

Burkhard Walter*, Stefan Schneider**
Karl-Heinz Schimmelpfennig***

Stand- und Sitzsicherheit im innerstädtischen Linienverkehr – Eine Untersuchung der tolerierbaren Beschleunigungen –

Zusammenfassung

Die maximale Belastbarkeit von Kraftomnibusinsassen im Hinblick auf Stand- und Sitzsicherheit im innerstädtischen Linienverkehr wird analysiert. Es werden Erfahrungen einiger Verkehrsbetriebe, Literaturangaben, sowie theoretische Grundlagen aufgezeigt. Im Vordergrund steht die Erörterung von Versuchsergebnissen eigener Busfahrversuche mit Probanden.

Summary

The maximum resilience of bus passengers in view of sitting and standing stability in the urban regular traffic is analysed. Experiences of some transport services, bibliographical references and theoretical basics are shown. To the fore is the discussion of results of own driving experiments on busses with test persons.

1 Einleitung

Der Kraftomnibus wird in vielen Publikationen als eines der sichersten Verkehrsmittel überhaupt genannt. Gemessen an seiner Verkehrsleistung nach Personenkilometern ist die Gefahr, mit dem Bus zu verunglücken, gegenüber dem Pkw deutlich geringer.

Jedoch ist zu bedenken, daß auch wegen der negativen Schlagzeilen, die nach schweren Busunglücken in der Presse zu finden sind, das Thema der bei Bussen zur Anwendung kommenden Sicherheitstechnik für Bushersteller und -betreiber ständig präsent ist. Bisher ließen sich Busse aufgrund ihrer Struktur eher mit Nutzfahrzeugen als mit Personenkraftwagen vergleichen. Daher wurde die Entwicklung der passiven und aktiven Sicherheitssysteme bei Bussen bisher nicht in dem Maße wie beim Pkw vorangetrieben. Erst in den letzten Jahren sind verstärkt Maßnahmen ergriffen worden, beispielsweise die Aufbaufestigkeit der Busse im Hinblick auf die passive Sicherheit zu optimieren. Auch Fragestellungen wie die Gurtpflicht finden erst seit kurzem Berücksichtigung. Im Bereich der aktiven Sicherheit sind als Beispiele die Ausrüstung der Fahrzeuge mit Antiblockiervorrichtungen und die ergonomische Gestaltung des Fahrerplatzes zu nennen.

Es fällt jedoch auf, daß die Anwendung passiver Sicherheitselemente bei Linienbussen nicht im gleichen Maße forciert wird, wie es bei Reisebussen der Fall ist. Die geringeren Fahrgeschwindigkeiten von Linienbussen erwecken den Anschein, daß die Folgen kollisionsbedingter Unfälle entsprechend niedrig ausfallen müssen. Dennoch zeigen Erfahrungen aus der Praxis des forensisch tätigen Sachverständigen, daß sich immer wieder Unfälle ereignen, die Verletzungen von Businsassen nach sich ziehen, ohne daß der Bus in eine Kollision verwickelt war. In vielen Fällen sind die Verletzungen darauf zurückzuführen, daß der verunfallte Fahrgast sich nicht ständig ausreichend sicheren Halt verschafft hat, wie es die Beförderungsbedingungen der Verkehrsbetriebe nach ständiger Rechtsprechung vorschreiben.

Zur Ermittlung der Stand- und Sitzsicherheit von Fahrgästen im Linien-

bus ist im Rahmen einer weiteren Studie (vgl. [1]) eine Untersuchung im Ing.-Büro Schimmelpfennig + Becke durchgeführt worden.

2 Die gegenwärtige Situation

2.1 Erfahrungen von Verkehrsbetrieben

Eine Kontaktaufnahme mit verschiedenen Verkehrsbetrieben schien erfolgversprechend, um die gegenwärtige Situation zu erfassen. Leider führte keiner der befragten Betreiber eine schriftliche Statistik über die Arten der Unfälle, die Personenschäden, und deren Schwere und Häufigkeit.

Die Erfahrungen der Unternehmen ähnelten sich in folgenden Punkten:

- Die Praxis zeigt, daß es insbesondere zu Stürzen von Fahrgästen auf nassen und rutschigen Böden in den Wintermonaten kommt.
- Überwiegend ältere Frauen gelten als Gruppe mit dem höchsten Verletzungsrisiko.

Die zum Unfall führenden Umstände haben dabei sehr oft ähnlichen Charakter. Der Fahrgast bewegt sich beispielsweise während des Anfahrvorgangs, nach dem Einsteigen, zu einem Sitzplatz oder befürchtet, nicht rechtzeitig den Bus während der Verweilzeit an einer Haltestelle verlassen zu können und geht schon während der Bremsphase des Busses zum Ausgang. Insbesondere für die Gruppe der älteren Frauen trifft lt. Auskunft der Verkehrsbetriebe der letztgenannte Fall zu. Weitere Unfälle sind bei Fahrgästen mit Handgepäck zu registrieren oder bei Fahrgästen, die während des Durchfahrens einer Kurve die Fahrkarte entwerfen oder den Haltewunschknopf betätigen. Es ist zu berücksichtigen, daß bei stehenden Fahrgästen aufgrund der langen Fallwege der Schweregrad der Verletzungen sehr hoch ist. Vornehmlich ältere Personen haben ein deutlich höheres Verletzungsrisiko als jüngere.

Treten diese Verletzungen bei Unfällen auf, bei denen kein weiterer Verkehrsteilnehmer beteiligt ist, so sind die Verkehrsbetriebe im allgemeinen nicht verpflichtet, für den dem Fahrgast entstandenen Schaden aufzukommen, da jeder Fahrgast lt. den »Allgemeinen Beförderungsbedingungen für den Straßenbahn- und Obusverkehr sowie den Linienverkehr mit Kraftfahrzeugen« [2] verpflichtet ist, sich ständig ausreichend sicheren Halt zu verschaffen.

Dennoch werden die Fahrer angehalten, ihre Fahrweise auf die Probleme der Personenbeförderung abzustimmen. Während regelmäßiger Weiterbildung in betriebseigenen Fahrschulen wird den Fahrern eine besonders vorausschauende und rücksichtsvolle Fahrweise gelehrt. Obwohl inzwischen fast sämtliche Linienbusse mit Automatikgetrieben ausgerüstet sind, wird dem Anfahrvorgang besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Auch das Abbremsen und Einlenken in Haltebuchten und Kurven wird in den Schulungen behandelt. Des weiteren unterliegen die Fahrer stichprobenartigen Kontrollen durch verdeckt arbeitende Fahrmeister, die die Fahrweise der Busfahrer überprüfen.

2.2 Literatur

Es sind lediglich zwei Untersuchungen bekannt, die sich mit dem Thema Stand- und Sitzsicherheit im Linienbus beschäftigten.

Eine englische Studie des Transport and Road Research Laboratory aus dem Jahre 1980 [3] gibt Auskunft über den Vorgang des Aufstehens und Verlassens eines Sitzplatzes. Es wird angegeben, daß Beschleunigungen bis $\pm 1,5 \text{ m/s}^2$ problemlos toleriert werden können. Ein Festhalten mit beiden Armen ist mit Kräften, die 60 bis maximal 70 % der Körpergewichtskraft entsprechen, gut möglich. Das Festhalten mit nur einem Arm wird von älteren Personen bei Kräften von bis zu 25 % der Körpergewichtskraft als gerade noch akzeptabel empfunden. Weiterhin wird in der Studie eine Erhebung von Unfallzahlen, die von 30 Busbetreibern mit insgesamt 30.000 Fahrzeugen über einen Zeitraum von zwölf Monaten in Großbritannien zusammengetragen wurden, erwähnt. Ein Anteil von 56 % der Fahrgastverletzungen trat bei Unfällen auf, in denen der Bus nicht in eine Kollision verwickelt war. Bei diesen Unfällen lag der Anteil an verletzten Personen über 60 Jahren bei 43 %. Der Anteil dieser Altersgruppe an den Gesamtfahrgastzahlen betrug jedoch weniger als 20 %. Der Anteil verletzter weiblicher Fahrgäste war generell höher als der männlicher. Weiterhin wird bemerkt, daß sich die Unfälle insbesondere beim Ein- und Ausstieg und beim Gehen zwischen den Sitzreihen ereigneten.

*Dipl.-Ing. Burkhard Walter,

**Dipl.-Ing. Stefan Schneider,

***Dipl.-Ing. Karl-Heinz Schimmelpfennig, öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Straßenverkehrsunfälle und für Unfälle mit mechanisch technischem Gerät, IHK Münster, c/o Ing.Büro Schimmelpfennig + Becke, Münsterstraße 101, 48155 Münster-Wolbeck

De Graaf und van Weperen [4] veröffentlichten 1995 eine experimentelle Untersuchung zum Thema »Gleichgewicht und Beschleunigung«. Die Autoren benutzten für ihre Versuche ein Laufband, auf das sich die Probanden mit geöffneten Augen und den Füßen zusammenstehend zu stellen hatten. Die Mediziner fanden heraus, daß die maximal ertragbaren Beschleunigungen ohne sich zusätzlich festzuhalten in Blickrichtung $0,5 \text{ m/s}^2$, entgegen der Blickrichtung $0,8 \text{ m/s}^2$ und bei seitlicher Beschleunigung des Probanden $0,3 \text{ m/s}^2$ betragen konnten, ohne daß die Versuchspersonen das Gleichgewicht verloren.

Es wird darauf aufmerksam gemacht, daß die Standsicherheitsgrenze bei älteren Probanden geringer ist als bei jüngeren Personen. Eine genauere altersabhängige Beschreibung der Standsicherheit erfolgt nicht.

Ergänzend sind Messungen der real auftretenden Quer- und Längsbeschleunigungen in Bussen und Straßenbahnen durchgeführt worden. Als Ergebnis wird angegeben, daß diese in ein Längsrichtung 1 bis $2,2 \text{ m/s}^2$ betragen können. Die Querbeschleunigungen, denen die Bussinsassen ausgesetzt werden, können Werte bis zu 4 m/s^2 annehmen.

2.3 Eigene Messungen

In der vorbereitenden Phase der Untersuchung des Ing.-Büros Schimmelpfennig + Becke wurden eigene stichprobenartige Messungen im Linienverkehr des Stadtgebietes Münster zur Frage der auf den Fahrgast wirkenden Quer- und Längsbeschleunigungen durchgeführt. Übereinstimmend mit den Erkenntnissen von de Graaf und van Weperen läßt sich festhalten, daß Querbeschleunigungen höhere Werte annehmen können, als Längsbeschleunigungen. Die ermittelten Längsbeschleunigungen lagen im Bereich von maximal $2,5 \text{ m/s}^2$, die höchsten Querbeschleunigungen im Bereich von $3,2 \text{ m/s}^2$.

3 Theoretische Grundlagen

Das freie Gehen und Stehen eines Fahrgastes, d.h. ohne Abstützung der Arme an einer Haltestange- bzw. Schlaufe, ist eigentlich eine Ausnahme der möglichen Positionen im Bus, stellt jedoch die untere Grenze der Standsicherheit dar. Deswegen soll an dieser Stelle auf die wirkende Kräfte, welche in Bild 1 dargestellt sind, eingegangen werden.

Die Gewichtskraft F_G greift idealisiert im Körperschwerpunkt des Menschen an. Die vertikale Lage dieses Punktes befindet sich in einer Höhe, die nach R. Döschel [5] ca. 57 % der Körperhöhe beträgt. Wirken keine

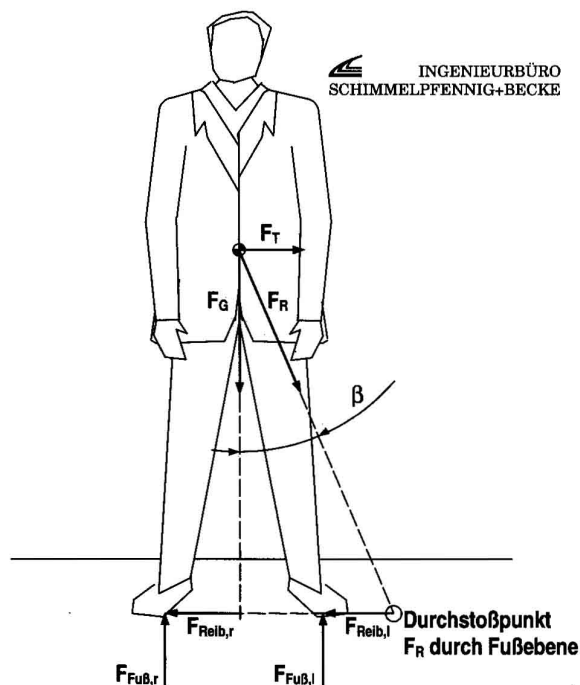


Bild 1 Freistehender Buspassagier, Kräfte beim Bremsvorgang
Fig. 1 separately standing bus passenger, forces during braking action

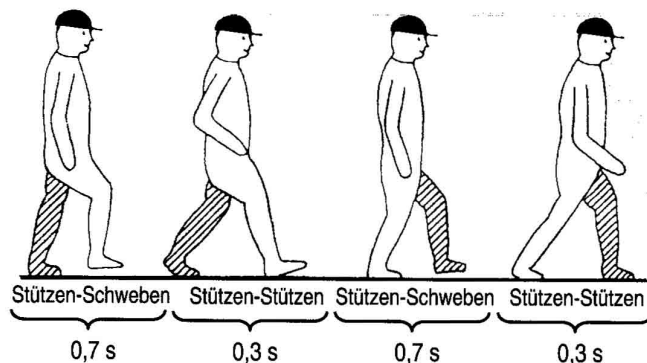


Bild 2 Stütz- und Schwebephase im Gangzyklus nach [6]

Fig. 2 support- and suspend-phase during walking cycle based on [6]

weiteren Kräfte auf den Menschen ein, so ist die Summe der beiden Fußkräfte $F_{FuB,r}$ und $F_{FuB,l}$ und F_G gleich Null. Die Verteilung der Gewichtskraft auf die Fußkräfte ist von der Haltung des Menschen abhängig. Beim aufrecht stehenden Menschen verteilt sie sich in der Regel gleichmäßig auf beide Füße. Während des Fahrbetriebs kann auf den Insassen eine zusätzliche temporäre Trägheitskraft einwirken, die idealisiert in der horizontalen Ebene im Körperschwerpunkt angreift und deren Größe von der Körpermasse und der wirkenden Beschleunigung abhängig ist.

Die Beschleunigung und damit die Trägheitskraft weist bei Kurvenfahrt radial nach außen, bei Bremsvorgängen in Fahrtrichtung und bei Anfahrvorgängen entgegen der Fahrtrichtung.

Die vektorielle Summe von Trägheitskraft und Gewichtskraft ergibt die resultierende Kraft F_R , die nun nicht mehr senkrecht nach unten weist, sondern mit der Senkrechten einen Winkel β einschließt, der abhängig von der Beschleunigung a ist. Die Trägheitskraft bewirkt eine unterschiedliche Belastung der beiden Füße. Der Fuß, welcher sich in der Wirkrichtung der Trägheitskraft befindet, wird stärker belastet, der gegenüberliegende Fuß wird entlastet.

Zur Aufrechterhaltung des Gleichgewichts ist es notwendig, daß der Durchstoßpunkt der resultierenden Kraft F_R durch die Fußbodenebene auf der Verbindungslinie zwischen den Durchstoßpunkten der beiden Fußkräfte liegt. Für kleine Winkel β läßt sich diese Bedingung erfüllen, indem die Fuß- und Beinmuskulatur so angespannt wird, daß die Durchstoßpunkte der Fußkräfte im Rahmen der Fußaufstandsfläche verlagert werden. Ein Umsetzen der Füße ist nicht notwendig.

Erhöht sich die Trägheitskraft und damit der Winkel β sind aus kinetischer Sicht mehrere Strategien denkbar, um die oben genannte Bedingung zu erfüllen. Durch einen Ausfallschritt kann der Abstand zwischen den Füßen vergrößert werden. Die resultierende Kraft liegt dann wieder innerhalb der Verbindungslinie zwischen den Durchstoßpunkten der beiden Fußkräfte. Außerdem ist es möglich, mehrere Ausfallschritte vorzunehmen. Ein derartiges Verhalten hat das Ziel, die auf den Körper wirkende Trägheitskraft zu verringern. Man ist bestrebt, sich relativ zum Bus zu beschleunigen und auf diese Weise die vom Bus ausgeübte Beschleunigung zu vermindern. Eine weitere Möglichkeit liegt darin, den Körperschwerpunkt durch Neigen des Körpers entgegen der Wirkrichtung der Trägheitskraft zu verlagern.

Geht der Fahrgast innerhalb des Busses (siehe Bild 2), so kommt die Vorwärtsbewegung dadurch zustande, daß eines der beiden Beine aus der Stützphase heraus eine Rückstoßkraft auf den Fußboden überträgt, während das andere Bein sich pendelnd schwebend nach vorne bewegt. Danach stützt sich dieses Bein ab und das andere schwingt vor. Je eine Stütz- und Schwebephase des linken und rechten Beines bewirkt einen Doppelschritt oder Gangzyklus. Beim normalen Gang überschneiden sich die beiden Stützphasen der beiden Beine. Setzt die im Bus wirkende Beschleunigung während der Stützen-Stützen-Phase ein, so ist dieser Zustand mit dem freien Stehen zu vergleichen. Befindet sich der Mensch jedoch in der Stützen-Schweben-Phase, so addiert sich zu der Bewegung des nach vorne schwingenden Beines die Trägheitskraft und die Schrittlänge fällt entsprechend kürzer, bzw. länger aus.

In Bild 3 ist ein sich festhaltender Fahrgast dargestellt. Unter Berücksichtigung, daß die Haltehöhe mit der Körperschwerpunkthöhe überein-

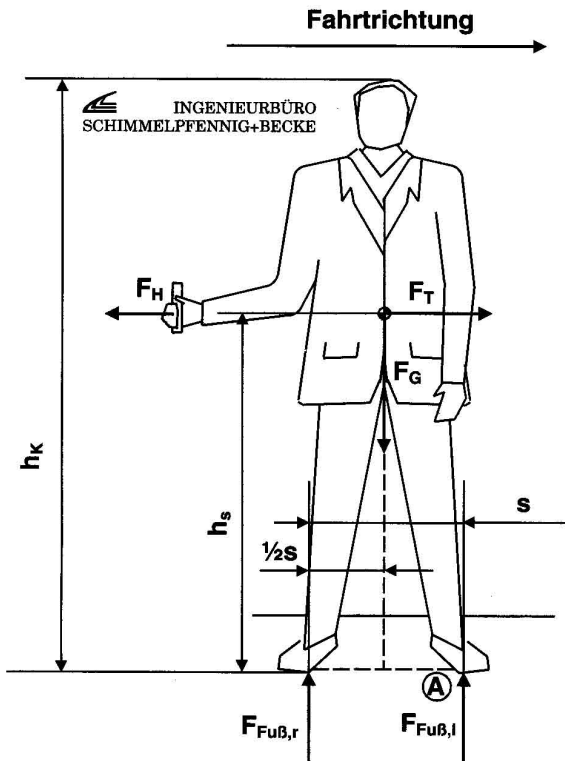


Bild 3 Freikörperbild
Fig. 3 Diagram of acting forces

stimmt, der Durchstoßpunkt der Gewichtskraft F_G mittig zwischen den beiden Fußkräften $F_{FuB,l}$ und $F_{FuB,r}$ liegt, und der Fahrgast keine Relativbewegung zur Haltestange ausführt, läßt sich folgende Momentbilanz um den linken Fußaufstandspunkt aufstellen:

$$\sum M^{(A)} = 0 = F_T \cdot h_s - F_H \cdot h_s - F_G \cdot 0,5s + F_{FuB,r} \cdot s$$

daraus folgt für die Fußkraft $F_{FuB,r}$:

$$\Rightarrow F_{FuB,r} = (F_H - F_T) \cdot \frac{h_s}{s} + 0,5 \cdot F_G$$

Es sind drei verschiedene Fälle zu unterscheiden:

Fall a) $F_H = F_T$

$$\Rightarrow F_{FuB,r} = 1/2 F_G$$

Die auf den Körper wirkende Trägheitskraft F_T wird allein durch die Handzugkraft F_H kompensiert. Es besteht ein Kräftegleichgewicht zwischen den beiden Kräften. Die Belastung der Füße ist gleichmäßig.

Fall b) $F_T > F_H$

$$\Rightarrow F_{FuB,r} < 1/2 F_G$$

Der in Fahrtrichtung vordere Fuß wird belastet, der in Fahrtrichtung hintere wird entlastet. Da die Trägheitskraft F_T in diesem Fall größer ist als die Handzugkraft F_H , wird die Kompensation der einwirkenden Trägheitskraft F_T durch Übertragung einer Reibkraft zwischen den Füßen und dem Fußboden, F_T entgegen gerichtet, erreicht.

Fall c) $F_T < F_H$

$$\Rightarrow F_{FuB,r} > 1/2 F_G$$

Der in Fahrtrichtung vorne befindliche Fuß wird entlastet. Die Reibkraft zwischen den Füßen und dem Fußboden weist in die gleiche Richtung wie die Trägheitskraft F_T . Dieser Fall stellt für den Fahrgast aus kinematischer Sicht den ungünstigsten Zustand dar, da durch den Arm eine höhere Kraft aufgebracht wird, als für die Aufrechterhaltung der Standsicherheit nötig ist.

Diese Betrachtung läßt vermuten, daß sich ein Fahrgast zur Aufrechter-

haltung der Standsicherheit mit dem in Wirkrichtung der Trägheitskraft vorderen Fuß abstützt und sich gleichzeitig an der Haltestange festhält, gemäß des Falles b).

4 Versuchsfahrten

Zur Untersuchung folgender Situationen eines Busfahrgastes wurden Versuchsfahrten mit einem Kraftomnibus (MAN SL 200) durchgeführt:

- Gehen in und entgegen der Fahrtrichtung
- Stehen mit Blick in Fahrtrichtung und zur Seite
- Festhalten an einer Haltestange mit Blick zur Seite
- Sitzen mit Blick in Fahrtrichtung und zur Seite

Es ist an dieser Stelle zu erwähnen, daß es eine Vielzahl weiterer Standpositionen gibt, die aufgrund des Umfangs der Untersuchung unberücksichtigt blieben.

Bei sämtlichen Messungen beschleunigt der Bus auf eine Geschwindigkeit von 25 km/h und bremste anschließend mit konstanter Verzögerung bis zum Stillstand ab. Der Betrag der Verzögerung wurde variiert.

5 Meßtechnik

Der Sicherheit der Probanden wurde bei allen Versuchen die größte Aufmerksamkeit gewidmet. Deshalb fand bei allen Versuchen, bei denen mit dem Verlust des Gleichgewichtes der Probanden zu rechnen war, ein Haltegeschirr, ähnlich dem eines Bergsteigers, Anwendung. Bei den Versuchen zum freien Stehen und Gehen wurde das Verhalten der Probanden durch eine Videokamera aufgezeichnet und gleichzeitig durch eine Beobachtungsperson überwacht. Durch diese Versuchsanordnung war es möglich, die Ergebnisse objektiv zu bewerten.

Die Handhaltekräfte wurden durch einen mit DMS versehenen Zugmeßstab erfaßt. Ein der Kraft proportionales elektrisches Signal wurde zeitlich mit einem der Beschleunigung proportionalen Signal durch einen Rechner aufgezeichnet und anschließend mit einem PC weiterverarbeitet.

6 Ergebnisse

6.1 Freies Gehen und Stehen

Zur objektiven Abstufung des Sturzrisikos wurden die Versuche zum freien Gehen und Stehen nach folgenden Bewertungspunkten analysiert. Die Vergabe der Punkte erfolgte von den Probanden selbst und nach Diskussion mit der Beobachtungsperson.

- 1 Punkt unkritisch
Es war kein Ausfallschritt beim Stehen bzw. keine Variation der Schrittlänge beim Gehen notwendig.
- 2 Punkte leicht kritisch
Ein Ausfallschritt beim Stehen, bzw. eine Veränderung der Schrittlänge war notwendig. Durch diese Aktion konnte das Gleichgewicht mit Sicherheit gehalten werden.
- 3 Punkte kritisch
Es war nicht eindeutig zu entscheiden, ob der ausgeführte Ausfallschritt zur Aufrechterhaltung des Gleichgewichts ausgereicht hätte.
- 4 Punkte sehr kritisch
Ohne die Absicherung durch das Haltegeschirr wäre der Proband auf jeden Fall gestürzt.

Die Ergebnisse zu den durchgeführten Standsicherheitsversuchen beim freien Gehen und Stehen sind entsprechend der untersuchten Positionen in Diagrammen dargestellt. Die Gruppe der Probanden im Alter zwischen 15 und 35 Jahren stellt mit einem Anteil von über 65 % die ausführlichst untersuchte Altersgruppe dar. Um die Versuchsergebnisse anschaulicher darlegen zu können, ist in jedes Diagramm eine Trendlinie eingezeichnet worden, die sich an den ersten zwei Verzögerungswerten zu den jeweiligen Bewertungspunkten der Altersgruppe der 15 bis 35-jährigen orientiert. Die Trendlinie bietet die Möglichkeit, Grenzwerte für das in vier Stufen gestaffelte Sturzrisiko der Buspassagiere anzugeben. Die Ergebnisse der Versuchsreihe zum freien Stehen mit Blick in Fahrtrichtung zeigt Bild 4. Dort erkennt man, daß bei der Altersgruppe der 15 – 35-jährigen ein sicheres Stehen ohne einen Ausfallschritt bis zu einer Verzögerung von ca. 1,3 m/s² möglich ist. Ein Abfangen der Träg-

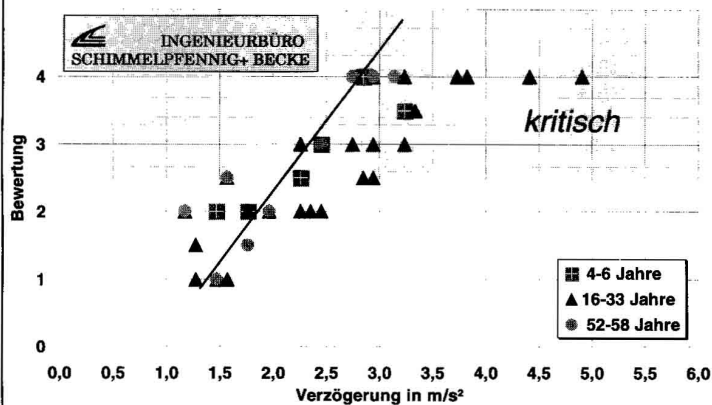


Bild 4 Stehen, Blick in Fahrtrichtung
Fig. 4 Standing, view in direction of move

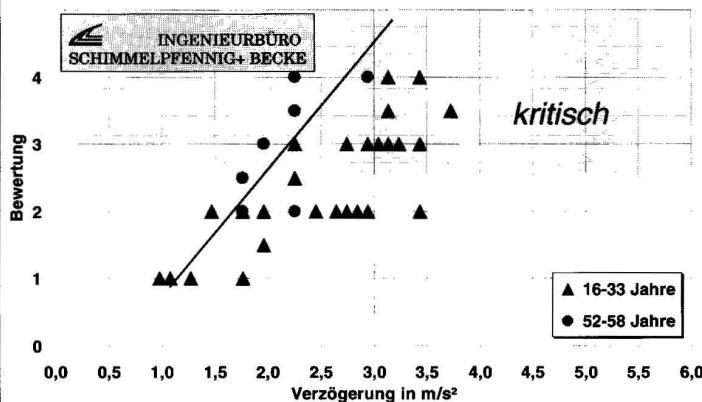


Bild 5 Gehen in Fahrtrichtung
Fig. 5 Walking in direction of move

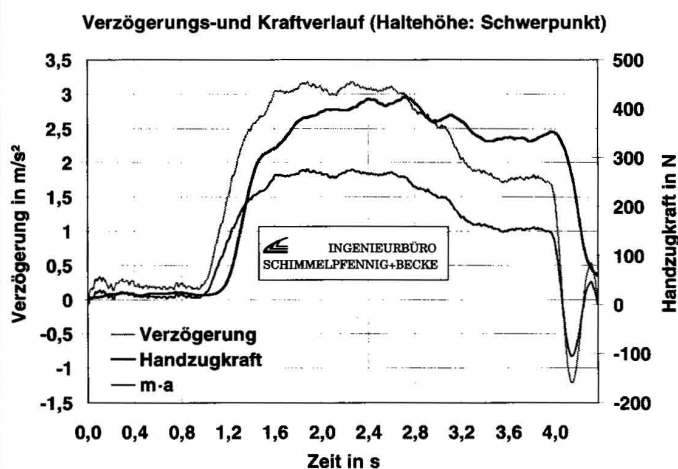


Bild 6 Beispiel für Handzugkraftverlauf
Fig. 6 Example for course of manual pulling force

heitskraft durch einen Ausfallschritt erfolgt ohne Sturzrisiko bis zu einer Verzögerung von etwa $2,0 \text{ m/s}^2$. Werden die Verzögerungen weiter gesteigert, beginnt der kritische Bereich. Ab einer Verzögerung von ca. $2,7 \text{ m/s}^2$ bewerteten die Probanden das Bremsmanöver als »kritisch« bis »sehr kritisch«, d.h. ein Sturz wäre ohne das Haltegeschirr mit hoher Wahrscheinlichkeit erfolgt.

Weiterhin ist zu erwähnen, daß alle Versuchspersonen versuchten, die Standsicherheit durch einen bzw. bei höheren Verzögerungen durch mehrere Ausfallschritte aufrechtzuerhalten. Der mit diesen Schritten zurückgelegte Weg lag bei manchen Versuchen bei über vier Metern. Es ist somit zu beachten, daß die Bewertung im Bereich von 2 – 3 Punkten, dies entspricht Verzögerungen im Bereich zwischen $2,0$ bis $3,0 \text{ m/s}^2$ nur dann mit diesen Punkten versehen werden können, wenn dem Buspassagier genügend Bewegungsraum im Bus zur Verfügung steht, um die Ausfallschritte durchzuführen. Wird dieser Bewegungsraum eingeschränkt, z.B. durch einen weiteren Fahrgast, eine Stufe oder eine auf dem Boden stehende Tasche, so sind bereits Verzögerungen oberhalb von $1,3 \text{ m/s}^2$ ausreichend, um den Buspassagier zu Fall zu bringen.

In der Gruppe der 52 – 58-jährigen wie auch bei den 4 – 6-jährigen wurde beobachtet, daß schon bei geringeren Verzögerungen ein Ausfallschritt erfolgte. Ein absoluter Gleichgewichtsverlust (4 Punkte) erfolgte schon bei Verzögerung von $2,8 \text{ m/s}^2$.

Die Resultate der älteren Personen liegen im Durchschnitt links der ermittelten Trendlinie. Als mögliche Erklärung ist eine Einschränkung der Motorik zur Koordination zwischen Gehen und Reaktion auf die einsetzende Beschleunigung anzuführen.

Beim Gehen in Fahrtrichtung fiel der Bereich, in dem 2 Punkte vergeben wurde, sehr weit von $1,5$ bis $3,5 \text{ m/s}^2$ aus, vgl. Bild 5. Es scheint, daß die augenblickliche Schrittposition beim Einsetzen der Beschleunigung einen entscheidenden Einfluß auf das Sturzrisiko hat. Eine generelle Reduzierung der Standsicherheit beim Gehen im Gegensatz zum Stehen konnte nicht ermittelt werden.

6.2 Aufgebrachte Handhaltekräfte

Die Auswertung der gemessenen Handhaltekräfte in verschiedenen Haltepositionen (Schwerpunkthöhe, Schulterhöhe) ergibt, daß alle Probanden sich stärker an der Haltestange festhielten, als es die Trägheitskraft erforderte. Die Trägheitskraft wurde berechnet durch Multiplikation der Masse des Probanden mit der der Haltekraft zeitlich entsprechenden Beschleunigung. Dabei wurden Hebelverhältnisse, die dadurch entstanden, daß der Haltepunkt nicht in Schwerpunkthöhe des Probanden lag, berücksichtigt. Bild 6 zeigt beispielhaft einen Handkraftverlauf. Gemäß der theoretischen Vorüberlegungen ist der Fall c) (siehe Kapitel 3) auf das menschliche Verhalten zu übertragen. Diese Feststellung läßt zwei Annahmen zu:

Die Motorik des menschlichen Organismus ist nicht in der Lage, auf eine zeitlich veränderliche, störende Kraft eine zu deren Verlauf exakt bemessene Kompensationskraft aufzubringen. Der Mensch baut bei Einwirkung einer das Gleichgewicht störenden Kraft eine reflexartige Gegenkraft auf.

Das übersteuernde Regelverhalten des Menschen läßt sich weiterhin als Faktor darstellen, der das Verhältnis zwischen einwirkender Trägheitskraft und von den Probanden aufgebrachter Handzugkraft beschreibt. Da davon ausgegangen wird, daß dieser Faktor nötig ist, um ein sicheres Stehen zu gewährleisten, wird dieser als Sicherheitsfaktor bezeichnet. Bei der vorliegenden Untersuchung lag er im Mittel aus 24 Versuchen bei $1,5$, im Bsp. des Bildes 6 betrug er $1,64$.

Um eine Grenze für maximal tolerierbare Beschleunigungswerte angeben zu können, erfolgte im weiteren Teil der Untersuchung eine Messung von maximalen Handzugkräften über einen Zeitraum von ca. 3 s. Da diese Messung keine Verletzungsgefahr für den Probanden erwarten ließ, war es möglich, auch die eingangs erwähnte Risikogruppe älterer Frauen mit zu berücksichtigen. In Bild 7 sind die gemessenen Werte, bezogen auf das Körpergewicht, in Abhängigkeit des Alters dargestellt. Man erkennt, daß die maximalen Handzugkräfte, bezogen auf die Körpergewichtskraft bei der Gruppe der Männer und Frauen im Alter von ca. 15 bis 55 Jahren, im Mittel bei ca. 60 % liegen. Auch Kinder ordnen sich trotz ihres geringen Kraftvermögens in diesem Bereich ein, wenn man die Kraft auf das Körpergewicht bezieht. Das absolute Armkraftpotential älterer Frauen, die von den Verkehrsbetrieben als Risikogruppe genannt werden, liegt in dem gleichen Bereich wie bei Kindern im Grundschulalter. Bezieht man diese Kräfte jedoch auf das Körpergewicht, so sind Werte von weniger als 30 % der Körpergewichtskraft erreicht worden. Es ist an dieser Stelle zu erwähnen, daß alle hier berücksichtigten Probanden nach eigenen Angaben keine physikalischen Einschränkungen ihrer Arm- und Schultermuskulatur aufwiesen und daß sämtliche Probanden den Bus im Alltag als Verkehrsmittel nutzten.

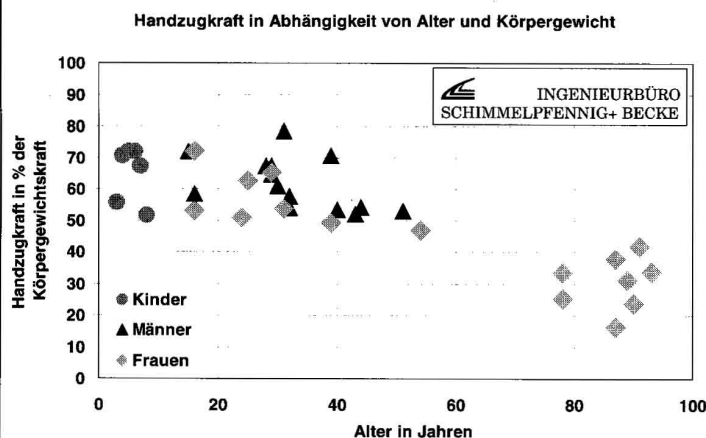


Bild 7 Handzugkraft in % der Körpergewichtskraft
Fig. 7 manual pulling force in % of body weight force

In Bild 8 sind die gemessenen maximal erreichten Handzugkräfte als Bänder in ein Schaubild eingetragen worden. Bei den erforderlichen Handzugkräften wurde ein mittlerer Sicherheitsfaktor von 1,5 zugrunde gelegt. Links der Geraden befindet sich der unkritische Bereich. Ist ein Fahrgast in der Lage, Kräfte dieser Größenordnung aufzubringen, wird er im allgemeinen seine Standsicherheit bewahren können. Ein 30-jähriger Fahrgast kann demnach Haltekräfte in Schwerpunktöhe in einer Größenordnung von etwa 46 bis 78 % seiner Körpergewichtskraft aufbringen. Das entspricht tolerierbaren Verzögerungen von ca. 3,2 bis

5,3 m/s². Wohingegen sich eine ältere Frau im Alter über 68 Jahren schon ab Beschleunigungen von ca. 1,3 m/s² im kritischen Bereich befindet, da sie aufgrund der Versuchsergebnisse nur Handzugkräfte aufbringen kann, die 18 bis 41 % ihrer Körpergewichtskraft entsprechen.

6.3 Sitzsicherheit

Der sitzende Fahrgast unterliegt im Vergleich zum stehenden Fahrgast einem deutlich geringeren Unfallrisiko. Doch auch hier zeigt die Erfahrung, daß es Fälle gibt, in denen ein Businessasse durch Fallen oder Rutschen vom Sitz zu Schaden gekommen ist.

Dazu wurde im Rahmen dieser Arbeit ein einzelner Bussitz zunächst so am Fahrzeugboden verschraubt, daß der Proband quer zur Fahrtrichtung saß. Die Beschleunigungen wurden auf die gleiche Weise erzeugt wie bei den vorangegangenen Versuchen. Da das Rutschen von einem Sitz aufgrund kleinerer Höhenunterschiede mit geringeren Verletzungsrisiken verbunden ist, konnte auf ein Haltegeschirr verzichtet werden, die Probanden wurden lediglich durch eine Schaumstoffmatratze vor einem hartem Aufprallen geschützt.

Insgesamt wurden 29 Versuche mit sieben Probanden durchgeführt. Die Verzögerungswerte bewegten sich nach einem Herantasten an den kritischen Bereich zwischen ca. 2,5 m/s² und 5,0 m/s². Die Probanden wurden gebeten, ihre Füße in einem bequemen Abstand (etwa Schulterbreite) auf den Boden zu stellen. Es zeigte sich, daß ab einer Verzögerung von ca. 4,0 m/s² trotz aktivem Verhalten einige Probanden nicht mehr in der Lage waren, auf dem Sitz zu verharren. Des weiteren konnte festgestellt werden, daß die Probanden nicht seitlich rutschten, sondern vom Sitz kippten. Der Sitzbezug bestand aus einem grob strukturierten Textilgewebe. Bei einigen Versuchen wurden die Probanden gebeten, sich passiv zu verhalten und nicht auf die eintretende Trägheitskraft zu reagieren. Hier reichte eine Verzögerung von ca. 3 m/s² aus, um vom Sitz zu stürzen. Zu vergleichen ist dieser Versuchshergang mit der

Darstellung der erforderlichen Handzugkraft in Abhängigkeit der Beschleunigung

(beim Festhalten in Körperschwerpunkthöhe mit Berücksichtigung des Sicherheitsfaktors s_H)

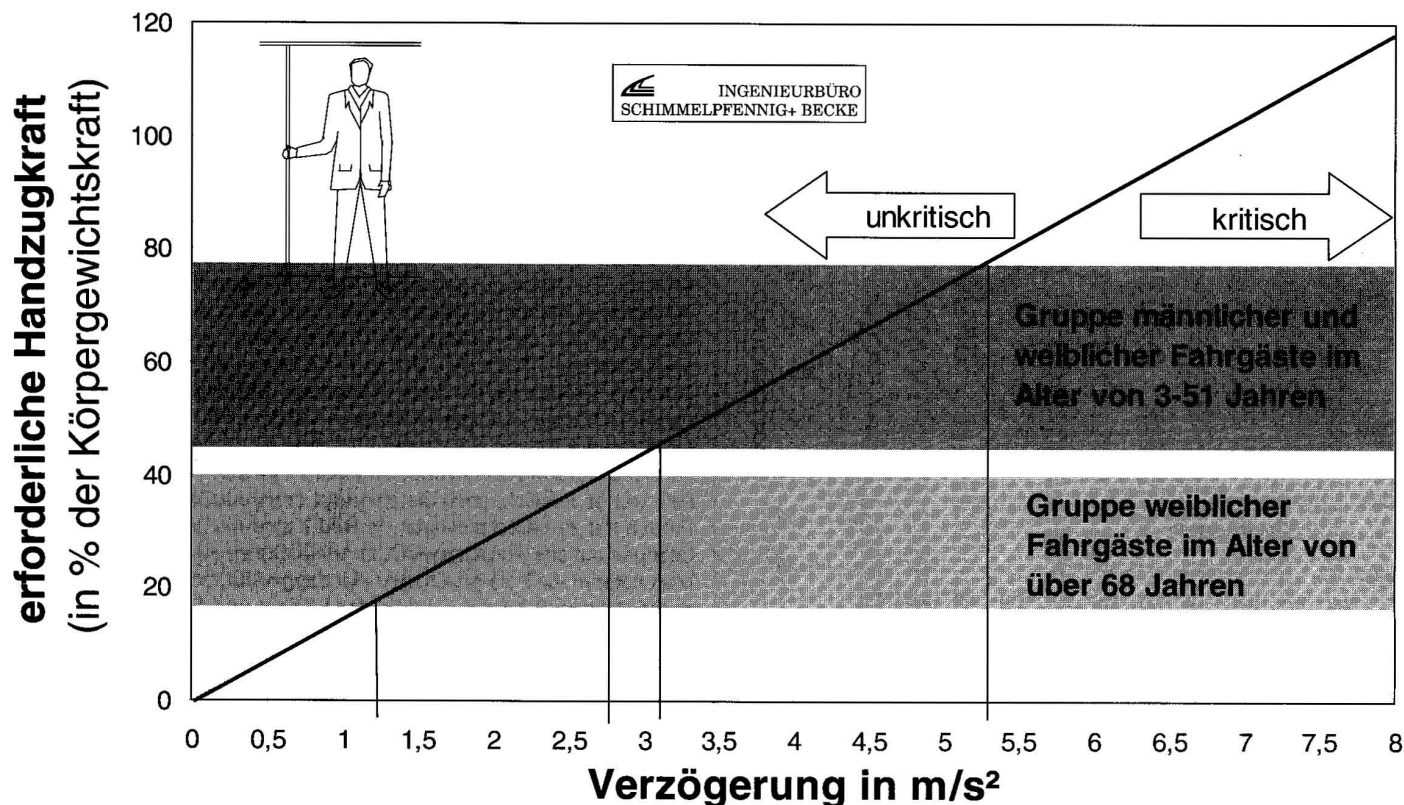


Bild 8 zusammenfassendes Ergebnis
Fig. 8 concluding result

unerwartet eintretenden Verzögerung oder Querschleunigung im realen Fahrbetrieb.

Eine Sicherheitsgrenze beim Sitzen mit Blick in Fahrtrichtung konnte bis zu einer Verzögerung von ca. $6,5 \text{ m/s}^2$ nicht festgestellt werden. Selbst in diesem Bereich blieben die Probanden allein durch Abstützung der Beine sicher sitzen.

7 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden verschiedene Aspekte der Stand- und Sitzsicherheit von Kraftomnibusinsassen im innerstädtischen Linienverkehr beleuchtet. Die Ermittlung der gegenwärtigen Situation ergab eine Diskrepanz zwischen der gesetzlichen Forderung, sich als Businsasse ständig ausreichend sicheren Halt verschaffen zu müssen, und den Erfahrungen von Verkehrsbetrieben und wissenschaftlichen Untersuchungen. Dort zeichnete sich ab, daß es immer wieder zu Unfällen kam, in die eine Personengruppe besonders involviert war. Dieser Risikogruppe der älteren Frauen galt es, besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Um einen Überblick über die tatsächlich auftretenden Quer- und Längsbeschleunigungen zu erhalten, wurden zunächst Beschleunigungsmessungen in Linienbussen im realen Fahrbetrieb vorgenommen. Dabei zeigte sich, daß die Querschleunigungen Werte bis zu $3,1 \text{ m/s}^2$ erreichten. Die maximalen gemessenen Verzögerungen betrugen $2,5 \text{ m/s}^2$. Die Anfahrvorgänge fanden mit Beschleunigungen von höchstens $2,4 \text{ m/s}^2$ statt.

Des weiteren wurden Fahrversuche mit einem Bus durchgeführt, die Aufschluß über maximal tolerierbare Beschleunigungen gaben. Diese Versuchsreihen gliederten sich in drei Hauptgruppen:

- Stehen und Gehen im Bus, ohne festen Halt
- Stehen im Bus mit festem Halt
- Sitzen im Bus

Das Ergebnis der ersten Untersuchung war, daß die Aufrechterhaltung des Gleichgewichtes ab einer auf den stehenden Fahrgast wirkenden Beschleunigung von $1,3 \text{ m/s}^2$ stark gefährdet werden konnte, wenn dem Passagier kein ausreichender Bewegungsraum für einen Ausfallschritt zur Verfügung stand. Als Tendenz konnte ermittelt werden, daß die ältesten Probanden in der Standsicherheit gegenüber den jüngeren, insbesondere beim Gehen im Bus, beeinträchtigt waren.

In der zweiten Versuchshauptgruppe wurden Messungen durchgeführt, die zur Feststellung der aufgebrachten Haltekräfte in verschiedenen Haltepositionen dienten. Es konnte eine Abhängigkeit der von den Versuchspersonen aufgebrachten Haltekräfte in bezug auf ihr Körpergewicht und die einwirkende Beschleunigung festgestellt werden. Diese Haltekräfte waren im Mittel um das 1,5-fache höher als die nach den Gesetzen der Kinetik notwendigen.

Um auch Standsicherheitsgrenzen für Personen über 60 Jahre, mit denen aus Sicherheitsgründen keine Fahrversuche durchgeführt wurden, angeben zu können, wurden maximale Handzugkräfte von Personen im Alter von 3 bis 93 Jahren statisch gemessen. Eine Gegenüberstellung der maximal möglichen mit den erforderlichen Handzugkräften ergab, daß es weiblichen Fahrgästen aus der Gruppe der 68 bis 93-jährigen lediglich möglich ist, sich bei Verzögerungen bis zu ca. $3,0 \text{ m/s}^2$ im Bus festzuhalten. Im Gegensatz dazu besitzen jüngere Fahrgäste, selbst Kinder, die Fähigkeit, Verzögerungen bis zu ca. 5 m/s^2 zu tolerieren.

Abschließend wurde die Sitzsicherheit untersucht. Es zeigte sich, daß Trägheitskräfte, die seitlich auf die Probanden wirkten, bei Beschleunigungen ab ca. 4 m/s^2 zum Kippen vom Sitz führten, wenn sich der Proband nicht zusätzlich mit den Händen festhielt.

Bei Versuchen mit sitzenden Fahrgästen, welche in Fahrtrichtung blickten, konnten die Probanden Verzögerungen bis zu $6,5 \text{ m/s}^2$ überstehen, ohne in ihrer Sitzsicherheit beeinträchtigt zu werden. Hier war keine zusätzliche Abstützung durch die Arme notwendig.

Die Beurteilung der Versuchsergebnisse muß unter der Maßgabe erfolgen, daß bei allen durchgeführten Fahrversuchen die Probanden auf das Eintreten einer Verzögerung vorbereitet waren. Beim Fahrgast im realen Straßenverkehrsgeschehen, den dieses Ergebnis unvorbereitet trifft, sind die tolerierbaren Beschleunigungsgrenzen entsprechend abzuschwächen. Eine zusätzliche Beeinträchtigung der Stand- und Sitzsi-



Bild 9 Stehsitz
Fig. 9 „upstanding seat“

cherheit kann durch das Tragen von Gepäckstücken und einen rutschigen Boden im Bus gegeben sein.

Vergleicht man die tolerierbaren Beschleunigungsgrenzen mit den tatsächlich auftretenden Beschleunigungen, erkennt man, daß Businsassen ohne sicheren Halt nicht in der Lage sind, ihre Standsicherheit aufrechtzuerhalten. Aber auch die sich festhaltende, im Bus stehende ältere Dame kann in normalen Fahrsituationen aufgrund ihrer physischen Konstitution zu Fall kommen.

8 Ausblick

Da Sicherheitsgurte im öffentlichen Nahverkehr nicht zu erwarten sind, sollte ein insgesamt neues System zu Erhöhung der passiven Sicherheit im Kraftomnibus entwickelt werden, (s. Bild 9).

Ein erster Ansatz in dieser Richtung ist der Konsens zwischen Stehen (Vorteil: hohe Ausnutzung des Platzangebotes) und Sitzen (Vorteil: geringere Sturzgefahr).

Basierend auf einer Idee von Schimmelpfennig [7, 8] ist ein Prototyp eines sogenannten »Stehsitzes« realisiert worden.

Die Sitzfläche ist im Gegensatz zum herkömmlichen Sitz deutlich höher, sie fällt jedoch kürzer aus und ist leicht nach vorn geneigt. Zu vergleichen ist diese Körperhaltung mit derjenigen, die man auch bei Stehhilfen wiederfindet. Wie schon der Name »Stehsitz« ausdrückt, beinhaltet dies ein geneigtes Stehen mit Abstützung im Gesäßbereich. Der Stehsitz ist zusätzlich mit einer transparenten, elastischen Rückenlehne ausgestattet. Somit ist gewährleistet, daß der Busfahrer die Übersicht über das Geschehen im Bus behält. Dem Fahrgast im Stehsitz wird ein Anlehnen ermöglicht, bei starken Verzögerungen dient sie dem sich dahinter befindenden Fahrgast als Rückhaltesystem, das einen ansonsten möglichen Sturz verhindert.

Die erfolgreiche Erprobung des Prototyps wurde im Ing.-Büro Schimmelpfennig + Becke bereits durchgeführt.

Literaturnachweis

- [1] Becke M. und Hugemann W.: Stand- und Sitzsicherheit von Businsassen. Vortrag für das AFO/GUVU Seminar am 22. und 23.3.90
- [2] Verordnung über den Betrieb von Kraftfahrunternehmen im Personenverkehr (BO Kraft). Verkehrsverlag J. Fischer, Düsseldorf
- [3] Brooks, Edwards, Fraser und Johnson: Passenger Problems on Moving Buses. Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, England, 1980
- [4] de Graaf B. und van Weperen W.: Met behoud van evenwicht: experimenteel onderzoek naar de grenswaarden voor versnellingen die het menselijk lichaam kann ondergaan zonder et houdingsevenwicht te verliezen. Ned tijdschr Geneesk 139 (8). S. 377 – 382, 1995
- [5] Döschel R.: Schwerpunktöhe und Trägheitsmoment des menschlichen Körpers. Dissertation, München, 1974
- [6] Skiba R., Kuschefski A. und Cziuk N.: Entwicklung eines normgerechten Prüfverfahrens zur Ermittlung der Leitsicherheit von Schuhsohlen. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz, Forschungsnr. 526, Dortmund, 1987
- [7] Schimmelpfennig K.-H.: Skizzen zum Stehsitz, 1970
- [8] Schimmelpfennig K.-H.: Sitzanordnung für der Personenbeförderung dienende Fahrzeuge, Patent-Nr.: 19814548.9 ■