

Vollbremsbedingter Anstoß des Kopfs an der Kopfstütze

von Dipl.-Ing. Max Spittel und Dr. Manfred Becke, Münster*

Dieser Beitrag befasst sich mit der Bewegung und Belastung von angegurteten Insassen am Ende einer Vollbremsung. Es wurde untersucht, unter welchen Bedingungen der Kopf gegen die Kopfstütze prallen kann. Es zeigte sich, dass bereits bei Vollbremsungen aus Schrittgeschwindigkeit ernst zu nehmende Belastungen auftreten können.

Die auf die Insassen eines Fahrzeuges einwirkende Belastung während einer Frontalkollision ist in der Vergangenheit ausgiebig untersucht worden.^{1,2,3} Speziell zu dem Themenkomplex des Kopfanpralls existiert jedoch nur wenig Material.^{4,5} Insbesondere für die Insassenbelastungen beim „Sekundär“-Anprall an die Kopfstütze sind bislang nahezu keine detaillierten Untersuchungen veröffentlicht.⁶

Im Rahmen eines Gerichtsauftrags sollte ein ähnlich gelagerter Fall, mit einem Kopfanprall in der Sekundärphase, analysiert werden. Der Fahrer eines Wohnmobils schilderte, dass er in der ersten Phase der Kollision durch Vollbremsung und den anschließenden Aufprall nach vorne geschleudert wurde. Danach sei er in der Sekundärphase durch den Haltegurt zurückgerissen nach hinten geschleudert worden und mit dem Hinterkopf gegen eine Holzwand geprallt, die sich hinter dem Fahrersitz des Wohnmobils befand. Es stellte sich die Frage, ob es zu dem dargestellten Anprall an der Rückwand kam und mit welcher Intensität dieser Anprall erfolgen kann.

Da die Bewegung des Kopfs nach hinten in Verbindung mit einer Vollbremsung nach Kollisionen bisher nicht detailliert bekannt war, wurde die folgende Untersuchung durchgeführt.

Aus der Auswertung von diversen Schlittentests ist bekannt, dass es nach einer Frontalkollision nicht zu einem Aufprall des Kopfes an die Kopfstütze kommt, s. Abb. 1 und 2 eines Schlittentests. In der Abb. 1 ist die am weitesten vorgelagerte Position bei einer kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung von 9,5 km/h dargestellt.

Abb. 2 zeigt die Position, in die der Proband am Ende der Kollisionsphase zurückkehrte.

Der Kopf befand sich im Vergleich zur Ausgangsposition weiter von der Kopfstütze entfernt, wie anhand einer Auswertung eines sog. Targets (schwarz/weiß Punkts) festzustellen ist.



Abb. 1: Am weitesten vorgelagerte Position⁷



Abb. 2: Endposition⁷

In der Abb. 3 ist die Kopfbewegung in Längsrichtung des Probanden (orangefarbene Linie) gegen die Zeit dargestellt. Ausgehend von der „0“-Position verlagerte sich der Kopf um etwa 240 mm nach vorne, bewegte sich dann wieder zurück und kam etwa 90 mm vor der ursprünglichen Ausgangsposition zum Stillstand.

* Die Autoren sind Sachverständige für Straßenverkehrsunfälle im Ingenieurbüro Schimmelpfennig + Becke, Münster.

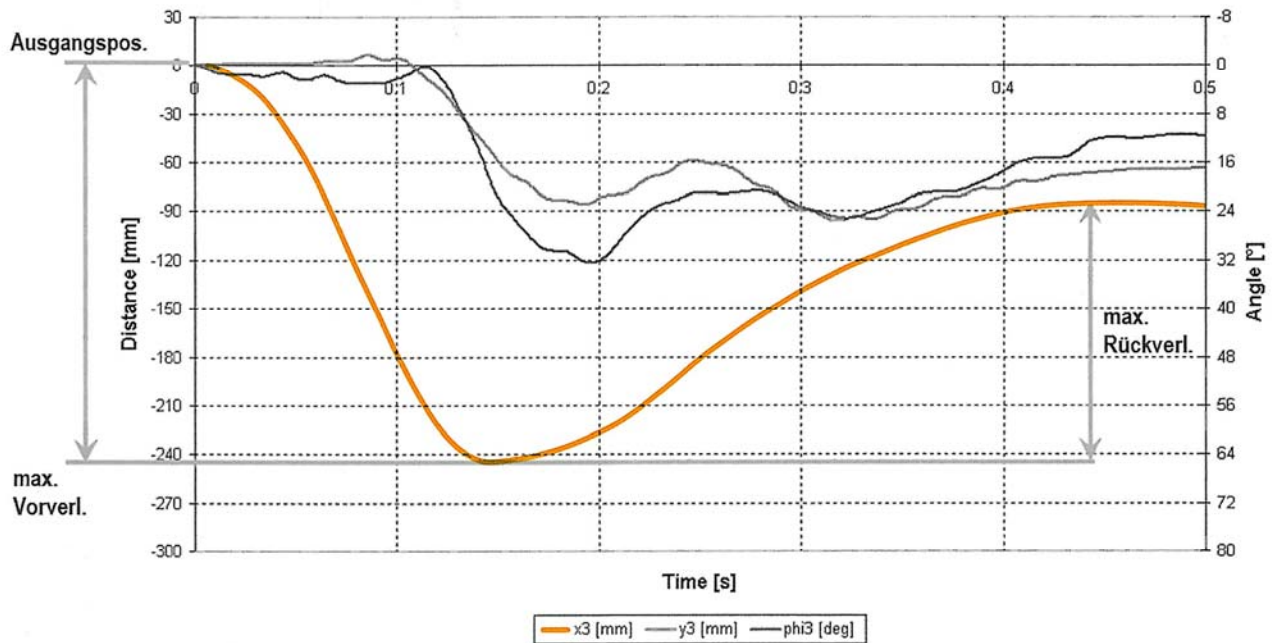


Abb. 3: Kopfbewegungen bei $\Delta v = 9,5 \text{ km/h}$

Auch bei Pkw-Pkw-Kollisionen wurde dieses Verhalten beobachtet, wie das nachfolgende Beispiel zeigt.

Bei einem Versuch mit Freiwilligen, bei dem ein Golf auf einen anderen Golf auffuhr, betrug die Kollisionsgeschwindigkeit $19,4 \text{ km/h}$ und die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung des auffahrenden VW Golf $11,8 \text{ km/h}$.



Abb. 4: Versuchsvideo⁷

Im Film, s. Abb. 4, kann beobachtet werden, dass der Fahrer ursprünglich mit dem Kopf an der Kopfstütze anlag und sich auch am Ende der Bewegung mit dem Kopf wieder an die Kopfstütze heranbewegte.

Die Frontalkollision auf ein anderes Fahrzeug kann somit nicht Ursache dafür sein, dass der Kopf in der Sekundärphase hinten anstößt.

Daraufhin wurden erste Fahrversuche mit einem Pkw (BMW) durchgeführt, um zu testen, ob sich überhaupt ein Anstoß an die Kopfstütze darstellen lässt. Für den Fall, dass die Vollbremsung bis zum absoluten Stillstand aufrechterhalten bleibt, kommt es ganz am Schluss, wenn das Fahrzeug gerade steht, zu einem Ruck. Wenn der Fahrer sich vorbereitend am Lenkrad festhält, kommt es nicht zum Kopfaufprall. Als Beifahrer ist der Ablauf derart schnell, dass man als Be-

obachter überhaupt nicht entscheiden kann, ob überhaupt ein Kopfaufprall an der Kopfstütze auftrat. Erst die Auswertung der Filmaufnahmen bestätigte dieses.

Der Ruck am Ende einer stärkeren Bremsung könnte die Ursache für die rückwärtige Insassenbewegung sein. Speziell durch die Elastizitäten in Fahrwerk und Reifen ist eine schleifenförmige Aufbaubewegung nach dem Stillstand der Räder zu erwarten. Gemäß den Überlegungen sollten je nach Fahrzeugklasse und den damit verbundenen Unterschieden bzgl. der Fahrwerkskonstruktionen und Reifenquerschnitte mehr oder weniger stark ausgeprägte Beschleunigungen auftreten. Die nach hinten gerichteten Aufbaubewegungen werden dann über das Gurtsystem auf den Insassen übertragen, sodass dieser sich nach hinten bewegt.

Um die Überlegungen im Detail zu untersuchen, wurden Versuche mit einem VW Passat durchgeführt. Aufgezeichnet wurden dabei die Fahrzeugbewegung relativ zur Umgebung, die Beschleunigung sowie die resultierende Insassenbewegung. Die Abb. 5 zeigt den Versuchsaufbau am Pkw.



Abb. 5: Versuchsaufbau – Pkw (VW Passat)⁸

Es wurden zwei Vollbremsungen aus Schrittgeschwindigkeit und aus ca. 20 km/h durchgeführt. Dabei wurde das Versuchsfahrzeug aus größerer Entfernung gefilmt, um die Aufbauabewegungen zu dokumentieren. Als Messpunkte dienten eine Zielvorrichtung am Kennzeichen, dessen Bewegungen sich vor der im Hintergrund aufgestellten strukturierten Wand gut auswerten ließen und ein Punkt auf Kopfhöhe an der B-Säule. Die Bewegung des Probanden (Beifahrer) wurde vor einem Messstab gefilmt. Die Synchronisierung der Videodaten erfolgte über einen manuell ausgelösten Lichtblitz.

Spezielles Augenmerk dieser Versuche galt dem Zusammenhang zwischen Aufbau- und Insassenbewegung. Da dem Fahrer grds. bekannt ist, wann die Versuche und die damit einhergehenden Belastungen beginnen, wird er immer vorbereitend automatisch eine Abwehrhaltung einnehmen. Aus diesem Grund wurden die Bewegungsabläufe des Beifahrers untersucht.

Um die Vorspannungen im Muskelapparat des Probanden zu verhindern bzw. zumindest zu minimieren, wurden vorab einige Testbremsungen durchgeführt und anschließend bei den Versuchen variable

Anfahrtsstrecken und Zeiten gewählt, sodass dem mit geschlossenen Augen auf dem Beifahrersitz sitzenden Probanden der genaue Zeitpunkt der Bremsung verborgen blieb. Auf diese Weise konnte eine unvoreingenommene Insassenbewegung sichergestellt werden.

Die Untersuchungen wurden mit einem Pkw der Marke VW Passat Kombi durchgeführt, s. Abb. 5 und werden im Folgenden detailliert erläutert.

In Abb. 6 sind die Bewegungsbahnen der Zielvorrichtung an der Fahrzeugfront und des Fixpunkts an der B-Säule auf Kopfhöhe dargestellt. Die erwartete schleifenförmige Bewegung der Fahrzeugfront kann bestätigt werden. Da sich das Fahrzeug in etwa um eine Achse in Höhe der Vordersitze dreht, erfolgt die schleifenförmige Bewegung mit nennenswertem senkrechten Hub an der Fahrzeugfront. Im Bereich der B-Säule wird sie dann in eine überwiegend translatorische Bewegung in Fahrzeughängsrichtung überführt. Für die hier untersuchten Insassenbelastungen durch einen Kopfanprall an der Kopfstütze ist der Rückversatz gegen die ursprüngliche Fahrtrichtung von rd. 7 cm ausschlaggebend.

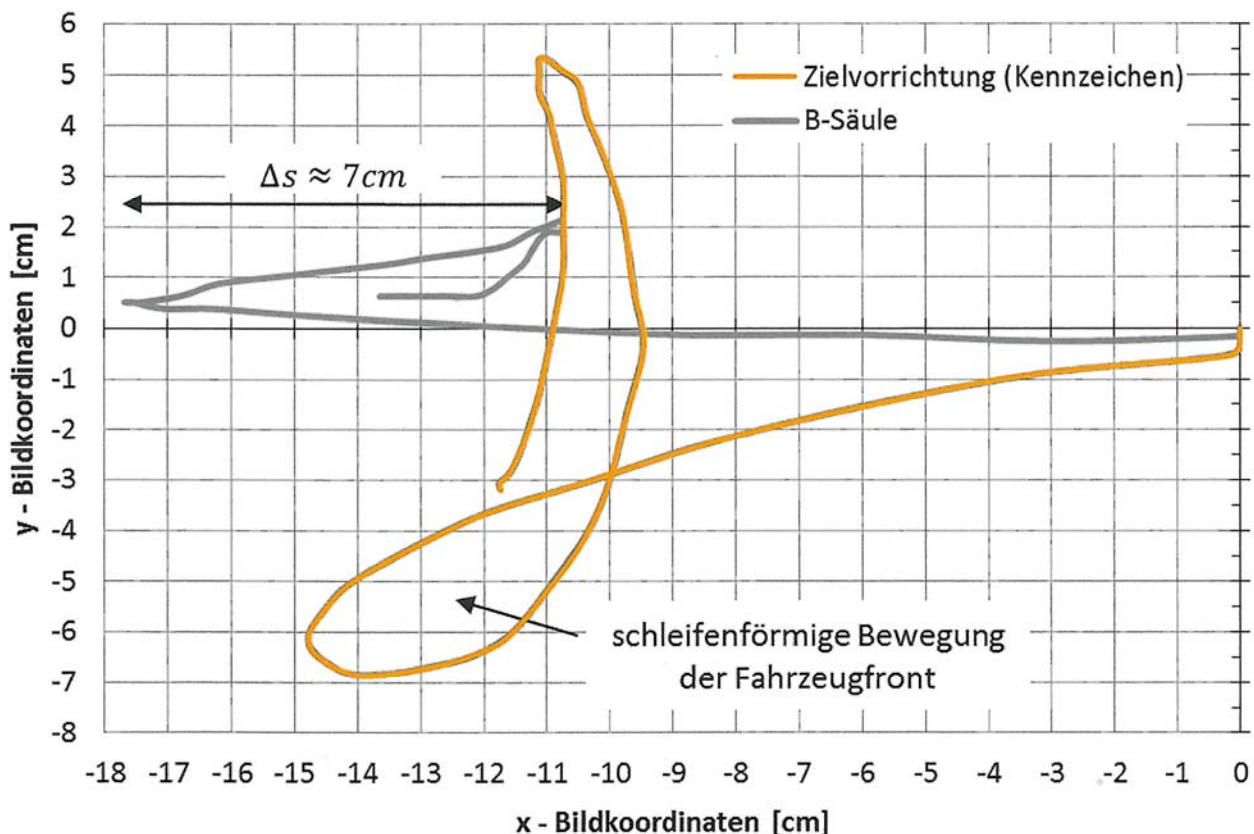


Abb. 6: Aufbaubewegungen Pkw

In Abb. 7 sind die dazugehörigen Insassenbewegungen über einer Fotomontage überlagert, die sowohl

die Ausgangsposition als auch die maximale Vorverlagerung und den Kopfanprall zeigt.

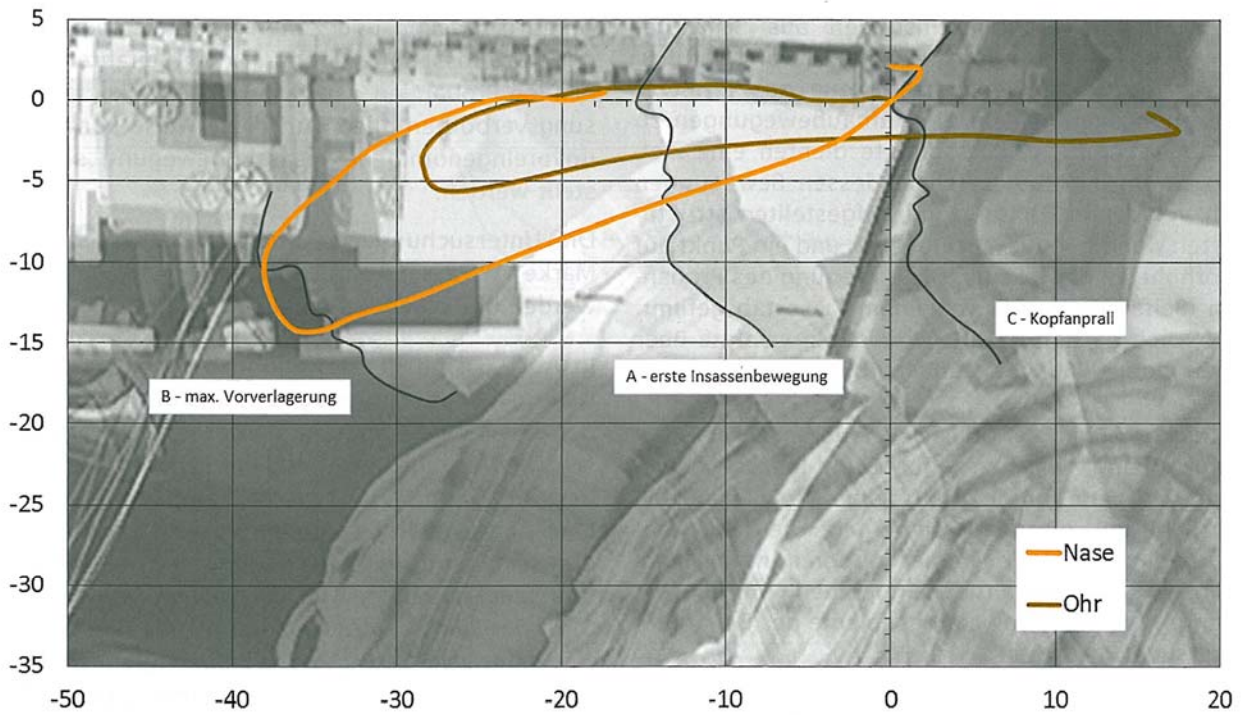


Abb. 7: Resultierende Insassenbewegung⁸

Interessant ist der zeitliche Zusammenhang zwischen der Insassen- und der Aufbaubewegung:

Insassen. Durch die zurückschwingende Karosserie kommt das Gurtsystem dem sich nach vorne bewegenden Insassen entgegen.

Die Rückwärtsbewegung der B-Säule in Abb. 8 erfolgt kurz vor der maximalen Vorverlagerung des

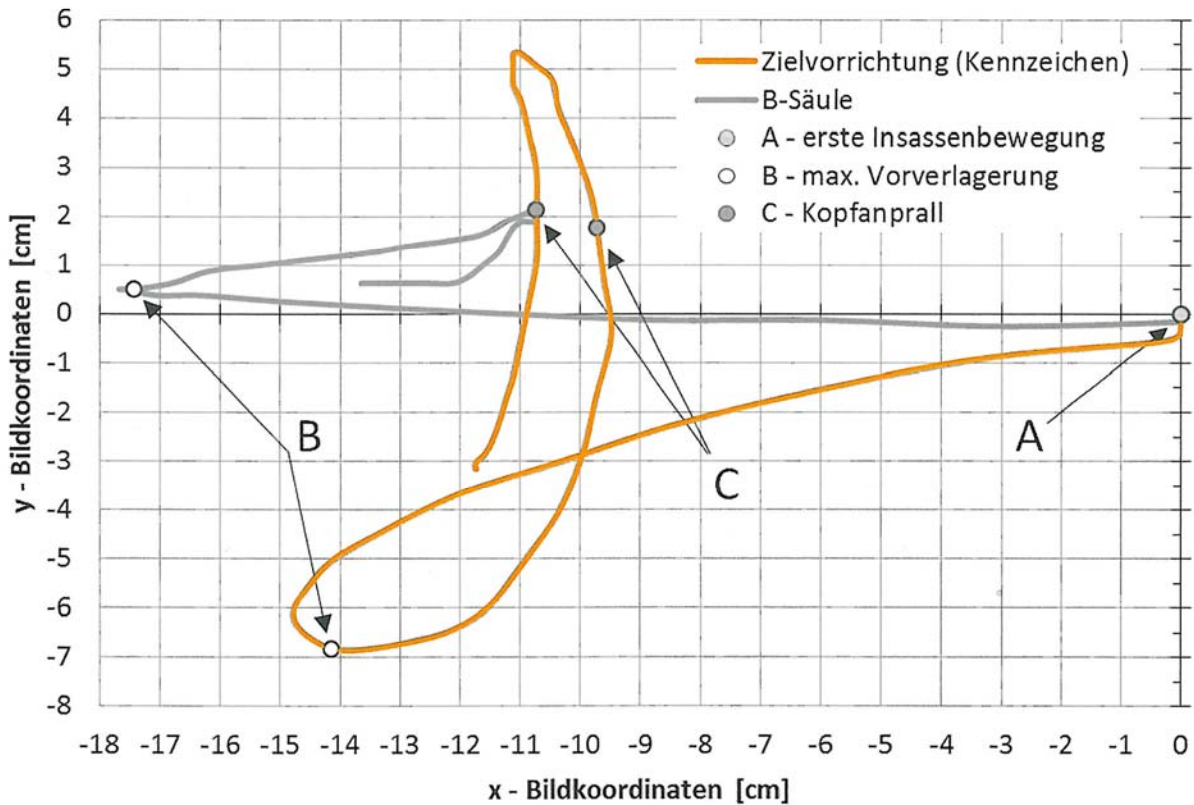


Abb. 8: Aufbaubewegungen des Pkw in Relation zu der Insassenposition

Aus den jetzt bekannten Bewegungsabläufen des Probanden, s. Abb. 7, lassen sich auch die Geschwindigkeitsverläufe relativ zum Fahrzeug darstellen.

In Abb. 9 ist die Kopfgeschwindigkeit relativ zum Fahrzeug gegen die Zeit aufgetragen. Die Zeitskala bezieht sich auf den Erstkontakt zwischen Kopf und Kopfstütze. Etwa 0,2 s nach den ersten erkennbaren Bewegungen des Probanden relativ zum Fahrzeug wird die Position der maximalen Vorverlagerung (begrenzt durch das Gurtsystem) erreicht. In der sich anschließenden

Zeitspanne von 0,1 s bewegt sich der Insasse dann wieder nach hinten. Eine weitere Zehntelsekunde später kommt es zum Kopfanprall an der Kopfstütze mit einer Geschwindigkeitsänderung des Kopfes – bezogen auf eine Zeitdauer 0,1 s – von 18 km/h, was einer mittleren Kopfbeschleunigung von ca. 50 m/s² oder rund der fünffachen Erdbeschleunigung entspricht. Nochmals zur Erinnerung, hierbei handelte es sich nicht um eine Kollision, sondern „lediglich“ um eine sehr kurze Belastung durch eine Vollbremsung aus Schrittgeschwindigkeit.

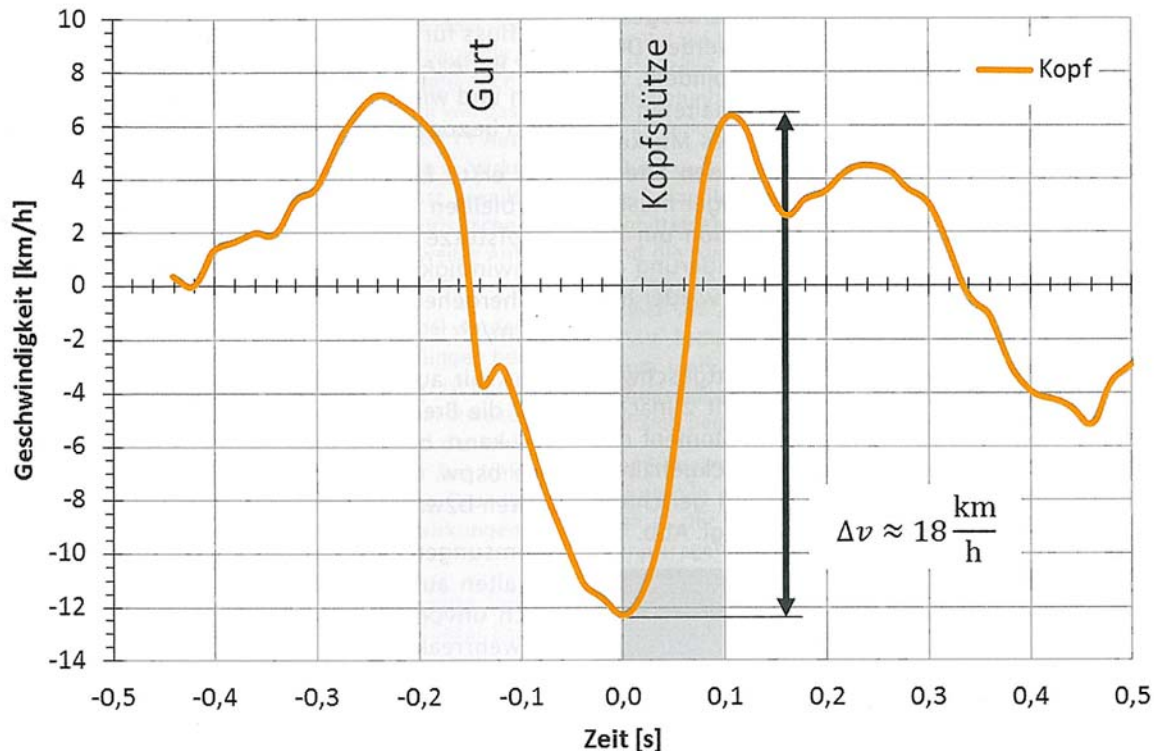


Abb. 9: Kopfgeschwindigkeit

Schon während der Versuchsdurchführung ließ sich beobachten, dass die rückwärtige Insassenbewegung bei den Bremsungen aus höheren Geschwindigkeiten – analog zu dem Gurtschlittentest (Frontalkollision) – schwach ausfielen. Häufig wurden nicht einmal die Ausgangspositionen erreicht.

An dieser Stelle stellt sich die Frage, durch welchen Einfluss es aus Schrittgeschwindigkeit zu einem heftigen Kopfanprall kommt, wohingegen eine Bremsung mit gleicher Verzögerung und gleichem Ruck am Ende aus höherer Geschwindigkeit vergleichsweise unkritisch ist?

Erklären lässt sich dieser Effekt über die Muskelvorspannung und die Antwortzeit.

In der Medizin wird zwischen der koordinierten Reflexbewegung und dem Eigenreflex unterschieden. Letztere ist entscheidend für das hier auftretende Phänomen aus höheren Geschwindigkeiten und der damit einhergehenden entsprechend größeren Abwehrzeit.

Bei einer **koordinierten Reflexbewegung** wird auf einen Reiz hin eine mehr oder weniger große Gruppe von Muskeln aktiviert. Medizinische Studien ergaben,

dass hierfür eine Zeit zwischen 0,3 und 0,8 s erforderlich ist.⁹

Wird also bei einer starken lang anhaltenden Bremsung dem Probanden eine „ungewollte“ Lageveränderung taktil/kinästhetisch gemeldet, reagiert der Körper reflektorisch im Rahmen einer koordinierten Reflexbewegung, um die äußeren Bewegungseinflüsse aufgrund von Trägheit zu minimieren. Hinzu kommt, dass der Vorgang einer Vollbremsung bekannt ist, sodass die zu erwartende rückwärtige Bewegung einkalkuliert und abgefangen wird. Bremsungen mit einer Zeitdauer von mehr als 0,3 – 0,8 s können somit durch eine koordinierte Reflexbewegung kompensiert werden.

Interessant sind Bremsungen mit geringerer Gesamtzeitdauer, sodass für eine koordinierte Reflexbewegung nicht genügend Zeit zur Verfügung steht. In den Versuchen wurde dieses Szenario bereits mit Bremsungen aus Schrittgeschwindigkeit untersucht. Die Gesamtdauer betrug dabei lediglich rd. 0,4 s. Das Ende der Vorwärtsbewegung der Insassen bzw. der Beginn der rückwärtigen Bewegung erfolgte nach rd. 0,2 s, sodass es dem Probanden unmöglich war, die Bewe-

gung im Rahmen einer koordinierten Reflexbewegung über Muskelspannung abzufangen bzw. zu dämpfen.

Durch die Vorverlagerung wird ein sog. **Eigenreflex** im Nackenmuskel induziert. Im Gegensatz zu einer koordinierten Reflexbewegung läuft ein Eigenreflex, bei welchem sowohl der auslösende Reiz, als auch die Reflexantwort dasselbe Organ betreffen, innerhalb einer Zeitdauer von 0,1 – 0,2 s ab und ist damit deutlich schneller.⁹ Ein bekannter Eigenreflex ist der Patellarsehnenreflex, der mit einem kurzen Schlag knapp unterhalb des Knies auf das Kniescheibenband des entspannten Musculus quadriceps femoris ausgelöst werden kann. Bedingt durch den Schlag werden Dehnungsrezeptoren im Muskel, die Muskelspindeln, angeregt. Über einen im Rückenmark verschalteten Reflexbogen erfolgt dann die Kontraktion des Muskels. Die Antwort besteht in einer kurzdauernden Streckbewegung im Kniegelenk. Der Sinn derartiger muskulärer Reflexe besteht in der Gegenregulation um bei Stößen von außen oder plötzlicher Lageänderung die jeweilige Haltung aufrechtzuerhalten oder wieder herzustellen.

Im konkreten Bremsversuch aus Schrittgeschwindigkeit bewegt sich der Insasse insgesamt zunächst durch seine Trägheit nach vorn, erst im Moment des Gurtanpralls wird der Oberkörper zurückgehalten. Hierbei vollzieht der Kopf eine nach vorn gerichtete Bewegung, eine sog. Flexionsbewegung, vgl. Abb. 10.

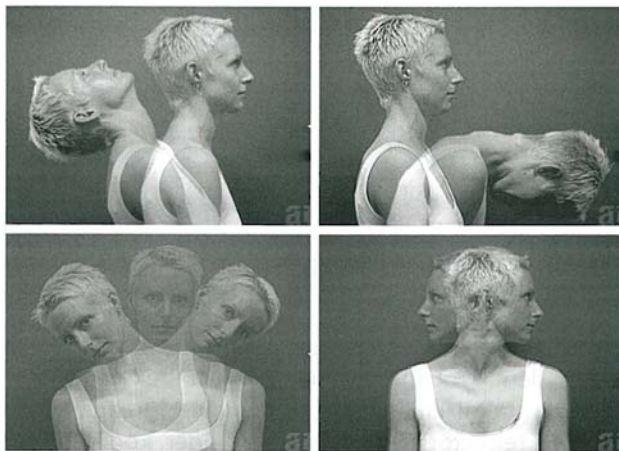


Abb. 10: Kopf-/Halsbewegungen¹⁰

Die Nackenmuskulatur wird schlagartig gedehnt und der Eigenreflex ausgelöst. Der Nackenmuskel kontrahiert aufgrund der kurzen Bremsdauer genau zu dem Zeitpunkt, an dem der Insasse ohnehin durch die Aufbaubewegung, übertragen durch das Gurtsystem, zurückverlagert wird. Die gemessene Kopfanprallgeschwindigkeit von rd. 12 km/h an die Kopfstütze setzt sich demnach aus zwei Einflüssen zusammen.

Aus den bisher gewonnen Daten folgt, dass sich der Fahrzeugaufbau im Bereich der B-Säule relativ gleichmäßig um 7 cm innerhalb von 0,2 s zurückverlagert, was einer mittleren Geschwindigkeit von rd. 1,3 km/h entspricht. Selbst wenn dieser Einfluss vollständig auf den Insassen übertragen würde, kann somit der heftige Kopfanprall nicht erklärt werden.

Die Aufbaubewegungen sind demnach nur als ein eher geringer Einfluss zu werten.

Eine „Katapultwirkung“ des Gurtsystems, wie sie häufig vorgetragen wird, dürfte aus technischer Sicht ebenfalls nur eine untergeordnete Rolle spielen, da gerade bei der Gurtauslegung speziell darauf geachtet wird, dass das Gurtsystem als solches möglichst frei von Dehnung sind, um die Insassenverzögerung im Crash-Fall über die heutzutage größtenteils serienmäßigen Gurtkraftbegrenzungssysteme zu optimieren.

Aus diesen Überlegungen heraus verbleibt als Haupteinfluss für die äußerst heftigen Kopfbelastungen nur der Reflexeinfluss. Welche Kräfte dabei auftreten können und wie genau der Verlauf während der Kontraktion bezogen auf die Zeit ist, wird noch untersucht.

Als erste Erkenntnis der bisher gewonnenen Daten verbleiben die hohe Anprallgeschwindigkeit an der Kopfstütze von 12 km/h sowie die folgende Geschwindigkeitsänderung von 18 km/h und die damit einhergehende mittlere Kopfbeschleunigung von ca. 50 m/s².

Dies gilt ausschließlich für unvorbereitete Insassen. Der die Bremsung bewusst einleitende Fahrzeugführer kann bereits gleichzeitig Abwehrmechanismen wie bspw. Muskelkontraktion, Abstützen oder Festhalten bzw. eine Kombination daraus einleiten.

Bremsungen aus höheren Geschwindigkeiten beinhalten automatisch eine längere Zeitdauer, sodass auch unvorbereiteten Insassen ausreichend Zeit für Abwehrreaktionen zur Verfügung steht.

Ein Anstoß des Kopfes an der Kopfstütze tritt vor allem bei Bremsungen mit sehr geringer Zeitdauer auf, wie sie hauptsächlich bei straff gefederten Fahrzeugen aus niedrigen Geschwindigkeiten zu erwarten sind.

Quellen:

- 1 M. DANNER: Gurt oder Tod! 1993
- 2 M. WINNINGHOFF/B. WALTER/M. BECKE: Gurtschlitten – Untersuchung der biomechanischen Belastung, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 2000, S. 19 ff.
- 3 W. HUGEMANN, in: W. HUGEMANN (Hrsg.), Unfallrekonstruktion, 1. Aufl. 2007.
- 4 M. BECKE UREKO-Spiegel 7/2006
- 5 S. MEYER VRR 2009, 18, 22.
- 6 M. BECKE Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 2007, 294, 299.
- 7 Schlittentests: Dr. Steffan Datentechnik, DSD Linz Österreich, www.dsd.at.
- 8 *crashtest-service.com* GmbH, Münster.
- 9 H. LIPPERT: Lehrbuch Anatomie, 6. überarbeitete Aufl. 2003, S. 144 –145
- 10 Ingenieurbüro Schal und Meyer; Schimmelpfennig + Becke Lübeck/Schwerin GmbH.