

Zur Wirkung von Scherkräften bei der Entstehung von Schleuderverletzungen
der Halswirbelsäule

K. BURROW, Institut für Landverkehrsmittel, Technische Universität Berlin,
(Deutschland).

Die Schleuderverletzungen der Halswirbelsäule (HWS) stellen einen noch immer nicht völlig geklärten Verletzungsmechanismus dar. Über die Art dieser Verletzungen, ihre Häufigkeit und ihre Lokalisation bestehen kaum noch Zweifel. Eine verlässliche Zuordnung von der Größe der Stoßbelastung zu den resultierenden Verletzungen ist bis heute nicht möglich. Es bestehen sogar erhebliche Meinungsunterschiede über den eigentlichen Verletzungsmechanismus. Überwiegend wird in der Literatur als Verletzungsursache die Biegung der HWS über das physiologisch mögliche Maß hinaus angesehen, und zwar allein bei Rückbiegung (Retroflexion). Nur Wenige beziehen die Anteflexion in die Betrachtung mit ein, oder betonen die Wirkung von Scherkräften als Verletzungsursache.

In einer experimentellen Untersuchung wurden menschliche Torsen (am 10. Brustwirbel vom Rumpf getrennt) auf einem Katapult stoßartig belastet (Bild 1). Zur Ergänzung und Stützung der Versuchsergebnisse wurde ein mathematisches Simulationsmodell (Bild 2) für die Kopf-Hals-Bewegungen entwickelt. Die Versuche dienten zur Ermittlung des grundsätzlichen Bewegungsablaufs sowie der Beziehung zwischen den Personenparametern, den Stoßgrößen, den gemessenen Kopfbeschleunigungen mit den resultierenden Verletzungen, CLEMENS und BURROW (1) sowie BURROW (2). Es wurden Retroflexionsversuche (Geschwindigkeit $v_S = 18 - 25$ km/h, Schlittenbeschleunigung $a_S = 13 - 16$ g) mit und ohne Kopfstütze sowie Anteflexionsversuche ($v_S = 28$ km/h, $a_S = 13 - 38$ g) durchgeführt.

Ergebnisse zum Verletzungsgeschehen

Bei den Versuchen wurden experimentell die typischen, einer Schleuderbewegung des Halses zuzuordnenden Verletzungen erzeugt. Das gilt für die Retro-, als auch die Anteflexion. Als typisch sind insbesondere Verletzungen einzelner Bewegungssegmente, in schweren Fällen bis zur vollständigen Durchtrennung, ohne Verletzung der beteiligten Knochenstrukturen anzusehen.

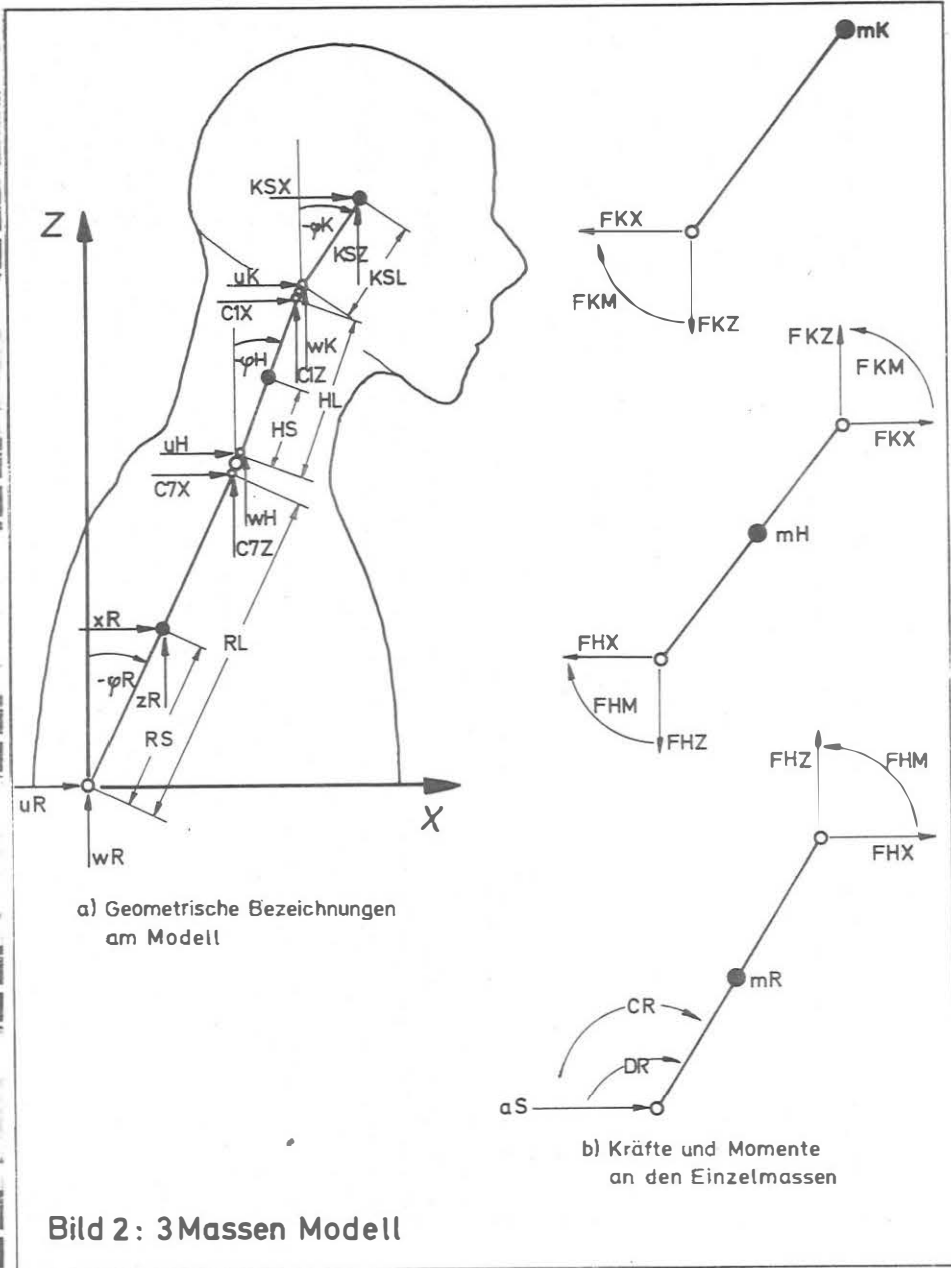
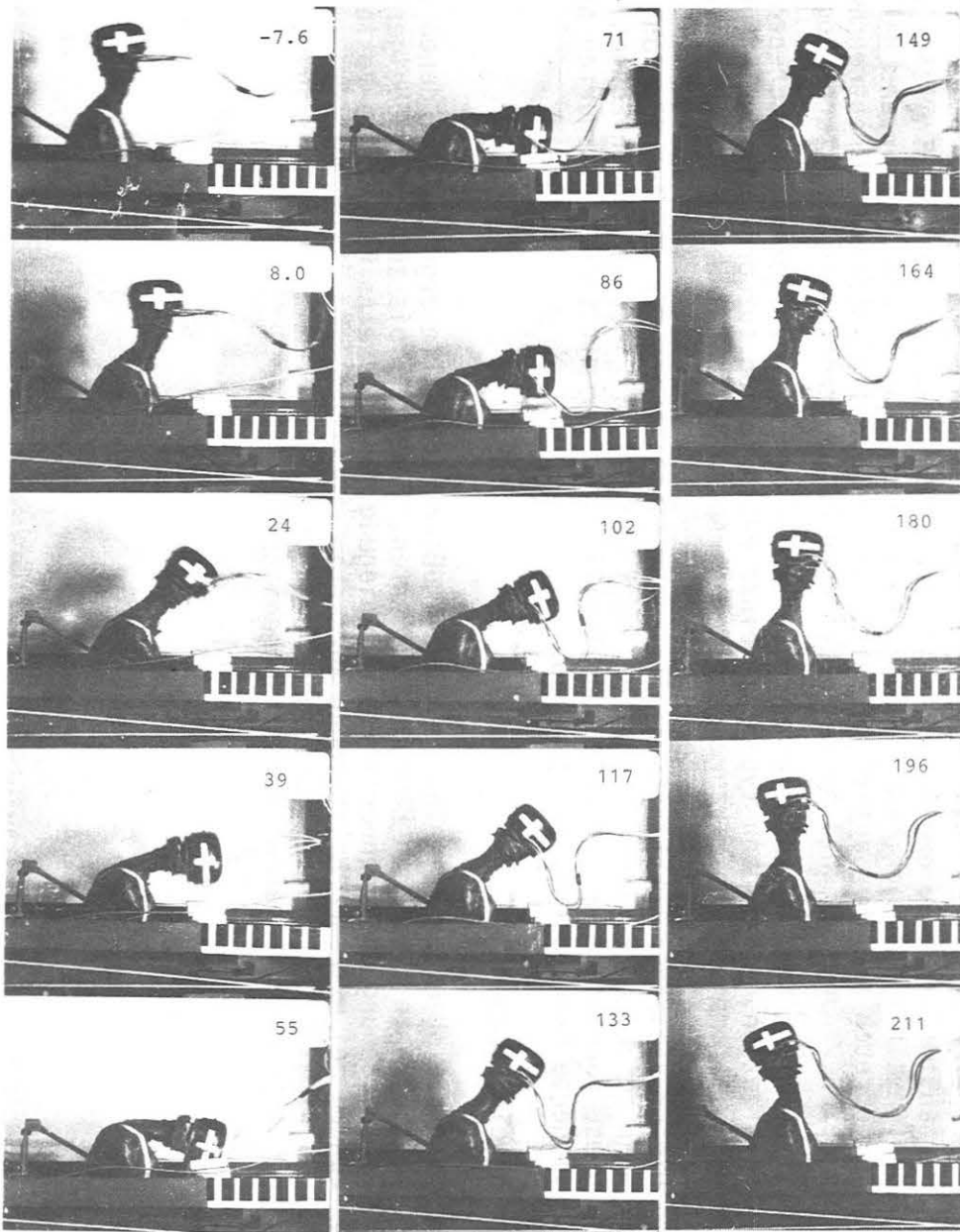
Bei den Anteflexionsversuchen wurden bei einigen Versuchen durch harten Aufprall des Gesichtsschädels die hierfür typischen Verletzungen an der HWS dargestellt. Als typisch zu gelten haben hier Axiszahnbrüche sowie Ringfrakturen auf der Rückseite des Hinterhauptlochs und im Clivius Bereich, sowie Frakturen der Fortsätze des zweiten Wirbels (C2).

Es traten isolierte Bandscheibenverletzungen ohne Befund an dem umgebenden Bandapparat auf.

Bei der Retroflexion traten die isolierten Befunde vorzugsweise am untersten, nicht von der Rückenlehne abgestützten Bewegungssegment auf, bei der Anteflexion vorzugsweise um den Wirbel C6. Mit steigender Verletzungsschwere breiteten sich die Befunde nach oben zur mittleren, dann oberen HWS aus.

Bild 42: Versuch 19, Schleuderbewegung vorwärts (Anteflexion)

Versuchsgeschwindigkeit 28.9 km/h



Degenerative und traumatische Vorschäden können die Belastungsfähigkeit der HWS stark herabsetzen, ihre Lage beeinflusst damit auch die Lokalisation der Verletzungen.

Ergebnisse zur Verletzungsmechanik

Bei der durchgeführten experimentellen Untersuchung traten Ergebnisse in Erscheinung, die mit der überwiegend vertretenen These der Verletzungsentstehung allein durch die Biegebelastung der HWS nicht zu erklären waren. So unter anderem:

1. Verletzungen ohne übermäßige Halsflexion
2. Keine Verletzungen trotz extremer Flexionswinkel
3. Rupturen der vorderen Längsbänder ohne Retroflexion

Diese Erscheinungen sind jedoch erklärbar, wenn man die Wirkung von Scherkräften bei der Verletzungsentstehung mit berücksichtigt.

Nach Ansicht des Verfassers stellt sich dann die Mechanik der Schleuderverletzungen der Halswirbelsäule wie folgt dar:

Die Überdehnung des Halses durch Biegung über das physiologisch mögliche Maß hinaus ist Teil der Verletzungsursachen, jedoch nicht der wesentliche und primäre für das den Schleuderverletzungen zugeschriebene Verletzungsbild. Ausschlaggebend (aber auch nicht allein verantwortlich) sind die im Hals auftretenden Scherkräfte in der Übergangszone zwischen der durch Fahrzeugstrukturen beschleunigten Wirbelsäule und dem freien, nicht durch äußere Kräfte beschleunigten Teil der Wirbelsäule. Oder anders ausgedrückt, bei der horizontalen Beschleunigung des Rumpfes müssen die Scherkräfte innerhalb des einen Bewegungssegments bei dem untere Wirbel von den äußeren Kräften beschleunigt wird, den oberen Wirbel und alle darüberliegenden Massen beschleunigen.

Nur auf diese Weise ergibt sich ein "Zerreißschaden mit streng lokalisierender Gewalteinwirkung", ERDMANN (3) bevor eine nennenswerte Flexion des Halses aufgetreten ist. Nur auf diese Weise ist auch die vollständige Durchtrennung eines Bewegungssegments ohne Verletzungen an den knöchernen Strukturen möglich.

Im weiteren Verlauf kommt es dann zu der bisher als bestimmend angesehenen Halsflexion, wobei dann typische, einer Retroflexion zuzuordnende Verletzungen wie Kompressionsfrakturen auf der dorsalen Seite der Wirbelkörper wie etwa auch Dornfortsatzabbrüche entstehen.

Dieser Verletzungsmechanismus gilt prinzipiell ebenso für die Anteflexion, wenn bei einem fixierten Rumpf der Kopf und Hals frei ausschlagen können. Diese Konstellation ist bei Frontalkollisionen für mit Sicherheitsgurten gesicherte Fahrzeuginsassen gegeben.

Beweisführung

Wenn die oben genannte These stimmt, müßten sich Fälle ergeben, bei denen Verletzungen an einzelnen Bewegungssegmenten, eventuell bis zur vollständigen Durchtrennung ohne nennenswerte Halsbiegung, andererseits Fälle ohne Verletzungen bei extremer Halsbiegung auftreten.

Das sind aber gerade die oben genannten, mit der herkömmlichen Anschauung nicht zu vereinbarenden Versuchsergebnisse.

Auftreten extremer Halsbiegung ohne Verletzungen

Sowohl bei den Retro- als auch den Anteflexionsversuchen war keine signifikante Abhängigkeit vom Kopfwinkel φ_K als auch vom unteren Halsbiegewinkel φ_{HB} oder $\Delta\varphi_{RHB}$ festzustellen, siehe Bild 3 und 4.

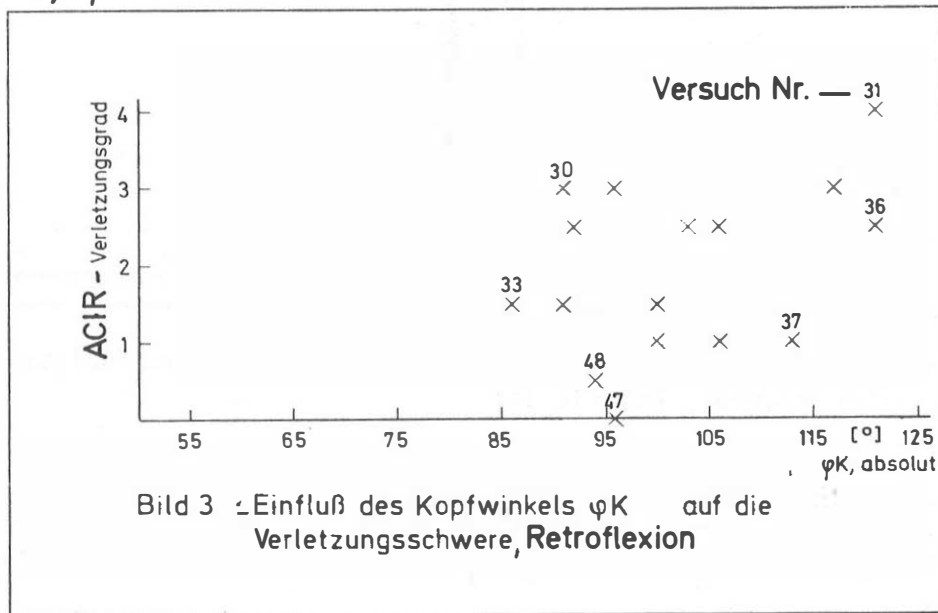


Bild 3 - Einfluß des Kopfwinkels φ_K auf die Verletzungsschwere, Retroflexion

Die senkrecht stehende Rückenlehne gibt für alle Retroflexionsversuche die gleiche Rumpfneigung vor, so daß als Maß für die gesamte Halskrümmung und Drehung im Kopfgelenk der absolute Kopfwinkel φ_K gewählt wird. Sein Einfluß auf die Verletzungsschwere (Bild 3) dargestellt, ergibt den als gesichert angesehenen Anstieg der Halsgefährdung mit steigendem Biegewinkel. Offensichtlich reicht der Biegewinkel als Kriterium jedoch nicht aus, wie die deutlich getrennten Geschwindigkeitsgruppen zeigen. In beiden Gruppen ist die Streuung der maximalen Winkel recht groß, trotzdem sind beide Gruppen wie oben bereits gesagt hinsichtlich der Verletzungen deutlich voneinander abgesetzt. Eine gewisse Mindestgeschwindigkeit muß offensichtlich zum Biegewinkel vorausgesetzt sein; dann erst (höhere Geschwindigkeitsgruppe) ist die Zuordnung Verletzungsschwere - Biegewinkel eindeutig. Davon abgesehen ist es erstaunlich, daß selbst bei absoluten Kopfwinkeln von 95 - 115° keine bzw. keine tödlichen Verletzungen aufgetreten sind.

Die Ergebnisse der Anteflexionsversuche sind in Bild 4 dargestellt.

Geht man von der Annahme aus, daß für die Verletzungen der Halswirbelsäule Verformungen in den Bewegungssegmenten infolge Biegung der HWS über das physiologische Maß hinaus verantwortlich sind, so müßte sich dies durch die Biegung der unteren HWS zum Rumpf darstellen lassen (Bild 4). Bild 4a ergibt allerdings keine Proportionalität zwischen dem Halsbiegewinkel $\Delta\varphi_{RHB}$ und der Verletzungsschwere. Es treten vor allem bereits schwere Verletzungen bei Winkeln (30 - 50°) auf, die in der unteren Halswirbelsäule wohl physiologisch ungefährlich sind. Im Gegensatz dazu besteht selbst bei 80° die Möglichkeit unverletzt zu bleiben, wobei allerdings nicht genau definiert ist, wieviel Bewegungssegmente von HWS und BWS an diesem Winkelmaß beteiligt sind.

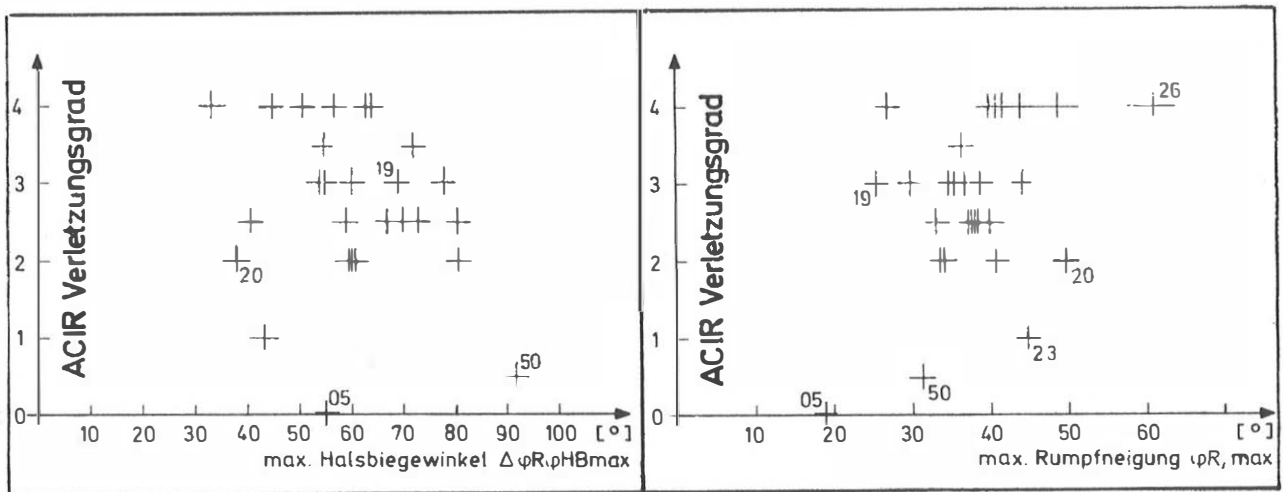


Bild 4: Zusammenhang zwischen dem Verletzungsgrad und der Rumpfneigung sowie dem Halsbiegewinkel; Anteflexion

Das heißt, es sind Versuche aufgetreten, bei denen trotz extremer Hals- und Kopfbiegewinkel keine oder nur geringere Verletzungen auftraten; so der Versuch 50 mit sehr langem steifem (kleines φ_R) Rumpf ohne jeglichen Kopfaufprall.

Eine Vorverlagerung des Rumpfes und damit eine Verlagerung der Anteflexion in dem Rumpfbereich, d.h. Verringerung der Halskrümmung dagegen kann offensichtlich die Schwere der Verletzungen verringern (Bild 4a).

In diesem Zusammenhang müssen auch die Ergebnisse der Untersuchungen von STATES et al. sowie von KIHLEBERG erwähnt werden. Beide betonen, daß Frauen auffällig stärker durch Whip-lash Verletzungen betroffen werden, obwohl gleichzeitig festgestellt wurde, daß die Körpergröße keinen Einfluß auf die Verletzungshäufigkeit hatte.

Diese Ergebnisse erscheinen dem Verfasser wichtig, da, wenn die Lehnenhöhe die Größe der Retroflexion beeinflusst, dies eher die Frauen begünstigen müßte. Zum anderen ergaben gerade die Messungen der physiologischen Bewegungsbereiche eine größere Flexibilität der weiblichen Halswirbelsäule in allen Lebensaltern, was nach den bisherigen Anschauungen die Verletzungsgefahr ebenfalls eher herabsetzen müßte.

Eine weitere Beobachtung, die das Auftreten traumatisierender Scherkräfte an der unteren Halswirbelsäule stützt, stammt von NELSON: bei den von ihm untersuchten Patienten war nach Unfällen mit Retroflexionen aber auch Anteflexion ein anormal starkes Wirbelgleiten zu beobachten; sogar dann, wenn keine begleitenden Verletzungen des Bandapparates festzustellen waren.

Auftreten von Verletzungen ohne extreme Halsbiegung

Bei den Versuchen zur Retroflexion wurden Kontrollversuche mit einer Kopfstütze durchgeführt, die den Kopf optimal in seinem Schwerpunkt abstützte. Trotzdem wies ein Versuch eine verletzte Gelenkkapsel in der unteren HWS auf. Wahrscheinlich ist diese Verletzung aufgrund einer horizontalen Relativbewegung Kopf - Schultern zurückzuführen; unterschiedlich steifes Polstermaterial von Kopfstütze und Rückenlehne sowie nicht anliegende Schultern an der Lehne hatten zu dieser relativ starken Bewegung geführt.

Beim Anteflexionsversuch 15 trat eine vollständige Ringfraktur um das Hinterhauptloch mit der Folge eines vollständigen Kopfabrisses auf. Unabhängig von der Frage wie eine solche Verletzung zu bewerten ist, kann festgestellt werden, daß dadurch der relative Winkel zwischen Rumpf und unterer HWS auf 30° begrenzt wurde. Trotzdem weist der Versuch einen Bandscheibenriss bei C5/C6 sowie Gelenkkapselrisse bei C4/C5 und C3/C4 auf.

Bei den Versuchen zur Anteflexion traten etwa gleich häufig Verletzungen des vorderen und des hinteren Längsbandes auf. Das war allein mit dem Verlauf der Anteflexion nicht erklärbar; da als Verletzungsursache aber nur eine Überdehnung durch extensive Halsbiegung angenommen wurde, wurde als Erklärung die sekundäre Retroflexion herangezogen, Zitat: "Die Verzögerungen sind in dieser Phase (der sekundären Retroflexion) wesentlich geringer als während der (Ante-) Flexion. Die Art der aufgetretenen Verletzungen deutet aber darauf hin, daß diese Phase als die kritische anzusehen ist," FIALA, CLEMENS, BUROW (7).

Dabei bedeutete "wesentlich geringer", daß während des Rückschwingens über die Ausgangshaltung hinaus in die Retroflexion horizontal 1 bis 2 g, vertikal bis 4 g gemessen wurden im Vergleich zu den zehnfachen Werten bei der primären Anteflexion.

Zur Klärung dieser Frage wurden vier Anteflexionsversuche mit einer Kopfstütze (Versuche 50./53) durchgeführt, um die extensive Retroflexion zu unterbinden, die Verletzungen der vorderen Längsbänder traten jedoch wieder auf. Eine Erklärung konnte damals nicht gegeben werden.

Diese Erklärung ist aber durch die These der Scherkräfte als primäre Verletzungsursache möglich.

Zum zeitlichen Auftreten der Verletzungen

Eine weitere Möglichkeit den Verletzungsmechanismus zu bestimmen ist, den Zeitpunkt des Entstehens der Verletzungen zu bestimmen. Ein Versuch dazu war die eben beschriebene Versuchsanordnung mit Kopfstütze. Sie ergab, daß die Verletzungen auch der ventralen Halsstrukturen während der Anteflexionsphase auftreten.

Bei den Retroflexionsversuchen wurde der Einfluß der Halslänge auf die Verletzungsschwere untersucht (Bild 5). Bei gemeinsamer Betrachtung aller Versuche kann nur ein geringer Einfluß erkannt werden.

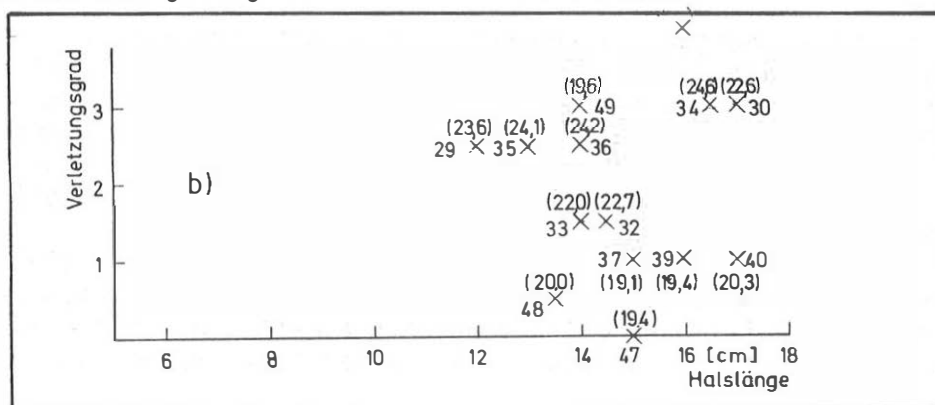


Bild 5: Einfluß der Halslänge auf die Verletzungsschwere, Retroflexion

Dieser Eindruck kommt aus der Gruppe mit niedrigem v_s . Denn bei dieser Versuchsgeschwindigkeit sind selbst "lange Hälse" ungefährdet (Versuche 39, 40). Die Versuche bei der höheren Geschwindigkeit ergeben dann jedoch, allein betrachtet, den erwarteten Schwereanstieg mit wachsender Halslänge. Erwartet, weil bei etwa gleicher Kopf-Hals-Masse das Moment im unteren Halsgelenk linear mit der Halslänge wächst.

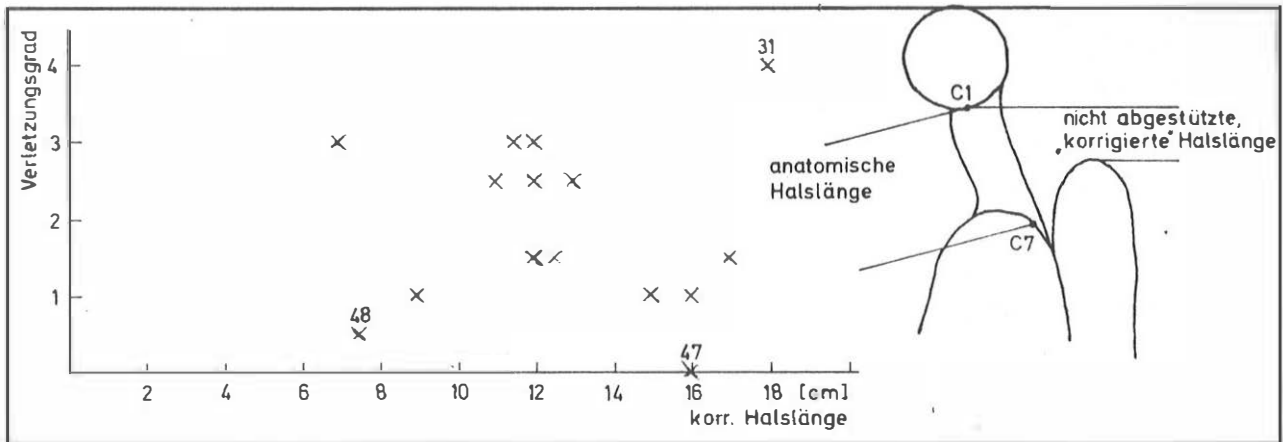


Bild 6: Einfluß der nicht abgestützten Halslänge auf die Verletzungsschwere

Zusätzlich ergab sich jedoch kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der freien, nicht von der Rückenlehne abgestützten Halslänge (d.h. der Höhe der Rückenlehne) auf die Verletzungsschwere (Bild 6)

Die Erklärung dafür kann nur sein, daß die Verletzungen zu einem Zeitpunkt auftreten, zu dem zwar die natürliche Halslänge die Kräfte im Hals beeinflusst, jedoch die Abstützung des Halses durch die Lehne noch nicht wirksam wird, d.h. während der ersten 50 ms des Bewegungsablaufs.

Dagegen scheint ein Einfluß auf die Verletzungslokalisierung gegeben zu sein. Es ist auffällig, daß die einzigen Versuche mit Verletzungen bei C2/C3 (Versuche 34, 39) zu denen mit sehr hoch abgestütztem Hals gehören. Der Versuch 39 mit 7 cm über der Schulter liegenden Lehnenoberkante ist der einzige Versuch mit Verletzungen in der mittleren und oberen, nicht dagegen in der unteren HWS.

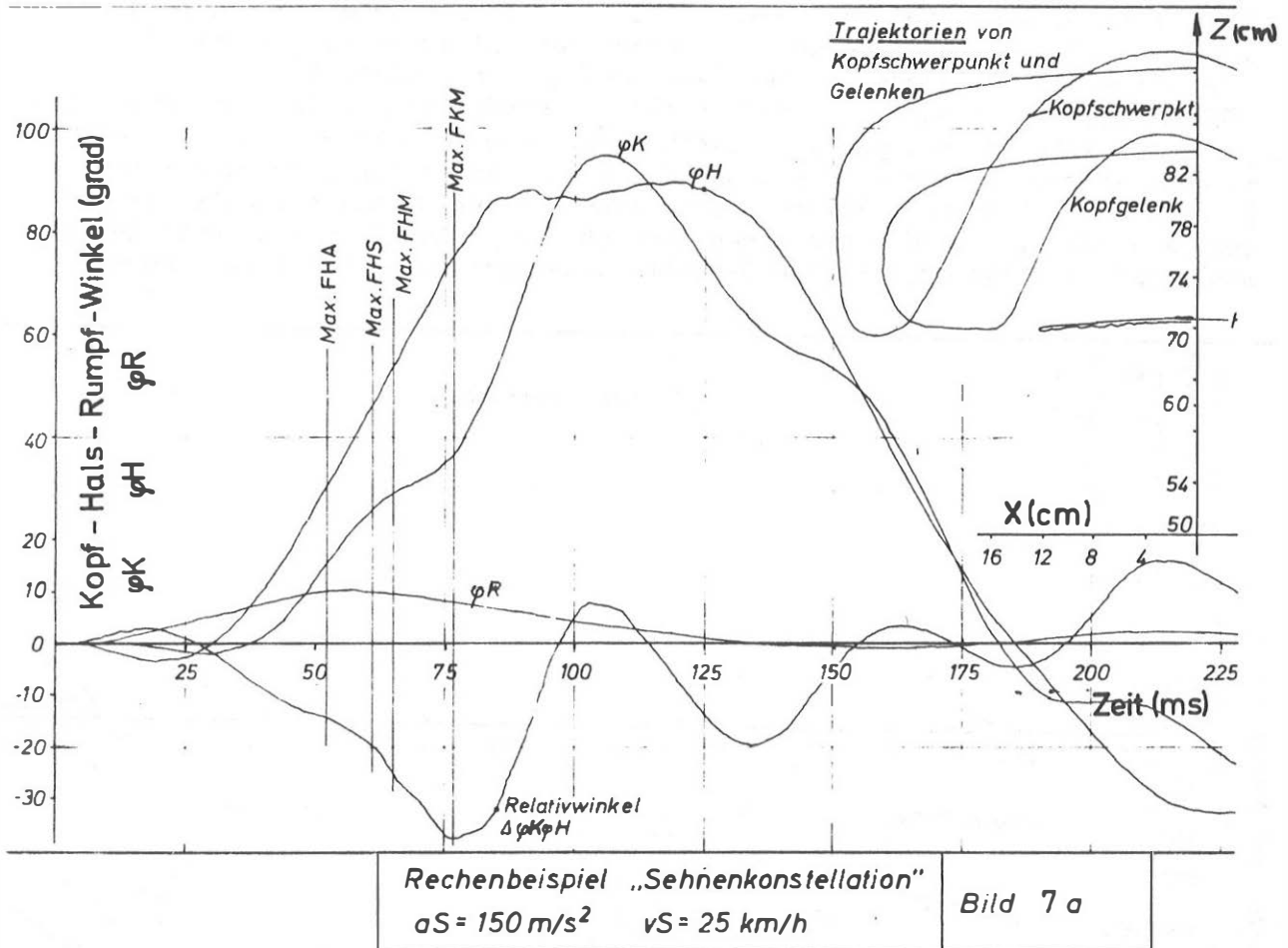
Das heißt, eine hochgezogene Rückenlehne (im Grunde Nackenstütze) ohne Kopfstütze verlagert die Verletzungen aus der unteren HWS nach cranial.

Weitere Hinweise auf das zeitliche Auftreten der Verletzungen geben die Filmaufnahmen einiger Versuche (29, 30, 37), bei denen deutlich ein Abknicken des Halses zu erkennen ist, bevor es zu absoluten Kopfwinkeln von mehr als etwa 45° kommt. Diese Knickstellen stellen sich in den Versuchsprotokollen als Verletzungszentren dar.

Hier kommt offenbar positiv zum Tragen, daß als Versuchskörper die beschriebenen Präparate verwendet wurden, da bei den vollständigen Torsen weder die S-Biegung noch das Aufklappen eines Bewegungssegmentes durch die ausgleichende Haut- und Fettumhüllung auf den Filmaufnahmen so klar zum Ausdruck kommen können.

Die Zuordnung des primären Verletzungsgeschehens zu einem Halswinkel $H = 45^\circ$ entspricht exakt den Ergebnissen, die durch die Rechnersimulation unabhängig von der jeweiligen Modellauslegung gewonnen wurden (Bild 7). Die Auswertung der Simulationsergebnisse ergibt, daß die maximalen Gelenklasten auftreten,

wenn die S-förmige Halsbiegung kurzzeitig in die gestreckte Haltung übergeht und bevor dann der Relativwinkel $\Delta\varphi_{KH}$ seinem absoluten Maximum zustrebt. Das heißt, die Simulation bestätigt die in den Versuchen gewonnenen Anschauungen.



Zum Auftreten von Scherverletzungen bei der Anteflexion

Wie bereits angesprochen, wurden die Whip-lash Verletzungen bisher fast ausschließlich den Auffahrunfällen zugeschrieben, was mit den Erhebungen des Verletztengutes aus Verkehrsunfällen begründet wurde.

Nach Ansicht des Verfassers ist das geringe Auftreten dieser typischen Halsverletzungen jedoch nicht auf grundsätzlich andere physiologische Voraussetzungen sondern allein auf die anderen mechanischen Voraussetzungen zurückzuführen.

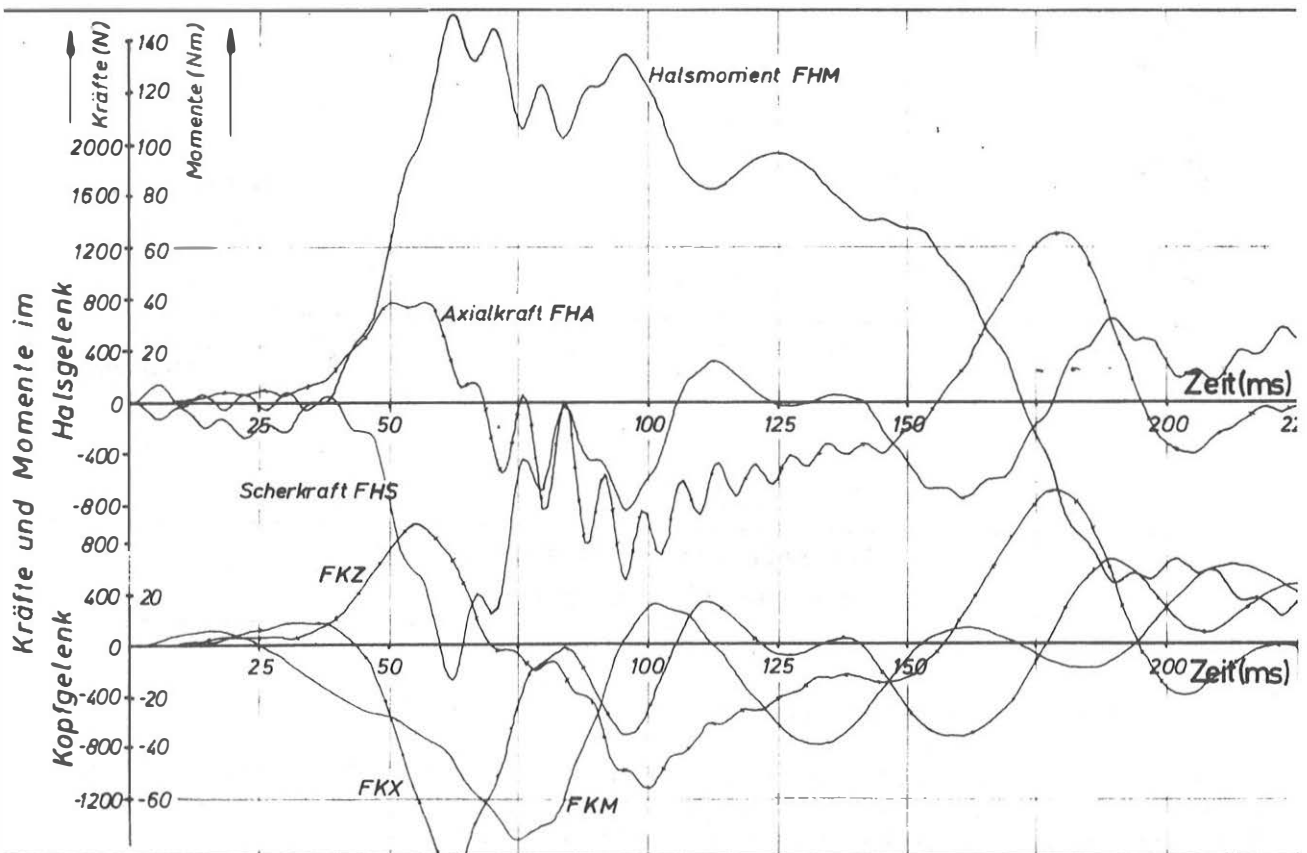
Der zur Zeit geringe Gebrauch von Sicherheitsgurten, oder in den USA nur Beckengurten, hat zur Folge, daß es bei Frontalunfällen fast immer zum Kopfaufprall und damit zu den dafür charakteristischen Schädel- und Halsverletzungen kommt.

Es ist jedoch mit größerer Tragerate bzw. Anschnallpflicht von Sicherheitsgurten zu erwarten, daß hierdurch Schleuderverletzungen auch beim Frontalunfall häufiger auftreten.

Bei den durchgeführten Versuchen zeigte sich, daß für beide Stoßrichtungen der prinzipielle Bewegungsablauf und die resultierenden Verletzungen übereinstimmen, wenn auch die Toleranzgrenzen offensichtlich bei der Anteflexion höher liegen.

Gestützt wird die Auffassung von Schleuderverletzungen auch bei Anteflexion durch die Beobachtungen von RUBINSTEIN, der nach Einführung der Anschnallpflicht in Australien eine größere Anzahl von Halsverletzungen bei angeschnallten als bei ungesicherten Fahrzeuginsassen feststellte.

ERDMANN beschreibt ebenfalls drei Fälle von eindeutigen Whip-lash Verletzungen durch Anteflexion, die alle durch eine abrupte Vollbremsung eingeleitet wurden. In zwei Fällen konnte sogar die Frontalkollision vermieden werden. Es ergaben sich in zwei Fällen Distorsionen an der Halswirbelsäule, im dritten Fall "das Vollbild einer hohen Querschnittslähmung". Das wichtigste ist wohl, daß in allen drei Fällen 3-Punkt Sicherheitsgurte getragen wurden.



Rechenbeispiel „Sehnenkonstellation“

$a_S = 150 \text{ m/s}^2$, $v_S = 25 \text{ km/h}$

Bild 7b

Literatur

- (1) Clemens, H.J.
Burow, K. Experimental Investigation on Injury
Mechanism of Cervical Spine at Frontal and Rear-
Front Vehicle Impacts
Proc. 16th Stapp Conf. 1972
- (2) Burow, K. Zur Verletzungsmechanik der Halswirbelsäule
Inaugural Dissertation an der Technischen Univer-
sität Berlin, 1974
- (3) Erdmann, H. Schleuderverletzung der Halswirbelsäule
in:
Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis
Bd. 56
Hippokrates Verlag Stuttgart, 1973
- (4) States, J.D.
Korn, M.W.
Masengill, J.B. The Enigma of Whiplash Injuries
Proc. of the 13th Annual Conf. of the AAAM
Highway Safety Research Institute,
The University of Michigan, 1963
- (5) Kihlberg, J.K. Flexion-Torsion Neck Injury in Rear Impacts
in:
Proc. 13th Conference of AAAM
Highway Safety Research Institute,
The University of Michigan, 1969
- (6) Nelson, C.L. Detection of Soft-Tissue Injuries of the Cervical
Spine
in:
Proc. 14th Annual Conf. of the AAAM, 47-62
Highway Research Institute
The University of Michigan, 1971
- (7) Fiala, E.
Clemens, H.J.
Burow, K. Verletzungsmechanik der Halswirbelsäule
Forschungsbericht Nr. 99 aus dem Institut für
Kraftfahrzeuge der TU Berlin, 1970
- (8) Rubinstein, E. An Analysis of Fatal Car Crashes in which the
Victim was Wearing a Seat Belt
Proc. IRCOBI, Amsterdam, 1973
pp. 49-58