

Biomechanik in Traumatologie und Rechtsmedizin

Peter F. Niederer

Institut für biomedizinische Technik und medizinische Informatik
Universität und ETH Zürich

1. Einleitung

Die Biomechanik befasst sich mit der Art und Intensität der Wirkung von Kräften auf biologische Objekte. Die Wirkung kann sich dabei auf den Bewegungs- und/oder den Deformationszustand eines Körpers beziehen.

Eine besondere Situation liegt vor, wenn die Kräfte (mindestens kurzzeitig) irreversible Schädigungen am betrachteten Objekt hervorrufen (längerfristig verlaufende Heilungsprozesse und Langzeitschäden werden hier nicht mitberücksichtigt). Die Untersuchung solcher Vorgänge geschieht im Rahmen der Traumabiomechanik. Naturgemäss ist die Rechtsmedizin (forensische Medizin) in besonders starkem Ausmasse an Fragen der Traumabiomechanik interessiert.

Von Bedeutung ist in diesem Zusammenhang der Umstand, dass bis zum Alter von 45 Jahren Verletzungen, insbesondere als Folge von Verkehrsunfällen die häufigste Todesursache darstellen. Der durch Verletzungen hervorgerufene volkswirtschaftliche Schaden, berechnet als Verlust an produktiven Lebensjahren (etwas willkürlich definiert als Komplement bis zum 65. Altersjahr), ist grösser als der durch irgendwelche Krankheiten verursachte Verlust [1]. Entsprechend kommt der Unfall- und Verletzungsprävention entscheidende Bedeutung zu, wobei allerdings zu beachten ist, dass viele Aspekte in diesem Bereich nicht physikalisch-technischer Natur sind (z. B. risikoreiches Autofahren, Kriminalität).

Grundlage sowohl der Unfallprävention als auch der forensischen Beurteilung eines Falles ist eine Dokumentation des Vorgefallenen sowie eine darauf basierende Rekonstruktion. Notwendig ist sodann eine Kenntnis von Verletzungsmechanismen und der entsprechenden biomechanischen Toleranzen. Dabei

ist darauf hinzuweisen dass in diesem Bereich die biologische Variabilität besonders stark zum Ausdruck kommt: Beispielsweise variiert die Bruchlast des Oberschenkelhalses zwischen einigen kN bei gesunden Jungen bis zu unter Umständen praktisch Null im Alter, wo bei stark osteoporotischen Personen Spontanbrüche auftreten können.

2. Methoden

Traumabiomechanische Untersuchungen an Menschen sind unter physiologischen Bedingungen grundsätzlich nicht möglich. Man ist deshalb auf indirekte Methoden angewiesen. Diese können in drei Gruppen unterteilt werden:

Rekonstruktion realer Unfälle: Mit Hilfe zuverlässiger Rekonstruktionsmethoden wird angestrebt, aus realen Unfällen Erkenntnisse bezüglich Verletzungsmechanismen und biomechanischer Toleranzen zu gewinnen. Voraussetzung dabei ist eine genaue und vollständige Dokumentation des Vorgefallenen vor Ort [2], was in der Regel nur durch speziell ausgebildete Polizeiorgane erfolgen kann. Der Zusammenarbeit von Forschungsgruppen mit Polizeidienststellen kommt entsprechend grosse Bedeutung zu. Dabei entsteht ein oft unterschätzter zusätzlicher Vorteil, indem der zunächst grössere Aufwand bei der Dokumentation (Arbeitszeit von Polizeibeamten, Absperren des Verkehrs, etc.) durch eventuelles Vermeiden von späteren jahrelangen Rechtsstreitigkeiten mit häufig nutzlosen Gutachten (wegen Fehlens relevanter primärer Information) bei weitem mehr als wettgemacht wird.

Experimente mit Surrogaten: Anthropomorphe Messpuppen eignen sich für die Simulation von

Bewegungsabläufen. Aus daran gemessenen Kräften und Beschleunigungen werden gelegentlich gewisse Schutzkriterien abgeleitet (beispielsweise das Head Injury Criterion [3]). Obwohl die Einhaltung solcher Kriterien zum Teil gesetzlich verankert ist (z. B. FMVSS 208), ist deren Relevanz jedoch umstritten. Wegen unterschiedlicher biomechanischer Konstitution zwischen Mensch und Tier sind sodann Tierversuche in der Unfallforschung kaum von Bedeutung. Eine Ausnahme bildet die orthopädische Traumatologie, wo der Tierversuch für die Implantatentwicklung wichtig ist. Für spezielle Fragestellungen werden schliesslich auch Versuche an Leichen durchgeführt.

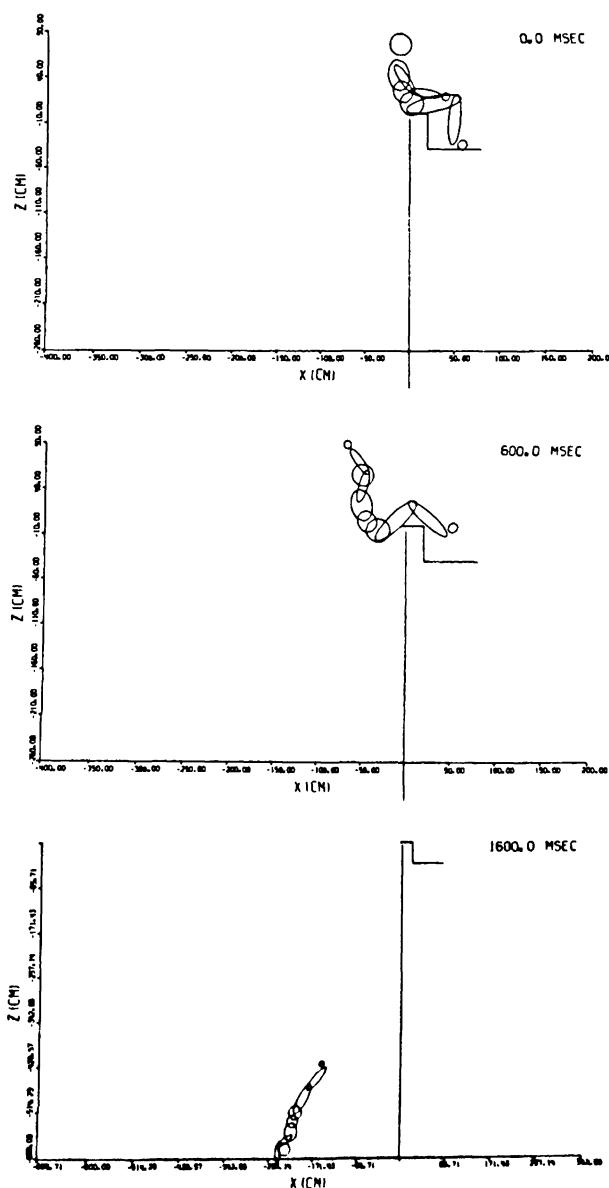
Mathematische Modellierung: Für die Zwecke der Bewegungsanalyse hat es sich erwiesen, dass der menschliche Körper, ähnlich wie bei Messpuppen, als System starrer Teilkörper modelliert werden kann. Dabei entstehen Systeme von gewöhnlichen Differentialgleichungen, deren Anzahl dem Freiheitsgrad des Systems entspricht. Für die Untersuchung von Verletzungsvorgängen sind dagegen kontinuumsmechanische Ansätze zu verwenden, d.h. es müssen partielle Differentialgleichungen formuliert werden. Zu deren Lösung eignet sich u.a. die Methode der Finiten Elemente. Das Problem besteht darin, dass nichtlineares viskoelastisches Stoffverhalten von inhomogenen Körpern bei grossen Deformationen zu modellieren ist. Die dafür benötigten Stoffgesetze und Parameterwerte sind grösstenteils wenig bekannt.

3. Beispiele

3.1 Bewegungsanalyse

Fallweite bei Fenstersturz: Ein 50-jähriger Mann fiel aus dem Fenster seines Wohnhauses aus 8 m Höhe auf den Boden, wobei er sich tödliche Verletzungen zuzog. Die Aufprallstelle am Boden befand sich in einem Abstand von 2.70 m von der Hausmauer entfernt. Die Frage erhob sich, ob eine solche Fallweite mit einem passiv verlaufenden Fall aus dem Fenster vereinbar war (unter diesen Umständen hätte es sich um einen Unfall gehandelt), oder ob notwendigerweise ein aktiver Sprung angenommen werden musste (dies bedeutete Selbstmord; eine kriminelle Handlung konnte ausgeschlossen werden). Aus versicherungstechnischen Gründen ergaben sich je nach Fall enorme finanzielle Konsequenzen. Die mathematische Analyse zeigte, dass bei einem unfallmässigen Sturz rückwärts aus dem Fenster mit

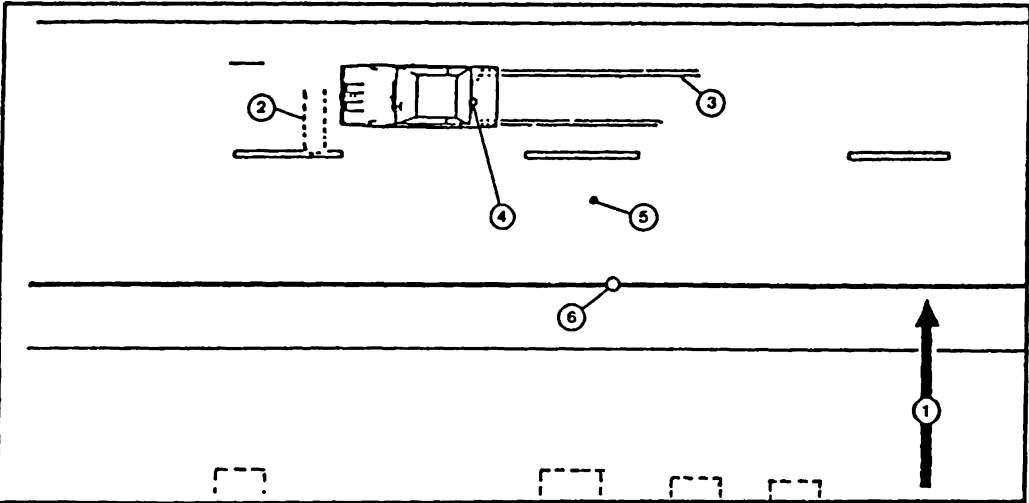
Hochwerfen der Arme als Schreckreaktion (Figur 1) eine Fallweite von 2.70 m theoretisch knapp erreicht werden konnte. In mehreren Sprung- und Fallversuchen wurde dieser Umstand bestätigt. Vom physikalischen Standpunkt war ein aktiver Sprung, d.h. ein Selbstmord in jedem Falle möglich, da die fragliche Fall- (Sprung-) Weite dabei problemlos erreicht wird.



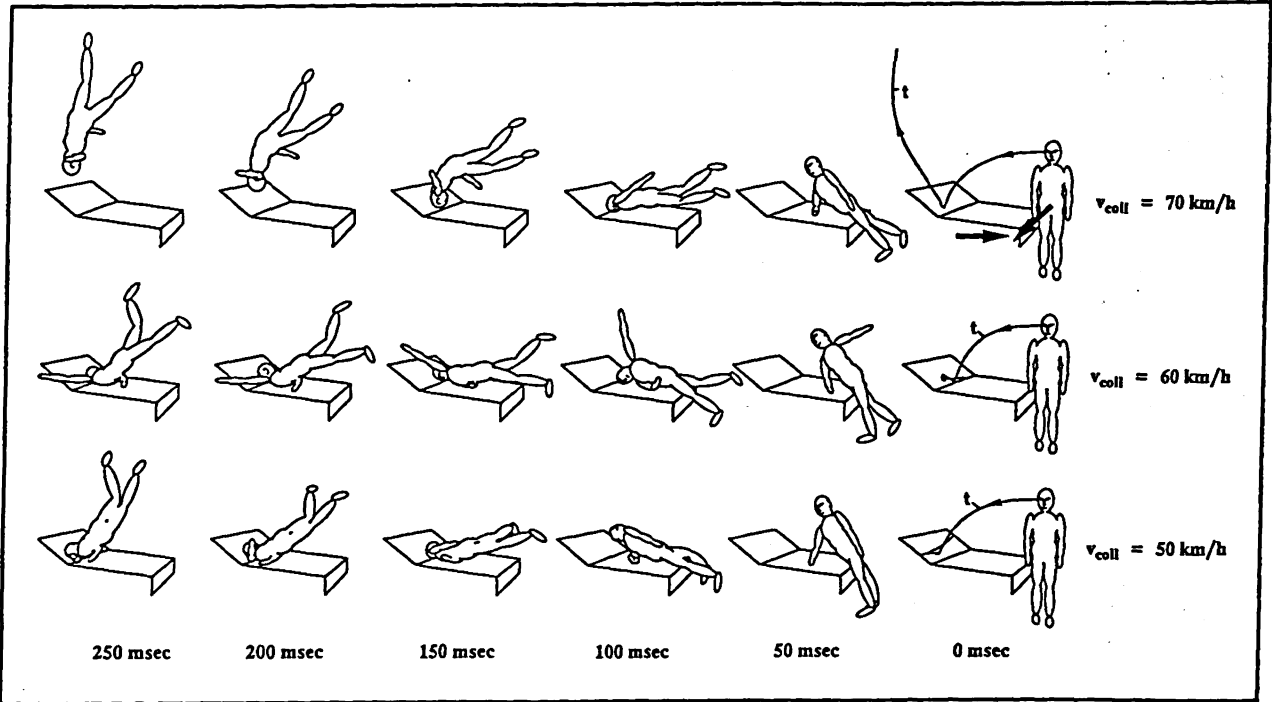
Figur 1: Unfallmässiger Sturz rückwärts aus einem Fenster mit Hochwerfen der Arme als Schreckreaktion. Dabei wird dem Körper ein zusätzlicher Impuls in horizontaler Richtung verliehen, aufgrund dessen sich die Fallweite vergrössert.

Auto-Fussgänger-Kollision: Ein Fussgänger wurde beim Überqueren der Strasse bei Regen von einem Auto erfasst und getötet (Situationsplan Figur 2a: [1]: Mutmassliche Gehrichtung des Fussgängers, [2]: Endlage, [3]: Wegen regennasser Strasse nur teilweise sichtbare Blockierspuren). Der Fahrer sagte aus, die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h nicht überschritten zu haben.

Dank aufmerksamer Unfallprotokollierung durch die Polizeibeamten konnte ein Fussabdruck des Fussgängers auf der Kofferraumabdeckung dokumentiert werden ([4] dabei befand sich die Endlage des Fussgängers vor dem Auto!). Ein zugehöriger Bewegungsablauf ist jedoch bei Kollisionsgeschwindigkeiten bis zu 60 km/h nicht möglich (Figur 2b).



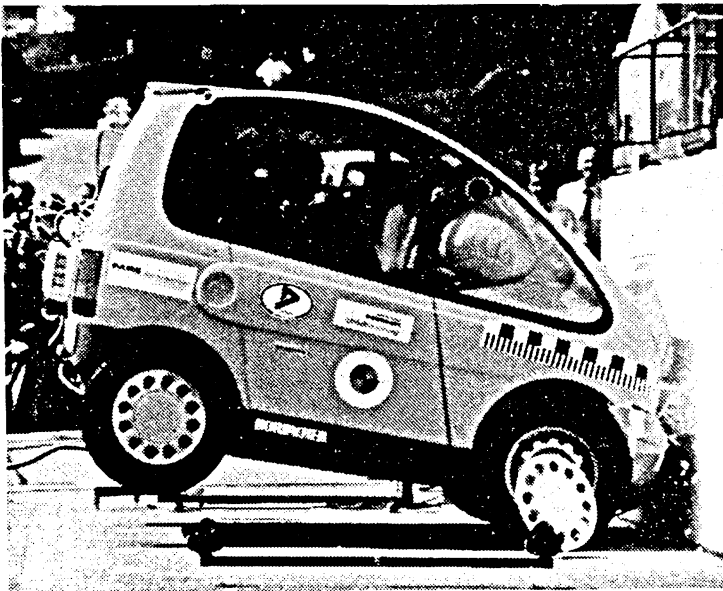
Figur 2a: Fahrzeug-Fussgänger-kollision (siehe Text). Bei regennasser Fahrbahn entsteht keine bezüglich Fahrgeschwindigkeit auswertbare Blockierspur.



Figur 2b: Mathematisches Modell des in der Figur 2a dokumentierten Anpralles. Bei einer Kollisionsgeschwindigkeit von 70 km/h entsteht ein Ueberschlag des Fussgängers mit anschliessender Unterfahrung durch das Fahrzeug (t : Trajektorie

des Massenmittelpunktes des Kopfes relativ zum Fahrzeug). Bei geringeren Kollisionsgeschwindigkeiten verbleibt die Trajektorie im Bereich der Fronthaube (Computermodell Calspan CVS [6]).

Sicherheit von Insassen von Leichtmobilen: Leichtmobile stellen vom Standpunkt der inneren Sicherheit besondere Probleme, da das konventionelle Konzept des heutigen Automobilbaues (frontale Knautschzone) wegen fehlendem Raum im Frontalbereich nicht angewendet werden kann. Zur Zeit wird an Kleinfahrzeugen mit steifem, crashtauglichem Stossgürtel gearbeitet (Figur 3), wobei wegen der entstehenden hohen Fahrzeugverzögerungen im Kollisionsfalle bestehende Sicherheitsgurt- und Airbagsysteme weiter entwickelt werden müssen.

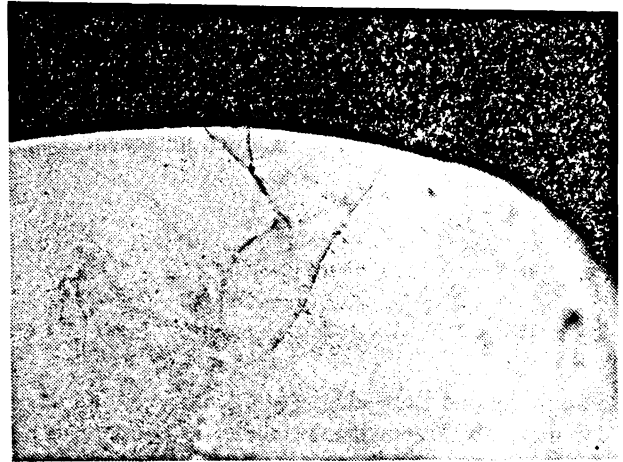


Figur 3: Kollision eines Leichtmobils mit steifem Stossgürtel mit 44 km/h gegen eine starre Barriere. Wegen des steifen Stossgürtels entstehen einerseits geringe Fahrzeugdeformationen, andererseits jedoch wesentliche höhere Verzögerungen der Fahrzeugzelle als bei konventionell ausgelegten PKW.

3.2 Verletzungsvorgänge

Tödliche Verletzung durch Schlaginstrument: Im Zusammenhang mit einem Tötungsdelikt ergab sich die Frage, ob eine Schädelverletzung (Figur 4a) durch ein bestimmtes Schlaginstrument (Figur 4b) verursacht werden konnte.

HWS-Verletzungen nach Verkehrsunfall: Ein besonders aktuelles Thema betrifft die Möglichkeit von radiologisch nicht nachweisbaren HWS-Traumata nach Heckkollisionen (der Begriff des Schleudertraumas wird in diesem Zusammenhang oft



Figur 4a: Schädelverletzung



Figur 4b: Mögliche Tatwaffe. Das Schlaginstrument ist im freien Verkauf, da damit nach behördlich anerkannten Angaben des Herstellers keine schweren Verletzungen verursacht werden können (geringe Masse, hohe Flexibilität).

falsch angewendet [4]). Zur Zeit besteht keine wissenschaftliche Grundlage zur abschliessenden Beurteilung dieses Problems vom biomechanischen Standpunkt. In jedem Falle sind physische und psychische (Vor-) Schädigungen mit in die Beurteilung einzubeziehen. Die existierenden mathematischen Modelle lassen keine zuverlässigen Aussagen zu, da diese dem komplexen inneren Aufbau der HWS bei weitem nicht Rechnung tragen.

Messerstiche: Durch Messerstiche hervorgerufene Verletzungen führen häufig auf die rechtlich relevante Frage nach der durch den Täter ausgeübten Kraft [5]. Insbesondere besteht die Möglichkeit eines

eigentlichen Angriffes des Täters mit der Absicht, dem Opfer Verletzungen zuzuführen (nachweisbar beispielsweise bei Vorhandensein mehrerer Stichwunden), bzw. eines passiven Verhaltens des Täters (oft behauptetes Hineinlaufen oder -fallen des Opfers in das Messer), was rechtlich unterschiedlich gewertet wird.

Schlussbemerkungen

Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der forensischen Traumabiomechanik (in Abgrenzung zur orthopädisch orientierten Traumabiomechanik) konzentriert sich grob auf vier Bereiche: Erstens sollen bessere Surrogate (Messpuppen) realistischere Messergebnisse ergeben. Weiterhin sind die biomechanischen Toleranzen besser zu definieren, wobei auch dem Problem des Populationsmittelwertes vermehrt Beachtung geschenkt werden muss. Da sich die biomechanische Konstitution in Abhängigkeit des Alters stark ändert, ist es fraglich, ob die Angabe globaler Werte sinnvoll ist.

Wie bereits darauf hingewiesen wurde, sind traumabiomechanische Untersuchungen am Menschen nicht möglich. Besondere Bedeutung hat deshalb drittens die Methode der Finiten Elemente, deren Anwendung heute auch bei nichtlinearen viskoelastischen Problemen realistische Resultate liefert, falls das Materialverhalten genügend gut beschrieben werden kann. Viertens sind Methoden der rechnergestützten Simulation und Animation allgemein von rasch zunehmender Bedeutung, und die Technik der Virtuellen Realität wird sich nebst der Darstellung von Unfallereignissen im forensischen Umfeld auch für Ausbildungszwecke eignen.

Literatur

- [1] National Research Council: *Injury in America*. Washington 1983.
- [2] Niederer P.: *The Accuracy and Reliability of Accident Reconstruction*. In: *Automotive Engineering and Litigation* (G. Peters and B. Peters, eds.), John Wiley and Sons, NY 1991.
- [3] Backaitis S.: *The Head Injury Criterion*. In: *Head and Neck Injury Criteria. A Consensus Workshop*. NHTSA Washington 1981.
- [4] Jenzer G., Walz F.: *Die "Schwere" des "Schleudertraumas" der HWS*. Z. Unfallchir. Vers. med. 84 (1991) 7.
- [5] Kaatsch H.-J., Mehrens C., Nietert M.: *Der reproduzierbare Messerstich*. Rechtsmedizin 3 (1993) 67.
- [6] Fleck J., Butler F., Vogel S.: *An Improved Three-Dimensional Computer Simulation of Vehicle Crash Victims*. US Dept. of Transportation, DOT HS-801507 (1973).

