mikro-Kallusbildung als Folge von Mikro-Verletzungen in spongösem Knochen, die als Beispiel für eine Verletzungen, die Knochenbildung simuliert, betrachtet werden kann. Nach langen, anstrengenden Bergwanderungen sind solche Mikro-Verletzungen auch im gesunden Fuss nicht aussergewöhnlich. Chronische Überbelastung hingegen kann zu einer gegenteiligen Entwicklung führen. Abbildung 1.2 zeigt eine Marathonläuferin, deren Skelett durch exzessives Training stark demineralisiert wurde.
7. Verletzungen werden meistens im Zusammenhang mit Bewegung (Sport, Haushalt usw.) oder Mobilität (Verkehr) erlitten. Während in der Biologie Tierexperimente (unter entsprechenden Auflagen) üblich sind, finden diese in der Trauma-Biomechanik, mit Ausnahme weniger allgemeingültiger physiologischer Aspekte, quasi keine Anwendung mehr. Wegen der den interessierenden Bewegungen und Verletzungsmechanismen zugrunde liegenden Nicht-Linearität kann nicht von Tierexperimenten (z.B. Versuchen mit Ratten) auf den Menschen geschlossen werden.
8. Betrachtet man das gesamte Spektrum rund um "Verletzungen" einschliesslich deren Ursachen, Häufigkeit, Prävention, Heilung, Rehabilitation, Langzeitfolgen und den sozioökonomischen Folgen, so sind auch klinische Aspekte der Behandlung von Verletzungen zu berücksichtigen. Häufig wird vergessen, dass die Reduktion der

spezifischen Mortalität (d.h. des Sterberisikos pro Fall) auch durch Entwicklungen der Notfall- und Intensivmedizin sowie der Rettungsdienste positiv beeinflusst wird. Als ungünstig fällt hingegen auf, wenn Verletzungsmechanismen oder Unfälle durch Ärzte untersucht und beurteilt werden, die hierfür nicht ausgebildet sind und/oder denen die entsprechende Kompetenz fehlt. Die objektive Beurteilung von Unfällen - insbesondere im Zusammenhang mit Unfallschwere und Kausalität von Verletzungen - erfordert einen multidisziplinären Ansatz. Zusätzlich zu medizinischen Informationen, die durch klinischen Ärzte erhoben werden, sind die technischen und biomechanischen Umstände bei der Untersuchung und Rekonstruktion von Unfällen zu berücksichtigen. Dies ist insbesondere im Bereich der Gerichtsgutachten relevant. Eine spezialisierte Ausbildung sowie ausreichende Erfahrung sind Voraussetzungen für eine entsprechende Gutachtertätigkeit.

9. Dieses Buch beschränkt sich auf die Mechanik von unbeabsichtigt entstandenen Verletzungen. Grundsätzlich können Verletzungen jedoch auch bewußt verursacht bzw. in Kauf genommen werden — beispielsweise durch Verbrechen, terroristische Akte oder im Krieg. Wundballistik, Schutzrüstung für Soldaten oder spezielle wenig verletzungsinduzierende Waffen für die Polizei wären in diesem Zusammenhang zu nennen. An solchen Themenkomplexen interessierte Leser werden auf entsprechende Veröffentlichungen des Internationalen Komitees des Roten Kreuzes (<http://www.icrc.org>) verwiesen. Die allgemeine Signifikanz von beabsichtigt zugeführten Verletzungen sollte jedoch nicht unterschätzt werden. In den USA wurden 2001 beispielsweise rund 12'000 Personen durch Schusswaffen getötet (ohne Unfälle mit Schusswaffen). Zum Vergleich: im Strassenverkehr starben im gleichen Jahr rund 11'000 Fahrzeugpassagiere (ohne Fahrer). Selbstmord ist eine weitere häufige Todesursache (Tab. 1.1). In diesem Zusammenhang sind insbesondere nicht-technische (u.a. soziale, politische, psychologische, allgemeine gesellschaftsbezogene) Aspekte in Betracht zu ziehen. Studien zum Einfluss physischer Gewalt in der Kindheit beinhalten beispielsweise die intensive Analyse sozio-psychologischer Faktoren [z.B. Paradis et al. 2009].
10. Am Besten ist es, wenn Verletzungen erst gar nicht auftreten. Dementsprechend genießt die Verletzungsprävention hohe Priorität. Im Strassenverkehr sind Maßnahmen zur Vermeidung von Unfällen bereits seit langem implementiert und als staatliche Aufgabe anerkannt. Im Gegensatz dazu wird die Prävention im Sportbereich primär als

Aufgabe nationaler und internationaler Sportverbände bzw. als Teil der Sportmedizin betrachtet. Restriktive Regelwerke, Verbote besonders gefährlicher Formen des Sports, die Entwicklung von Schutzausrüstung wie auch Training und Ausbildung sind Elemente der Prävention. Versicherungsgesellschaften unterstützen Verletzungsprävention als Teil ihrer Philosophie, wobei hier oftmals die Bereiche Arbeit und Haushalt im Mittelpunkt stehen. Während die Prävention auf mögliche zu Verletzungen führende Situationen abzielt, steht nach erlittener und behandelter Verletzung die Rehabilitation im Vordergrund. Auch diesbezüglich werden von staatlichen Stellen, Sportverbänden, Arbeitnehmervereinigungen, der klinischen Medizin wie auch von Versicherungsunternehmen erhebliche Anstrengungen unternommen. Da sich dieses Buch auf die Trauma-Biomechanik beschränkt, werden Aspekte der Prävention und Rehabilitation nur am Rande bzw. nur im Zusammenhang mit ausgewählten Verletzungen behandelt.

In der Trauma-Biomechanik wurden bisher vor allem Strassenverkehrsunfälle systematisch und quantitativ erforscht, obschon auch im Sport, am Arbeitsplatz oder im Haushalt viele Verletzungen auftreten. Hierfür können insbesondere zwei Aspekte verantwortlich gemacht werden:

Erstens geschehen im Strassenverkehr mehr schwere und tödliche Unfälle als in den anderen Bereichen (Tab. 1.2), so dass die damit verbundenen gesellschaftlichen Kosten höher sind. Die Automobilindustrie steht daher auch unter dem Druck politischer Interventionen, Gesetzgebungsinitiativen und Haftungsfragen und wird dadurch zu Forschungs- und Entwicklungsarbeiten angespornt.

Zweitens können Verkehrsunfälle, wengleich sie natürlich wie andere Unfälle auch in einer Vielzahl von Variationen vorkommen, in einige typische bzw. repräsentative Arten eingeteilt werden (z.B. Frontalkollisionen gegen ein Hindernis, 90° Seitenanprall), so dass es möglich wird, für diese Typen standardisierte Testverfahren und Prüfprotokolle zu entwickeln. Im Gegensatz dazu ist es in den Bereichen Sport, Arbeitsplatz oder Haushalt ungleich schwerer, typische Situationen zu definieren, die häufig zu Verletzungen führen. Tabelle 1.3 zeigt, dass (tödliche) Unfälle am Arbeitsplatz in vielen unterschiedlichen Situationen entstehen können.

Tabelle 1.2 Ursachen für tödliche Unfälle in verschiedenen Altersgruppen in den USA im Jahr 2000. Die absolute Anzahl an Todesfälle aufgeteilt auf 113 Kategorien betrug 2'40'351, darunter 29'350 Suizide und 16'765 Morde (National Vital Statistics Report, Vol. 50, No. 15, 2002).

Todesursache vs. Alter (Jahre)	alle	%	<1	1-4	5-14	15-24	25-34	35-44	4 -54	55-64	65-74	75-84	> 85	unbe- kannt
Todesfälle durch Unfälle (total)	97'900	100	881	1'826	2'979	14'113	11'769	15'413	12'278	7'505	7'698	11'758	11'595	85
Verkehrsunfälle (motorisierte Fzg.)	43'354	44.3	168	651	1'772	10'560	6'884	6'927	5'361	3'506	3'038	3'173	1'288	26
Nicht-Verkehrsunfälle (unspezif.)	17'437	17.8	572	266	267	648	895	1'446	1'510	1'349	1'824	3'678	4'966	16
Stürze	13'322	13.6	8	36	37	237	303	608	871	949	1'660	3'841	4'772	-
Vergiftungen	12'757	13.0	14	32	45	1'160	2'380	4'663	3'061	688	278	245	184	7
Ertrinken	3'482	3.6	75	493	375	646	419	480	354	217	179	156	64	24
andere Verkehrsunfälle (Transport)	3'395	3.5	6	40	150	468	516	734	604	377	277	169	47	7
Verbrennen	3'377	3.4	37	290	266	192	241	402	439	369	401	472	263	5
Feuerwaffen (unbeabsichtigt)	776	0.8	1	18	67	202	131	153	78	50	41	24	11	-

Tabelle 1.3 Tödliche Arbeitsunfälle 1994 (US Bureau of Labor Statistics).

Ursache	%
Unfälle Verkehr/Transport	42
Gewalt	20
Arbeitsmaschinen, herabstürzende Objekte	15
Umweltkontamination	10
Stürze	10
Feuer/Explosion	3

Verglichen mit Publikationen zu Strassenverkehrsunfällen ist die Literatur zu Verletzungen im Sport usw. — obschon reichlich vorhanden — aus biomechanischer Sicht weniger stringent. Sie beschränkt sich häufig auf allgemeine Statistiken, qualitative Beschreibungen von Verletzungsmechanismen, medizinische Therapieansätze oder praktische Empfehlungen für Trainer oder zur Arbeitsplatzsicherheit. Quantitative Untersuchungen sind hingegen nur relativ wenige vorhanden. Stattdessen werden quantitative Aussagen zu Verletzungsgrenzen oder Verletzungskriterien auch in diesen Bereichen meistens aus Untersuchungen zu Strassenverkehrsunfällen abgeleitet bzw. übernommen. Zudem fällt auf, dass Untersuchungen zu Sportunfällen vor allem in denjenigen Disziplinen durchgeführt wurden, in denen grosse Geldsummen umgesetzt werden wie beispielsweise Fussball, American Football oder Skifahren. Weniger prominente Sportarten wurden auch in der Forschung weniger oft behandelt.

Verglichen mit Unfällen sind bei Verletzungen durch chronische mechanische (Über-) Belastung die individuellen anatomischen und physiologischen Gegebenheiten von grösserer Bedeutung. Die Unterscheidung zwischen einer Schädigung durch chronische Belastung und einer Invalidität durch eine Erkrankung, die nicht mit der entsprechenden Belastung in Verbindung steht, ist oftmals schwierig oder unmöglich. Psychische Einflüsse sind in diesem Zusammenhang sehr wichtig. Quantitative Informationen sind dünn gesät. Bestimmungen zu Belastungen durch Schwingungen von Baumaschinen oder hinsichtlich des Lärmpegels in Fabriken basieren primär auf Langzeitstatistiken und nicht

auf physiologischen Experimenten.

Aus den oben dargelegten Gründen beschäftigt sich dieses Buch hauptsächlich mit Trauma-Biomechanik im Bereich der Strassenverkehrsunfälle. Nach einem allgemeinen Kapitel zu Grundlagen widmen sich die nachfolgenden Kapitel je einer Körperregion. Diese Kapitel sind systematisch aufgebaut und beginnen mit einer kurzen Zusammenfassung der im Zusammenhang mit Verletzungsmechanismen relevanten anatomischen Strukturen. Zudem werden je Körperregion mögliche Verletzungen, die zugrunde liegenden Verletzungsmechanismen sowie das biomechanische Verhalten unter Belastung beschrieben. Grenzwerte für verletzungsinduzierende Belastungen und davon abgeleitete Verletzungskriterien, mit denen das Verletzungsrisiko beurteilt werden kann, werden vorgestellt. Zu Sportverletzungen finden sich jeweils eigene Abschnitte, in denen die relevanten Verletzungen, Verletzungsmechanismen und Verletzungstoleranzen für diesen Bereich dargestellt werden. Zu ausgewählten Teilbereichen werden zudem Möglichkeiten der Verletzungsprävention diskutiert. Des Weiteren findet sich ein kurzes Kapitel zu chronischen, mechanischen Belastungen, wobei in diesem Zusammenhang auch viele Aspekte von Ergonomie, allgemeine Arbeitsplatzsicherheit oder Arbeitsmedizin wichtig sind, die hier nicht behandelt werden. Zusätzliche Informationen finden sich beispielsweise auf der Internetseite der US Occupational Safety and Health Administration (<http://www.osha.gov>). Für vertiefendes bzw. weiterführendes Lesen schliesst jedes Kapitel mit einer Literaturliste ab.

1.2 Geschichte

Biomechanik als Wissenschaft ist genauso alt wie die Mechanik selbst. Während sich beispielsweise Giovanni Alfonso Borelli (1608 - 1679) mit dem Vogelflug und dem Schwimmen der Fische beschäftigte, schrieb Leonhard Euler (1707 - 1783), der die Grundlagen der Kontinuumsmechanik legte, eine ausführliche Abhandlung über den Blutfluss in Arterien ("Principia pro motu sanguinis per arterias determinando", op. posth.). Bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts wurde die Mechanik von Verletzungen bzw. die Trauma-Biomechanik jedoch nicht systematisch erforscht. Dies könnte daran gelegen haben, dass Gefahren allgegenwärtig waren und Verletzungen einfach als zum Leben gehörend betrachtet wurden. Man sollte nicht vergessen, dass es in Europa vor 1945 für 2000 Jahre quasi keine Periode von mehr als 15 Jahren ohne Krieg

gegeben hatte. Verletzungsprävention wurde direkt und pragmatisch umgesetzt, z.B. in Form von Ritterrüstungen.

Der erste bekannte systematische und wissenschaftliche Ansatz in Richtung Trauma-Biomechanik stammt vom deutschen Anatomen Otto Messerer aus München, der im Jahr 1889 die Ergebnisse seiner Forschung unter dem Titel "Über Elastizität und Festigkeit der menschlichen Knochen" veröffentlichte. In der Forensik ist der sogenannte "Messerer-Keil" (die Beschreibung eines speziellen Frakturbildes) heute noch bekannt.

Wie bereits erwähnt, konzentriert sich die Trauma-Biomechanik heute hauptsächlich auf Verkehrsunfälle. Historisch liegen die Wurzeln jedoch in der Aviatik. Anlässlich der "1st National Conference on Street and Highway Safety" (USA 1924) standen vor allem einfache und praktische Aspekte der Verkehrssicherheit, wie beispielsweise die Farbe von Lichtsignalanlagen (Ampeln) oder die Fahrerausbildung im Vordergrund, während die Trauma-Biomechanik keine besondere Rolle spielte. Im Gegensatz dazu war die Trauma-Biomechanik zu dieser Zeit bereits im Bereich der militärischen Fliegerei, in der der menschliche Körper extremen mechanischen Belastungen ausgesetzt ist, ein wichtiges Thema. Insbesondere Hugh DeHaven, von manchen als der "Vater der Trauma-Biomechanik" bezeichnet, begann mit der Analyse von Flugzeugabstürzen und den involvierten Verletzungsmechanismen. 1942 publizierte er seine Arbeit "Mechanical Analysis of Survival in Falls from Heights of 50 - 100 Feet" ("Mechanische Untersuchung zum Überleben von Stürzen aus Höhen von 15,2 - 30,5m"). Auch in den darauffolgenden Jahren blieb die Militäraviatik im Zentrum der Trauma-Biomechanik-Forschung. Die Belastungen bei Überschallflügen oder der Ausstieg mittels Schleudersitz waren wichtige Forschungsthemen. Zudem wurden grundlegende Methoden im Bereich der Trauma-Biomechanik eingeführt, z.B. die Durchführung von Freiwilligenversuchen zur Untersuchung des biomechanischen Verhaltens des Körpers unter subkritischen Belastungen oder die Entwicklung von anthropometrischen Testpuppen (Crashtest-Dummys).

Der wahrscheinlich berühmteste Pionier der Trauma-Biomechanik in der Aviatik war Colonel John Paul Stapp. Er wurde insbesondere für seine experimentellen Arbeiten berühmt. Zu diesen gehören auch verschiedene Selbstversuche, in denen er sich unterschiedlichen Belastungen aussetzte. In einer seiner spektakulären Testreihen Anfang der 1950er Jahre setzte sich Stapp auf einen von einer Rakete angetriebenen Schlitten und liess sich ausgehend von einer Geschwindigkeit von ca. 1000 km/h in 1.4s bis zum Stillstand abbremsen. Er erfuhr dadurch eine Beschleunigung

(Abbremsung) von etwa dem 40fachen der Erdbeschleunigung (Abb. 1.3). Schwere Verletzungen zog er sich bei diesem Experiment nicht zu. Stapp, von der Zeitschrift Time zu "the fastest man on earth and No. 1 hero of the Air Force" gekürt (Time, September 12/1955), gründete zudem die jährlich stattfindenden Stapp Car Crash Conference, einer Konferenz zu Trauma-Biomechanik-Themen. John P. Stapp starb 1999 im Alter von 89 Jahren.

Auch Entwicklungen aus dem Bereich der Astronautik — obschon dort Untersuchungen zum Einfluss der Schwerelosigkeit im Mittelpunkt standen — haben die Trauma-Biomechanik beeinflusst. Das erste Computermodell zur dreidimensionalen Simulation von Bewegungen des Menschen (R.D. Young, Texas A&M, 1970) wurde im Zusammenhang mit der Analyse von Bewegungsmustern unter Schwerelosigkeit (d.h. beim Wegfall äusserer Kräfte) entwickelt. McHenry (Calspan Corp., Buffalo) erstellte das erste Computermodell zur Bewegungsanalyse im Falle einer Frontalkollision im Strassenverkehr. Da in diesem Fall der Einfluss äusserer Kräfte wichtig ist, beschäftigte sich ein grosser Teil der Modellbildung mit der Wechselwirkung bzw. dem Kontakt zwischen dem menschlichen Körper und den ihn umgebenden (Fahrzeug-) Strukturen. Dadurch wurden die



Abb. 1.3 Colonel Stapp auf dem Raketen getriebenen Schlitten "Sonic Wind No. 1" sitzend, mit dem er sich einer Beschleunigung von 40g aussetzte [<http://www.stapp.org>].

Modelle für damalige Verhältnisse derart komplex, dass anfangs nur zweidimensionale Berechnungen möglich waren.

In den Anfängen des Strassenverkehrs wurde Sicherheit primär mit dem Fahrer bzw. dem Fahrstil in Verbindung gebracht. Die Sicherheit des Fahrers und seiner Passagiere wie auch die der anderen Verkehrsteilnehmer war quasi ausschliesslich eine Frage des Fahrstils des Fahrers. Rückhaltesysteme wurden angedacht (Abb. 1.4) waren aber vor dem 2. Weltkrieg nicht sehr verbreitet. Nichtsdestotrotz verbesserte sich die Konstruktion der Fahrzeuge zwischen den 1920er und 1930er Jahren auch zum Vorteil der Sicherheit. Beispielsweise wurden zuverlässige Bremssysteme und laminierte Frontscheiben eingeführt. Weitere Entwicklungen betrafen die Beleuchtung sowie die Räder (z.B. schlauchlose Reifen). Fahrzeugstrukturen aus Stahl ersetzen Holzbauteile und erhöhten somit die Steifigkeit der Fahrzeuge.

Nach dem 2. Weltkrieg nahm die Mobilität schnell zu, womit auch eine dramatische Zunahme der im Strassenverkehr erlittenen Verletzungen einherging, so dass diese Gegenstand detaillierter Untersuchungen wurden.

Das "Automotive Crash Injury Research programme" (ACIR, Cornell University, 1951) war ein früher systematischer Ansatz zur Untersuchung von Verletzungen im Strassenverkehr. Ein entscheidender Fortschritt war die Umsetzung der Kombination aus steifer Fahrgastzelle und vorgelagerter

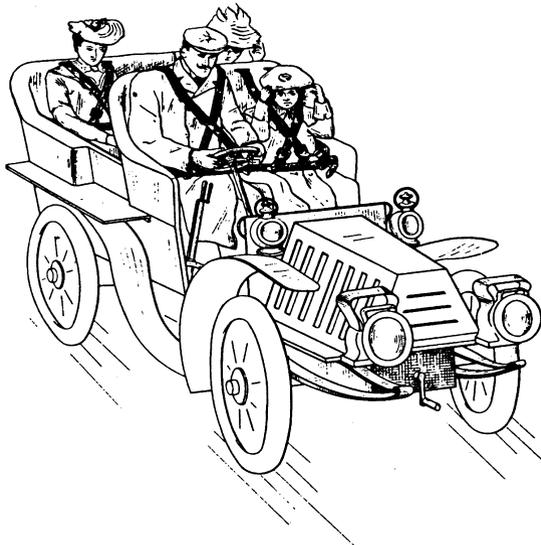


Abb. 1.4 Patent über Sicherheitsgurte von Gustave D. Lebau (1903). Statt zur Sicherheit im Falle einer Kollision dienten die Gurte in erster Linie dazu, die Passagiere während der Fahrt (über unebene Strassen und ohne Stossdämpfer) in den Sitzen zu halten.

Knautschzone. Auch das Lenkrad wurde als mögliche Quelle für Verletzungen identifiziert und stand daher im Mittelpunkt verschiedener Forschungs- und Entwicklungsprojekte, die beispielsweise zur Einführung von energieabsorbierenden Lenksystemen führten. Weitere Verbesserungen betrafen das Crash-Verhalten des Armaturenbretts, die Entwicklung von Rückhaltesystemen wie dem 3-Punkt-Gurt und dem Airbag. Die Begriffe "passive" und "aktive" Sicherheit wurden eingeführt und Fahrzeughersteller begannen mit der Durchführung von systematischen Crashtests und entsprechenden Computersimulationen. Eine umfangreiche Zusammenfassung der Forschung zur Fahrzeugsicherheit bis 1970 findet sich im International Automobile Safety Conference Compendium (1970, SAE, New York).

Im Rahmen der passiven Fahrzeugsicherheit können Maßnahmen auf verschiedenen Ebenen ergriffen werden. Erstens können Verletzungen konstruktiv durch verbesserte Crash-Eigenschaften des Fahrzeugs reduziert werden. Dies beinhaltet insbesondere die Entwicklung von Energie absorbierenden Strukturen. Zweitens kann die Insassenbewegung im Falle einer Kollision kontrolliert werden. Rückhaltesysteme wie der Sicherheitsgurt zielen darauf ab, die Insassen in der vorgesehenen Position zu halten und koppeln die Bewegung der Insassen an das Fahrzeug. Drittens kann der eigentliche Anprall, d.h. der Kontakt zwischen dem menschlichen Körper und den ihn umgebenden Strukturen beeinflusst werden. Hierbei spielen Energieabsorption und die Verteilung der Aufprallkräfte auf der Kontaktfläche eine grosse Rolle.

Aktive Sicherheit wiederum beschreibt hier Systeme, die den Fahrer unterstützen, um einen Anprall zu verhindern bzw. Systeme, die vor dem Anprall aktiv werden. Beispiele sind ABS-Bremssysteme, Abstandsradar und diverse Fahrassistenzsysteme.

In Ergänzung zu (fahrzeug-) technischen Möglichkeiten bemühen sich auch staatliche Stellen um eine Verbesserung der Sicherheit auf den Strassen. Nach dem 2. Weltkrieg richteten sich erste Programme die Ausbildung von Fahrern, Verkehrsregeln oder die Entwicklung der Verkehrswege um die Sicherheit zu erhöhen. Die Gestaltung sowie der Bau von Strassen oder die Überwachung von Verkehrsvorschriften und Geschwindigkeitsbegrenzungen sind wichtige Beiträge des Staates zur Verbesserung der Verkehrssicherheit.

Die Reduktion der im Strassenverkehr verletzten und getöteten Personen, die die amtlichen Statistiken der letzten Jahre in vielen Staaten ausweisen (Abb. 1.5), kann teilweise mit den Anstrengungen im Bereich der Trauma-Biomechanik erklärt werden, die sich auf die lebensbedrohlichen Verletzungen konzentrierten. Wie bereits erwähnt, ist der Strassenverkehr

jedoch nur ein Teilgebiet, in dem Verletzungen auftreten. Verletzungen, die bei Arbeitsunfällen, im Sport oder sonst im Alltag erlitten werden, sind ebenfalls bedeutend. In Industriestaaten (z.B. USA, 2002) wird mitunter die Anzahl der im Strassenverkehr Getöteten durch die Anzahl der in anderen Unfallereignissen Getöteten übertroffen (Tab. 1.2).

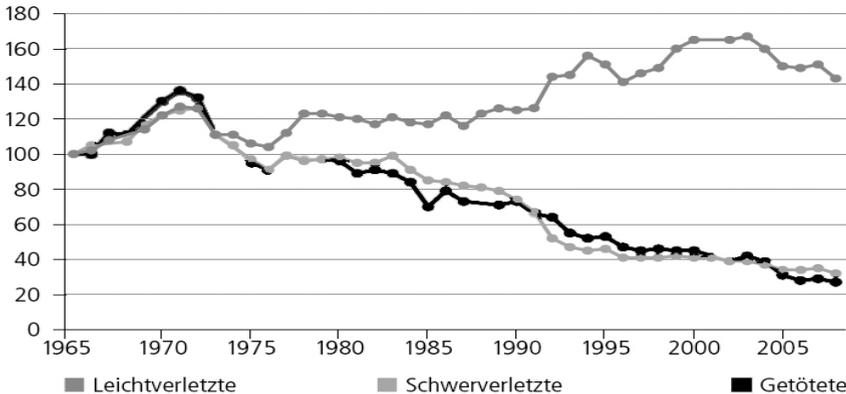


Abb. 1.5 Entwicklung der Anzahl von im Strassenverkehr verletzten und getöteten Personen in der Schweiz. Die Anzahl der leicht Verletzten stagniert auf hohem Niveau [bfu 2009].

Der Vergleich der Sportunfälle in der Schweiz und den USA (Tab. 1.4) veranschaulicht einerseits die Unterschiede, die durch die verschiedene Grösse der Länder auftreten, zeigt aber zugleich den Einfluss lokaler Eigenheiten, die zu erheblichen Unterschieden der Statistik führen können. Die riesige Zahl der Sportunfälle verdeutlicht zudem, dass diese in der Regel nicht lebensbedrohlich sind. Globale Statistiken zeigen tatsächlich, dass vor allem Verkehrsunfälle tödlich verlaufen: während die Weltgesundheitsorganisation (WHO) die Anzahl der im Strassenverkehr Getöteten im Jahr 2002 weltweit auf 1.2 Mio. Personen schätzt, ging die International Labour Organisation (ILO) im Jahr 1998 von “nur” 335.000 tödlichen Arbeitsunfällen aus. Die Expositionszeit, d.h. die Zeitdauer, in der man die verschiedenen Aktivitäten ausübt, kann ein entsprechender Indikator für das mit der jeweiligen Tätigkeit verbundene Risiko sein. Tabelle 1.5 zeigt, dass die Teilnahme am Strassenverkehr — dank den unternommenen Anstrengungen zur Sicherheit — nicht per se übermässig risikoreich ist, wenn man sie anderen Aktivitäten gegenüberstellt. Die hohe Expositionszeit im Strassenverkehr macht diesen Effekt jedoch zunichte.

Tabelle 1.4 Anzahl Sportunfälle in den USA (aus: Charles W. Nuttall, 5th Int. High Energy Physics Laboratories Technical Safety Forum, SLAC, 2005) und in der Schweiz (gemäss: Beratungsstelle für Unfallverhütung (bfu), 2005). In beiden Ländern werden verschiedene Sportarten bevorzugt: während American Football und Baseball in der Schweiz kaum gespielt werden, sind Fussball und Skifahren sehr populär.

Sport	USA, 1997	Schweiz, 2003
Basketball	644'921	5880
American Football	344'420	na
Baseball, Softball	326'569	na
Fussball	148'912	55'040
Trampolin	82'722	na
Skateboard	48'186	10'330
Golf	47'777	na
Skifahren	na	49'660
Snowboarden	na	28'890
Schlitten, Bob	na	10'800

Tabelle 1.5 Geschätztes Risiko eines tödlichen Unfalls (Fatal Accident Rate, FAR) je nach Expositionszeit und individuellem Risiko pro Person und Jahr (gemäss: Practical Industrial Safety, Risk Assessment and Shutdown Systems, Dave McDonald, Elsevier 2004).

Tätigkeit	FAR pro 10^8 h Exposition	individuelles Sterberisiko pro Person und Jahr ($\times 10^4$)
Reisen im:		
Flugzeug	na	0.02
Zug	3-5	0.03