

5. Klinische und biomechanische Untersuchungen Etudes cliniques et biomécaniques

Biomechanische Belastungsgrenzen und Unfallanalyse

Felix H. Walz¹, Gerichtlich-Medizinisches Institut der Universität Zürich

1. Biomechanik

In *Abbildung 1* wird versucht, die Verknüpfung der Fachgebiete darzustellen, welche die Biomechanik tangieren. Ein Bereich der Biomechanik, die allgemein mechanische Phänomene in der Biologie und ihre Rolle in physiologischen und pathophysiologischen Vorgängen beschreibt, beinhaltet die Erforschung von Verletzungsmechanismen und der mechanischen Belastbarkeit des menschlichen Körpers bei Unfällen. Den Entwicklungsingenieuren von Fahrzeugen (oder im weiteren Sinne von Maschinen) sollen allgemeingültige biomechanische Belastungsgrenzen, Verletzungs- und Schutzkriterien für den «Durchschnittsmenschen» angegeben werden. Innerhalb eines Bereiches, abgesteckt einerseits durch diese noch

tolerierbaren Grenzwerte und andererseits durch die Rahmenbedingungen der Arbeitsvorgänge, muss versucht werden, durch konstruktive Änderungen den Bewegungsablauf des in einen «Standardunfall» verwickelten «Durchschnittsmenschen» zu optimieren und dadurch das Verletzungsrisiko zu senken. Bei Verkehrsunfällen ist es nur mittels Geschwindigkeitsbegrenzungen zu erreichen, dass die biomechanisch relevanten Werte bei Kollisionen in Bereichen liegen, die eine sinnvolle Analyse ermöglichen. In der Unfallbiomechanik spricht man bei einer Kollisionsgeschwindigkeit von 50 km/h von einer hohen Belastung. Dabei sind Unfallabläufe gemeint, die vergleichbare Belastungen wie ein Aufprall mit 50 km/h (ETS)² gegen eine feste Wand zur Folge haben. Je nach Dauer

¹ Dr. med., Oberarzt, Gerichtlich-Medizinisches Institut der Universität Zürich, Postfach, CH-8028 Zürich.

² ETS = Equivalent Test Speed; entspricht der Kollisionsschwere eines Wandaufpralles mit dieser Geschwindigkeit.

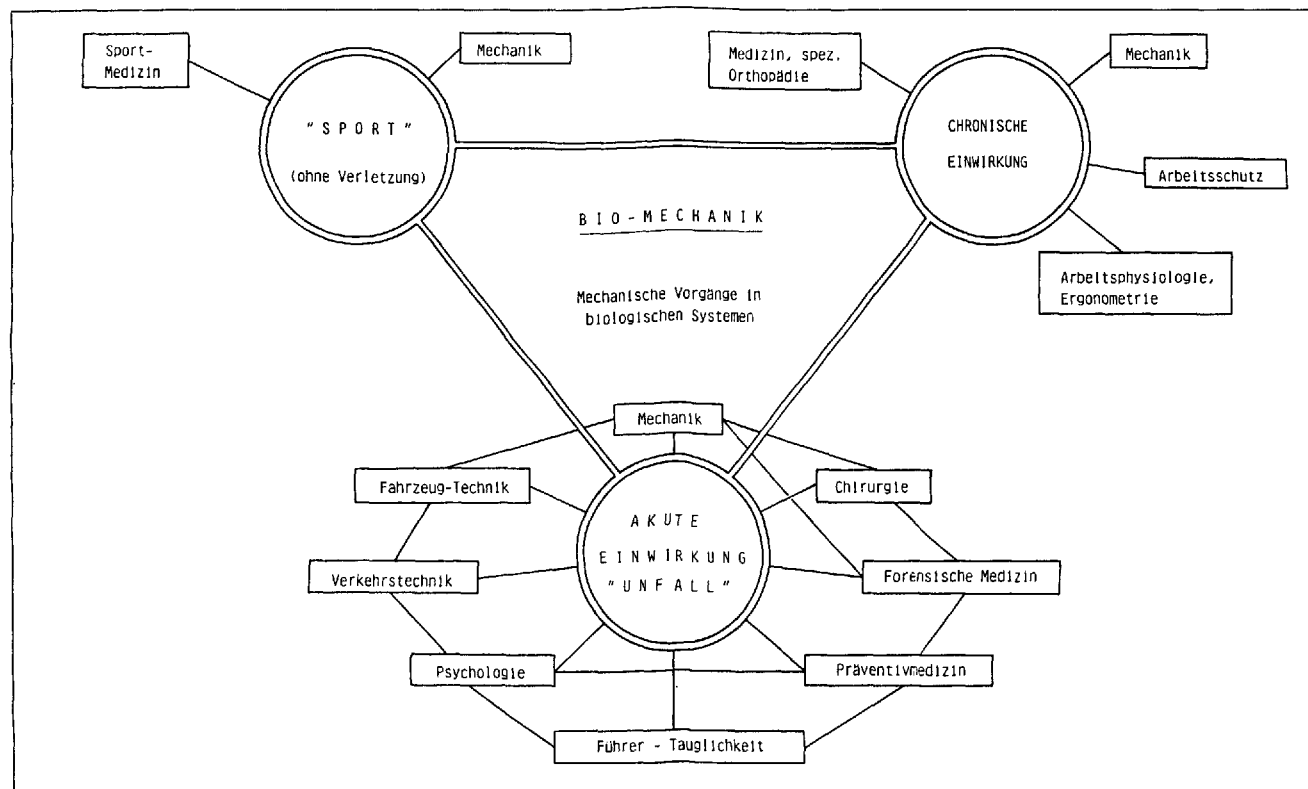


Abb. 1. Mögliche Einteilung der Biomechanik äusserer Einwirkungen.

des Bremsvorganges liegt die Kollisionsgeschwindigkeit geringfügig oder wesentlich unterhalb der Fahrge-
schwindigkeit. Dem Fachmann sind keinerlei Aussagen über die allfälligen Folgen einer «Auto-Auto-
Kollision mit 50 km/h» möglich. Schon von der Mecha-
nik her sind viele Angaben zu präzisieren: Wie schwer
waren die beiden Fahrzeuge? Welches war der Auf-
prallwinkel für das eine bzw. das andere Fahrzeug?
Handelte es sich um neue oder alte Fahrzeugkonstruk-
tionen? Ist 50 km/h eine Angabe über die Fahr- oder
die effektive Kollisionsgeschwindigkeit? Im biomecha-
nisch-forensischen Bereich werden folgende Fragen
relevant: Waren die Insassen durch Rückhaltesysteme
gesichert? Was für Systeme waren es, und wie wurden
sie verwendet? Wer sass wo im Fahrzeug? Wie alt
waren die Insassen? Sind vorbestehende Krankheiten
oder Gebrechen bekannt?

**2. Belastungsgrenzen, Verletzungs- und
Schutzkriterien**

Als Belastungsgrenzen gelten beispielsweise «Kno-
chenbruch» oder «Organschädigung», als Verletzungs-
kriterien die Grenzen zwischen «zulässigen» und
«nicht zulässigen» Verletzungen, ausdrückbar durch
Verletzungsskalen (z. B. Abbreviated Injury Scale³,
AIS [2]; Einteilung der Verletzungen in sechs Schwe-
regrade). Als Schutzkriterien werden Grenzwerte
bezeichnet, die bei mechanischen Belastungen von
Versuchspuppen (Dummies) nicht überschritten wer-
den sollen.

Solche Versuchspuppen bilden die Grundlage zur
Festlegung gesetzlicher Sicherheitsnormen. Die Dum-
mies eignen sich zum Studium von Bewegungsvorgän-
gen; zur Analyse von Verletzungsmechanismen hinge-
gen sind sie aufgrund der inneren, wenig menschen-
ähnlichen Struktur noch nicht brauchbar. Immerhin
bieten sie bis heute die einzige Möglichkeit, die
«crashworthiness» («Kollisionstauglichkeit») von
unterschiedlichen Fahrzeugen zu quantifizieren und zu
vergleichen.

Die biomechanischen Grenzwerte werden aus Versu-
chen mit toten und lebenden Tieren, Versuchen mit
menschlichen Leichen, der Analyse realer Unfälle und
Simulationen mit Dummies gewonnen. Im niedrigen
Belastungsbereich können auch Freiwilligenversuche
wichtige Fixpunkte setzen. Die Extrapolation der
Werte solcher Versuche auf die Belastung eines Men-
schen bei einem realen Unfall ist nur mit Einschrän-
kungen möglich. Es wird ohnehin nur möglich sein,
Belastungsgrenzen für bestimmte Bevölkerungsgrup-
pen anzugeben, da einerseits ältere Leute bei relativ
geringen Traumen bereits schwere und komplikations-
reiche Verletzungen erleiden und andererseits junge,
kräftige Personen massive Traumen mit nur geringen
Verletzungen überstehen können.

Belastungsgrenzen⁴

a) Gesamtorganismus (Ziffer [36], Patrick [21], Viano [32], Stapp [30], Mertz [17])	b (max) b (mittl.)	40–80 g 35–45 g
b) Knöcherner Schädel (Magyar [15], Hodgson [13], Schneider [28])	b (max) Kraft	150–500 g 600–20 000 N
c) Gehirn (Unterharnscheidt [31], Ripperger [23], Sellier [29] Ono [20], Ward [34] Tentorium (Dirnhofner [9])	b (max) b (mittl.) Druck (dyn.) Kraft (dyn.)	50–300 g 80–200 g 2–4 bar 40 N
d) Wirbelsäule (Ziffer [37]) HWS-Fraktur, direktes Trauma (Melvin [16]) – bei normaler WS – bei schwacher WS HWS-Fraktur, indirektes Trauma (Mertz [18]) – Extension – Flexion	 Kraft Kraft Moment Moment	 5700 N 3600 N 57 Nm 190 Nm
e) Thorax (Nahum [19], Wall [33], Schmidt [25, 26])	Kraft	3000–9000 N
f) Becken (Patrick [22], Gragg [12], Cesari [7])	Kraft	4000–7000 N
g) Beine (Ritter [24], Kramer [14], Appel [4], Magyar [15])	Kraft	2000–7000 N

⁴ Die Einheiten sind «g» = Erdbeschleunigung, 9,81 m/sec². «N» = Kraft (10 Newton = ~ 1 kp). «Nm» = Moment (Newtonmeter). «bar» = Druck (10⁵ Newton/m²).

Vergleichswerte von Beschleunigungen allgemein bekannter Ereignisse

Sprung aus 2 Metern Höhe (50 cm Einfedern)	4 g
Fallschirm-landung	5 g
Toleranzgrenze für Flugzeugnotlandung	9 g
Ungeschützter Kopfanprall im Gehen gegen Kandelaber	10–15 g
Sturz aus dem 4. Stock in Sprungtuch	10 g
Sturz aus 10 Metern Höhe (Aufprallgeschwindigkeit von 50 km/h) auf Steinboden, je nach Abbremsdistanz (30/10/5 cm)	30/100/200 g
Schwerer Verkehrsunfall, ab	50 g

Die optimale Belastungstoleranz besteht bei Mann und Frau im Alter von 16 bis 30 Jahren. Die gleiche Beanspruchung, die beim 20jährigen höchstens zwei Rippenfrakturen verursacht, erzeugt beim 60jährigen bereits 10–20 Frakturen (Leichenversuche, Schmidt [27]).

An dieser Stelle ist es sinnvoll, auf zwei biomechanische Messgrößen einzugehen, die versuchen, neben dem Betrag der Beschleunigung auch den Zeitfaktor miteinzubeziehen. Es handelt sich um den SI (Severity

³ «AIS-80» [2] ist erhältlich bei American Association for Automotive Medicine, Suite 205, 1600 Dempster, Park Ridge, ILL 60068, USA. Eine deutsche Übersetzung ist im Druck. Informationen beim Autor.

Index, Gadd [10]) und das HIC (Head Injury Criterion). Bereits ältere Experimente haben ergeben, dass der Zeitfaktor gerade bei Hirnverletzungen eine grosse Rolle spielt (Gadd [10], Patrick [21]).

Der Severity Index (SI)
$$\int_{T_1}^{T_2} a^{2.5} \cdot dt$$

war ursprünglich ein Mass für die «Schwere» eines direkten Kopfanpralls eines Dummies, wobei a) die resultierende (Translations-)Beschleunigung des Schwerpunktes des Kopfes in g), und T (in sec) die Zeitpunkte unmittelbar vor und nach dem Anprall bedeuten. Der SI wird heute nur noch zur Messung der Belastung des Thorax verwendet (Grenzwert 1000). Es sind aber nur ungenaue Korrelationen zwischen dem SI und der Verletzungsschwere möglich.

Das Head Injury Criterion (HIC)
$$(T_2 - T_1) \left[\frac{1}{T_2 - T_1} \cdot \int_{T_1}^{T_2} a \cdot dt \right]^{2.5}$$

als Erweiterung des SI wird in Ermangelung einer besseren Messgrösse heute zur Beschreibung der Belastung des Kopfes verwendet.

In *Abbildung 2* werden die heute zur Verfügung stehenden Kriterien der Belastung und der Kinematik bei Verkehrsunfällen dargestellt (Adomeit [3]). Als Kinematikkriterium des verunfallten Autoinsassen ist die vertikale Verlagerung des Thorax in die Sitzfläche hinein bzw. Verlagerung nach oben und der maximale Beckendrehwinkel von 40 Grad angegeben; diese beiden Kriterien sollen es ermöglichen, das gefährliche Untertauchen im Gurt (Submarining) zu objektivieren und später diesen Kriterien nicht genügende Systeme zu eliminieren.

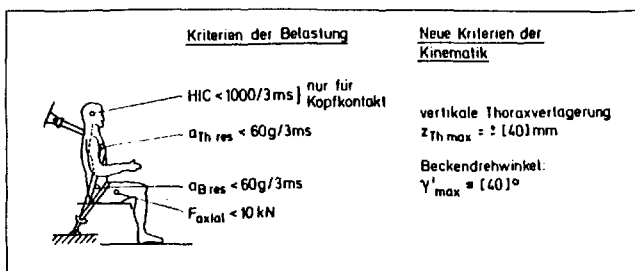


Abb. 2. Neues System von Bewertungskriterien für den Frontalstoss bei Autoinsassen. Kombinierte Belastungs- und Kinematikskriterien (Adomeit [3]).

Man geht heute trotz den nötigen Einschränkungen von der Arbeitshypothese aus, dass länger als 3 msec dauernde Beschleunigungen des Kopfes von über 80 g bzw. ein HIC-Wert von 1000 oder 1500 nicht mehr tolerierbar sind. Grenzwerte für die Brust und das Becken werden mit 60 g während 3 msec angegeben.

Eine praktische Bedeutung haben diese Werte insofern, als man darauf bedacht ist – entsprechende Vorschriften bestehen noch nicht –, dass beim Crash eines Personenwagens mit 50 km/h gegen eine feste Wand bei der angeschnallten Versuchspuppe diese Werte nicht überschritten werden.

Zusammenfassung

Die interdisziplinäre Wissenschaft «Unfallbiomechanik» erfordert die enge Zusammenarbeit von spezialisierten Medizinern und spezialisierten Physikern bzw. Ingenieuren. Trotz aufwendigen Forschungen sind heute noch keine gesicherten Toleranzwerte für den menschlichen Organismus bekannt. Die in dieser Arbeit erwähnten Beispiele solcher Toleranzwerte sind nicht als Absolutwerte zu betrachten, da fortgeschrittenes Alter und reduzierter Gesundheitszustand die Belastungsfähigkeit gegenüber der Norm erheblich vermindern. Allerdings bestehen Richtwerte, die in groben Zügen die Gefährlichkeit einer Belastungssituation abschätzen lassen. Ein wichtiges Hilfsmittel zur Quantifizierung von Unfallfolgen ist die standardisierte Einteilung der Verletzungen. Die «Abbreviated Injury Scale, AIS», teilt die Verletzungen in sechs Schweregrade ein, was sich in der Praxis als ausreichend feine Abstufung erwiesen hat.

Mit Hilfe von neuen elektronischen Messaufbauten werden in Zukunft Fortschritte in der biomechanischen Unfallforschung erfolgen können, die besser auf die Praxis anwendbare Angaben über die mechanischen Toleranzgrenzen des Menschen erwarten lassen.

Résumé

Biomécanique des accidents

La science interdisciplinaire qu'est la «Biomécanique des accidents» exige la collaboration de médecins spécialisés et de physiciens spécialisés. Malgré des recherches intensives, on ne connaît pas exactement les limites de tolérance biomécanique de l'organisme humain. Les valeurs indiquées dans cet article ne sont pas des valeurs absolues, parce que des conditions telles que l'âge élevé et certaines maladies réduisent la tolérance biomécanique. Seules existent des valeurs estimées qui permettent d'évaluer la gravité d'une charge mécanique sur l'organisme.

La classification standardisée des blessures est un moyen important pour la quantification des conséquences d'accidents. La «Abbreviated Injury Scale, AIS» est une classification internationale très bien adaptée à la recherche en matière d'accidents.

On peut espérer que les nouveaux moyens électroniques donneront des informations sur les tolérances humaines mieux applicables en pratique.

Summary

Biochemical Tolerance Limits and Accidents Analysis

Studies on «Accident Biomechanics» need a multidisciplinary collaboration of specialized researchers of the medical and engineering profession. In spite of extensive research no proven tolerance limits of the human organism are known to date. Due to the fact that old age and poor health condition greatly reduce the human tolerance, the examples of tolerance limits listed in this paper are no absolute values. However, some guidelines exist as to estimating the potential hazard of a mechanical loading situation.

A powerful tool for quantifying the medical sequelae of accidents is the standardized classification of injuries according to the «Abbreviated Injury Scale, AIS». It can be anticipated that by means of advanced electronic equipment further progress as to the knowledge of mechanical tolerance limits will be possible.

Literatur

Beim Autor.