

Untersuchung der Personenströme in Gebäuden mit einheitlichen Personengruppen

Von R. John*

1. Einleitung

Die Bedeutung der Rettungswege für die Sicherheit der sich in einem Gebäude befindenden Personen steigt mit zunehmender Gebäudegröße progressiv an. Eine Auswertung der in der Vergangenheit aufgetretenen Brand- und Katastrophenfälle bezüglich der Anzahl der Opfer hat ge-

zeigt, daß ihre Anzahl dort besonders hoch war, wo Rettungswege nicht in ausreichendem Maße vorhanden waren, die Ausgänge unbekannt waren oder vorhandene Rettungswege nicht mehr benutzt werden konnten. Die Planung und Ausführung von Rettungswegen ist daher so sorgfältig wie möglich durchzuführen. Dabei ist zu beachten, daß die Rettungswege auch während des normalen Betriebsablaufs mit benutzt werden. Ein wichtiger Faktor bei der Beurteilung der Rettungswege ist die Zeit, in der Personen über diese Rettungswege das Gebäude verlassen

* Dipl.-Ing. Reiner John, Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH)

können. Grundlage für die Beurteilung der Räumungszeiten sind die durch Versuche ermittelten Geschwindigkeiten von Personenströmen in Abhängigkeit von der Dichte des zu erwartenden Personenstromes.

Um sichere Berechnungsmethoden der Räumungszeiten zu erhalten, wurde vom Bundesminister für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau der Forschungsauftrag „Untersuchung der Räumungsabläufe in Gebäuden als Grundlage für die Ausbildung von Rettungswesen“ vergeben. In den Teilen I /1/ und II /2/ dieses Forschungsauftrages wurden umfangreiche Literatur- und Theoriestudien und im Teil III reale Räumungsübungen in drei Verwaltungshochhäusern und drei Gesamtschulen durchgeführt /3/. Die im Teil IV dieses Forschungsauftrages durchgeführten Untersuchungen /4/ dienen dazu, weitere Einflußgrößen für die Berechnung von Räumungszeiten zu erhalten.

2. Durchgeführte Untersuchungen

Im Teil IV des Forschungsvorhabens wurden Räumungsübungen und Beobachtungen von Personenströmen aus etwa einheitlichen Personengruppen wie Rekruten, Lehrgangsteilnehmern und Studenten in insgesamt drei verschiedenen Bereichen mit jeweils unterschiedlichen Rettungswegen durchgeführt.

In einer Bundeswehrekaserne wurden sechs Räumungsübungen in einem dreigeschossigen Unterkunftsgelände mit einem Unterrichtsraum durchgeführt. An den Übungen nahmen ca. 140 Personen teil. Alle Räumungsübungen liefen mit dem bei der Rekrutenausbildung üblichen Drill ab. Die Ergebnisse sind daher als Maximalwerte für junge Leute bei hoher körperlicher Leistungsfähigkeit und stetigem Training anzusehen.

Mit ca. 120 Teilnehmern eines feuerwehrtechnischen Lehrganges an der Landesfeuerwehrschule des Landes Baden-Württemberg wurden zwei Räumungsübungen über unterschiedlich breite Treppen durchgeführt.

An dieser Stelle sei dem Kasernenkommandanten und dem Direktor der Landesfeuerwehrschule für ihre Zustimmung zu diesen Untersuchungen sowie den Ausbildern, den Rekruten und Lehrgangsteilnehmern für ihre tatkräftige Unterstützung gedankt.

In drei Hörsaalgebäuden der Universität Karlsruhe (TH) wurden der Bewegungsablauf beim Verlassen des Hörsaales sowie die Bewegung auf den Treppen, Fluren und durch Schleusen untersucht. Dabei wurden insbesondere die Bewegungsabläufe auf unterschiedlich breiten Treppen untersucht.

Der Bewegungsablauf der Personenströme auf den Rettungswegen wurde mit einem speziell für Räumungsversuche entwickelten Videosystem erfaßt und aufgezeichnet. An dieses System sind 20 Videokameras angeschlossen, die mit einer Taktfrequenz von 3/50 s umgeschaltet werden (siehe /3/ oder /4/), so daß nach jeweils 1,2 s das Bild derselben Kamera wieder aufgezeichnet wird.

3. Grundgrößen für die Auswertung

Ausgangsgrößen für die Beurteilung der Räumungszeiten ist die Anzahl der Personen P , die ein Gebäude bzw. einen Gebäudeabschnitt verlassen müssen, sowie der Personenstrom \dot{P} , der über eine bestimmte Stelle eines Rettungsweges strömt. Die Größe dieses Personenstromes ist abhängig von der Breite b der Rettungswege, der Geschwindigkeit V der einzelnen Personen bzw. des Personenstromes sowie der Personendichte D , das heißt der Anzahl der Personen pro Einheit der Grundfläche.

Bei den hier durchgeführten Versuchen und Aufzeichnungen wurde der Personenstrom \dot{P} aus der Anzahl der Personen P ermittelt, die in der Zeitdifferenz $\Delta\tau$ eine bestimmte Stelle der Rettungswege überschritten.

$$\dot{P} = P / \Delta\tau \quad (1)$$

Entsprechend dem Aufzeichnungsverfahren ist $\Delta\tau = n \cdot 1,2$ s mit $n \geq 1$. Die Breite b der Rettungswege ist auf den Treppen der Abstand b_T zwischen den Handläufen. Auf den Fluren entspricht die Breite b_F dem Abstand zwischen den Wänden oder, bei sehr breiten Flächen, der Breite des Weges, auf dem sich der überwiegende Teil der Räumungsteilnehmer bewegt.

Die Personenstromgeschwindigkeit V ergibt sich aus dem in der Zeiteinheit $\Delta\tau$ zurückgelegten Weg l .

$$V = l / \Delta\tau \quad (2)$$

Die zurückgelegte Weglänge ergibt sich aus den Videoaufzeichnungen durch die Wandmarkierungen, aus baulichen Gegebenheiten wie z. B. Abstand der Fugen bei Bodenbelägen oder aus der Anzahl der Stufen innerhalb eines oder mehrerer Umschaltzyklen.

Die Personendichte D wird in der Ebene auf die Grundfläche des Flures bzw. des Podestes bezogen (D_F). Bei der Bewegung über die Treppen kann die Personendichte auf die projizierte Treppengrundfläche (D_T) oder aber auf die mittlere Anzahl der Personen pro Stufe (D_{St}) bezogen werden. Zum Vergleich der Personendichte auf unterschiedlich breiten Treppen wird auch die Anzahl der Personen pro 1 m breiter Stufe (D_{St}) berechnet.

$$D_T = \dot{P}_T / (1_T \cdot b_T \cdot \cos \alpha) \text{ bzw. } \dot{P}_T / (n_{St} \cdot F_{St}) \quad (3)$$

$$D_{St} = \dot{P}_T / n_{St} \quad (4)$$

$$D_{St} = \dot{P}_T / (n_{St} \cdot b_T) = D_{St} / b_T \quad (5)$$

Bei der Berechnung des Personenstromes nach der Beziehung

$$\dot{P} = b \cdot D \cdot V \quad (6)$$

muß die Personendichte immer auf eine Fläche bezogen werden, die parallel zur Bewegungsrichtung liegt. Daraus folgt für den Personenstrom auf der Treppe:

$$\dot{P} = b_T \cdot V_T \cdot D_T \cdot \cos \alpha \quad (7)$$

Neben der arithmetischen Mittelwertbildung von Einzelwerten eines Versuches wurde die Abhängigkeit der Geschwindigkeit V von der Personendichte D nach der Beziehung

$$V = A \cdot D^B \quad (8)$$

bestimmt. Die Konstanten A und B dieser Potenzfunktion $V = f(D)$ wurden nach der Gausschen Methode der kleinsten Fehlerquadrate aus den vorliegenden Einzelergebnissen ermittelt.

4. Bewegungsablauf auf Treppen

In der Tabelle 1 sind die Versuche und Beobachtungen auf Treppen aufgeführt, deren Daten in der hier vorliegenden Arbeit beschrieben werden. Wegen des begrenzten Umfangs dieser Veröffentlichung wird bezüglich der Ergebnisse der Personenströme auf Flure sowie durch Türen und Schleusen auf /4/ verwiesen. Aus den bei den einzelnen Versuchen ermittelten Geschwindigkeiten und Personendichten wurden die Konstanten für die Potenzfunktionen entsprechend Gleichung (8) ermittelt. In Tabelle 2 sind diese Gleichungen für die in Tabelle 1 aufgeführten Versuche zusammengestellt und in Bild 1 die damit bezeichnete Personenstromgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Personendichte aufgetragen. Dabei sind die Bereiche, für die Meßwerte vorliegen, dick ausgezogen. Der arithmetische Mittelwert der Personendichte jedes Versuches ist durch das Zeichen „○“ in der Kurve des jeweiligen Versuches gekennzeichnet. Mit Ausnahme der Kurve 1.6, die für

Tabelle 1: Räumungsübungen und Beobachtungen auf Treppen

Versuch Nr.	Treppen pro Geschoß	Stufen pro Treppe	Abmessungen der Stufen			Bewegungsrichtung
			b m	h m	h m	
Versuche in der Kaserne						
1.1	2	10	1,800	0,160	0,300	ab
1.6	2	10	1,800	0,160	0,300	auf
Versuche in der Landesfeuerwehrschule						
2.1	2	8	1,030	0,173	0,295	ab
2.2	1	19	1,315	0,163	0,295	ab
Beobachtungen im Bereich von Hörsälen						
3.1.1	2	14	2,060	0,150	0,300	ab
3.2.3	2	12	2,150	0,165	0,310	ab
3.2.4	2	11	0,900	0,175	0,290	ab
3.3.3	1	23	2,560	0,155	0,325	ab

Tabelle 2: Abhängigkeit der Personenstromgeschwindigkeit von der Personendichte für die Bewegung auf Treppen. Ermittelte Potenzfunktion nach Gleichung (8)

Versuch Nr.	V_T in St/min D_{St} in Pers/St m	V_T in m/min D_T in m/min
1.1	$V_T = 231,5 D_{St}^{-0,348}$	$V_T = 119,7 D_T^{-0,349}$
1.6	$V_T = 118,8 D_{St}^{-0,693}$	$V_T = 93,1 D_T^{-0,693}$
2.1	$V_T = 126,0 D_{St}^{-0,629}$	$V_T = 92,3 D_T^{-0,629}$
2.2	$V_T = 202,8 D_{St}^{-0,100}$	$V_T = 76,8 D_T^{-0,100}$
3.1.1	$V_T = 82,3 D_{St}^{-0,244}$	$V_T = 37,0 D_T^{-0,244}$
3.2.3	$V_T = 68,9 D_{St}^{-0,441}$	$V_T = 40,5 D_T^{-0,441}$
3.2.4	$V_T = 92,9 D_{St}^{-0,523}$	$V_T = 60,6 D_T^{-0,523}$
3.3.3	$V_T = 107,2 D_{St}^{-0,109}$	$V_T = 43,6 D_T^{-0,109}$

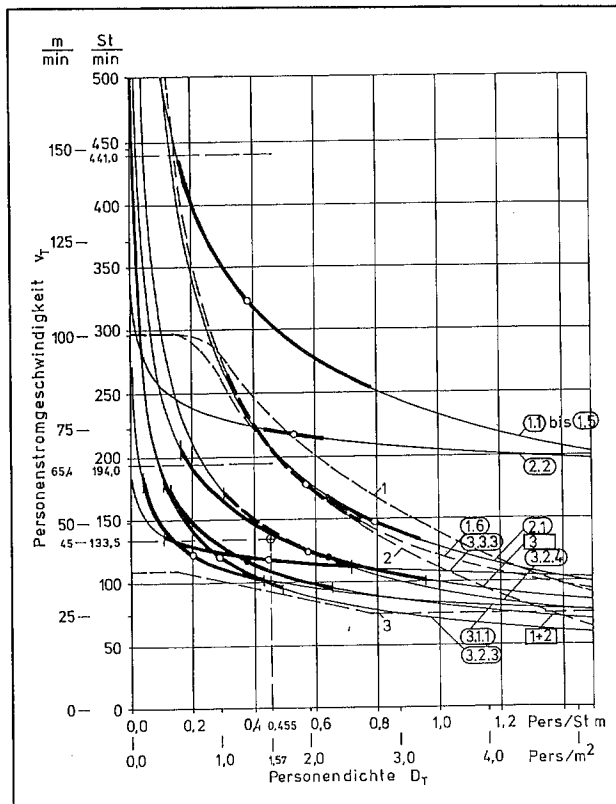


Bild 1: Personenstromgeschwindigkeit auf Treppen in Abhängigkeit von der Personendichte

- Kennzeichen: Versuche siehe Tabelle 1
- Kennzeichen: Versuche nach /3/
- 1, 2 nach /1/ für $f=0, 100 \text{ m}^2/\text{Pers}$ und $f=0, 125 \text{ m}^2/\text{Pers}$
- 3 nach /9/
- arithmetischer Mittelwert non D_T

die Bewegung „Treppe aufwärts“ gilt, beziehen sich alle Kurven auf die Bewegung „Treppe abwärts“. Für alle Versuchsdaten „Treppe abwärts“ ergibt sich ein arithmetischer Mittelwert für die Personendichte von 1,57 Pers/m² bzw. 0,455 Pers/St m und eine Personenstromgeschwindigkeit von 45 m/min bzw. 133,5 St/min. Zum Vergleich sind in Bild 1 auch die Kurven 1, 2, 3 für die Versuche 1, 2, 3 nach /3/ eingetragen.

Für die Umrechnung der Personenstromgeschwindigkeit von St/min in m/min wurde der Mittelwert der Stufenabmessungen aus allen Versuchen zugrunde gelegt. Da diese Abmessungen auch in die Personendichte Pers/m² eingehen, sind Abweichungen zwischen den Werten m/min und St/min von ca. ±15 % möglich. Im folgenden werden daher alle Angaben auf die Stufen bzw. auf eine 1 m breite Stufe bezogen.

Bis zu einer Personendichte von ca. 0,1 Pers/St m ergibt sich aufgrund der Meßwerte keine gegenseitige Behinderung. Die Geschwindigkeit wird in diesem Bereich nur durch die persönliche Motivation und Leistungsfähigkeit bestimmt. In diesem Bereich ergibt sich für die Versuche 1.1 ein Mittelwert von 610 St/min. Der Mittelwert der übrigen Versuche (2.1 bis 3.3.3, siehe Tabelle 2) beträgt in diesem Bereich der Personendichte bis 0,1 Pers/St m 194 St/min.

5. Bewertung der Meßergebnisse

Bei den hier durchgeführten Räumungsübungen und Beobachtungen hat sich gezeigt, daß bei der Bewegung auf üblichen Treppen und in der Ebene die gleiche Tendenz der Abhängigkeit der Personenstromgeschwindigkeit von der Personendichte auftritt. Unterschiede ergeben sich grundsätzlich durch die an der Übung teilgenommenen Personengruppen. In allen Fällen liegen die Werte, die mit den Rekruten ermittelt wurden, wesentlich über den übrigen Werten.

Neben anderen in /4/ dargelegten Ergebnissen wird hier nur der Einfluß der Treppenbreite auf den Personenstrom ausführlich beschrieben.

Für die Berechnung des Personenstromes auf einer Treppe ist neben der Geschwindigkeit auch die auf einer Treppe herrschende Personendichte erforderlich. In Bild 2 sind die arithmetischen Mittelwerte der Personendichten, die aus den Einzelwerten der verschiedenen Versuche berechnet wurden, über der jeweiligen Breite der Treppe, auf der die Werte ermittelt wurden, aufgetragen. Als Kurve 1 ist die Anzahl der Personen pro Stufe eingezeichnet. Bei der Kurve 2 wurde die Personendichte auf die Anzahl der

Personen pro 1 m Breite der Stufe bezogen. Bei der Kurve 3 wurde die Anzahl der Personen auf die von Pauls /5/ vorgeschlagene nutzbare Treppenbreite, d. h. die Breite zwischen den Handläufen b_T abzüglich 0,3 m, bezogen. Trotz unterschiedlicher Berechnung der Personendichten haben alle drei Kurven die gleiche Charakteristik. Mit zunehmender Treppenbreite steigt die Personendichte bis zu der Breite b_T von ca. 1,1 m an. Danach nimmt die Personendichte wieder ab. Das Minimum wird bei ca. 1,9 m Treppenbreite erreicht. Danach nimmt die Dichte mit steigender Treppenbreite wieder zu. Die Mittelwerte der einzelnen Versuche werden bis auf den Versuch 1.1 sowie den Versuch 1 und 2 nach /3/ durch die Kurven in Bild 2 gut wiedergegeben.

Bei dem Versuch 1.1 erfolgte die Bewegung gegenüber den anderen Versuchen unter erheblicher körperlicher Anstrengung, wodurch die relativ hohen Dichtewerte begründet sind. Der zweite Wert, der von diesen Kurven deutlich abweicht, ist der Mittelwert der Personenstromdichte aus den Versuchen 1 und 2 nach /3/. Da es sich hierbei um eine altersmäßig und damit bezüglich der körperlichen Leistungsfähigkeit anders zusammengesetzten Personengruppe handelte, unter der sich auch viele ältere Personen befanden, kann dies als Erklärung für die Abweichung angenommen werden. Die bei der etwa gleichen Personengruppe bei dem Versuch 3 nach /3/ erzielte wesentlich höhere Personendichte ist auf die stark abweichende Treppenform gegenüber der Treppenform bei den Versuchen 1 und 2 nach /3/ zurückzuführen.

Aus diesen Kurven ergibt sich, daß sich unabhängig von der gewählten Bezugsgröße für die Berechnung der Personendichte eine ähnliche Dichteverteilung in Abhängigkeit von der Treppenbreite ergibt. Die größte Dichte auf einer Treppe wird damit bei ca. 1,1 m Treppenbreite erreicht. Bei dieser Breite können gerade zwei Personen nebeneinander gehen. Mit zunehmender Treppenbreite bildet sich

zwischen diesen nebeneinander gehenden Personen ein stetig wachsender freier Raum aus, wodurch die Dichte abfällt. Erst ab einer Treppenbreite von ca. 1,5 m beginnen vereinzelt auch Personen in der Mitte der Treppe zwischen den am rechten und linken Rand gehenden Personen die Treppe abwärts zu laufen, wodurch die Dichte wieder ansteigt (Wendepunkt in den Kurven in Bild 2).

Die auf den unterschiedlich breiten Treppen ermittelten durchschnittlichen Personenstromgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Breite b_T sind in Bild 3 als Kurve 1 aufgezeichnet. Aus den ermittelten Personendichten wurde zusammen mit der Personenstromgeschwindigkeit der Personenstrom nach Gleichung (7) berechnet und als Kurve 2 in Bild 3 eingetragen.

Die durch die Kurve 1 dargestellte gemessene Personenstromgeschwindigkeit gilt jeweils für unterschiedliche Personendichten. Um einen Vergleich der auf der Treppe auftretenden Personenstromgeschwindigkeiten bei gleicher Personendichte zu ermöglichen, wurde die Personenstromgeschwindigkeit V_T' bei allen Versuchen mit der mittleren Personendichte von 0,455 Pers/St m (siehe Bild 1) entsprechend den ermittelten Potenzfunktionen berechnet und ebenfalls im Bild 3 eingezeichnet (Kurve 3). Mit dieser berechneten Geschwindigkeit V_T' und der Personendichte $D_{St} = 0,455$ Pers/St m wurde nach Gleichung (7) der Personenstrom berechnet und als Kurve 4 in Bild 3 eingetragen. Von diesen Kurven weichen die Werte für die Versuche 1.1, 3.2.1 und 3.2.2 sowie für die Versuche 1, 2 und 3 nach /3/ ab. Für die Abweichung der Versuchsdaten 1.1 werden im wesentlichen die zuvor schon aufgeführte größere Motivation und körperliche Leistungsfähigkeit angesehen. Bei dem Versuch 3.2.1 erfolgte die Bewegung aus einem Stau heraus. Der Personenstrom bei Versuch 3.2.2 ergab sich im Gegensatz zu den übrigen Versuchen durch die Umlenkung von zwei seitlich ankommenden Personenströmen sowie bei einer sehr geringen Beleuchtungsstärke

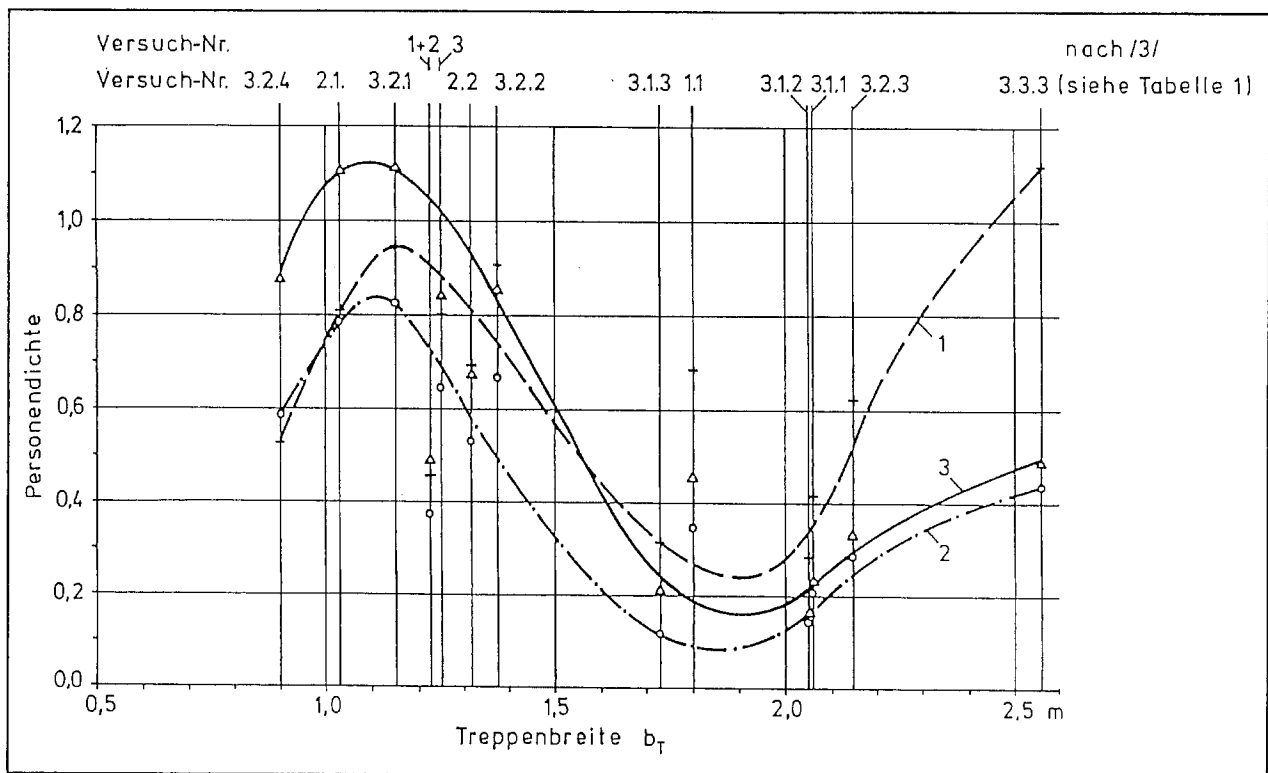


Bild 2: Personendichte auf Treppen unterschiedlicher Breite: Kurve 1 (+) Personendichte in Pers/St, Kurve 2 (o) Personendichte in Pers/St m, Kurve 3 (Δ) Personendichte in Pers/St ($b_T - 0,3$) m nach /5/

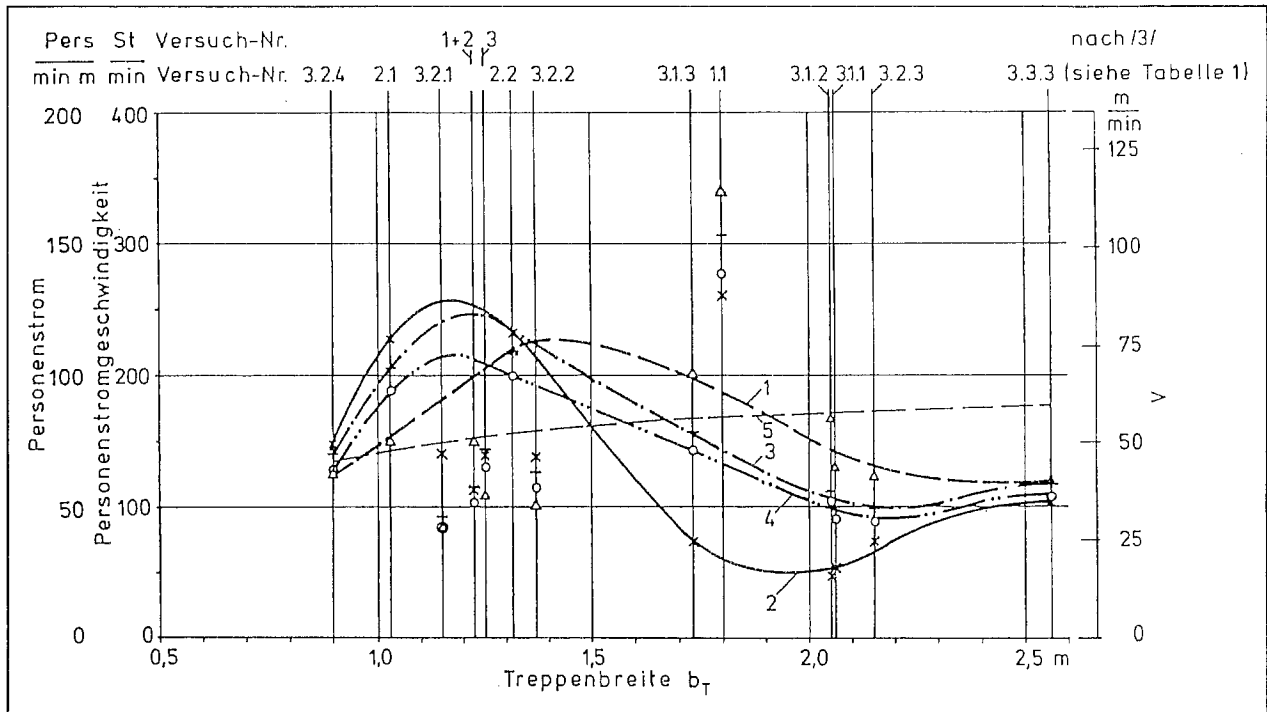


Bild 3: Personenstromgeschwindigkeit und Personenstrom auf unterschiedlich breiten Treppen
 1 (Δ) gemessener Mittelwert V_T , 2 (\times) Personenstrom aus V_T und D_T , 3 (+) V_T berechnet für $D_{St}=0,455$ Pers/St m entsprechend Gleichung (8)
 4 (o) Personenstrom berechnet aus V_T und $D_{St}=0,455$ Pers/St m, 5 Vergleichskurve \dot{P} nach /5/ für $D_{St}=0,455$ Pers/St m

des Rettungsweges. Die Werte nach /3/ weichen ebenfalls von der Kurve ab, was mit der Zusammensetzung der Räumungsteilnehmer (auch ältere Personen) erklärt werden kann.

Aus dem Verlauf der Kurven in den Bildern 2 und 3 ergeben sich folgende Erkenntnisse. Im Bereich der untersuchten Treppenbreiten von 0,90 m bis 2,56 m wird nur bei der Breite von ca. 1,10 m die zur Verfügung stehende Grundfläche optimal ausgenutzt. Die ungünstigste Treppenabmessung liegt bei einer Breite von ca. 1,9 m. Die gemessenen Personengeschwindigkeiten auf der Treppe (Kurve 1 Bild 3) haben ihr Maximum bei einer Treppenbreite von ca. 1,45 m. Mit steigender Treppenbreite fallen die Geschwindigkeiten ab, da vermutlich durch die in der Mitte gehenden Personen, die sich an keinem Handlauf anfassen können, die Geschwindigkeit der am Rand gehenden Personen gebremst wird. Bei der Bewertung dieser Personengeschwindigkeit ist die unterschiedliche Personendichte auf den Treppen zu berücksichtigen. Aber selbst bei gleichen Personendichten auf den Treppen ergibt sich ein ähnlicher Kurvenverlauf (Bild 3, Kurve 3). Hier liegt das Maximum bei ca. 1,2 m Treppenbreite. Der aus der Personenstromgeschwindigkeit V_T entsprechend der Kurve 3 sowie der mittleren Personendichte $D_{St}^* = 0,455$ Pers/St m berechnete Personenstrom (Kurve 4) hat sein Maximum ebenfalls bei ca. 1,2 m.

6. Berechnung der Personenstromgeschwindigkeiten aufgrund der ermittelten Versuchsdaten

Für die Beziehung zur Berechnung der Personenstromgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Personendichte wird nach /8/ die Form gewählt:

$$V_i = V_o \cdot (1 - K \cdot \ln[D_i/D_o]) \quad (9)$$

Darin bedeutet V_i die Personenstromgeschwindigkeit im Rettungsweg Teil i. V_o ist die Geschwindigkeit einer Personengruppe, die sich aufgrund ihrer persönlichen Leistungsfähigkeit unter Berücksichtigung der psychologischen Ge-

gebenheit im Wegabschnitt i ohne gegenseitige Behinderung durch andere Personen ergeben würde. D_i ist die Personenstromdichte im Wegabschnitt i und D_o der Grenzwert der Personenstromdichte, bis zu dem die Personenstromgeschwindigkeit V_o möglich ist. Während sich unterhalb dieses Grenzwertes jede Person entsprechend ihrer Leistungsfähigkeit und Motivation bewegen kann, ist oberhalb dieses Grenzwertes nur noch eine nahezu gleiche Geschwindigkeit aller Personen innerhalb des Personenstromes möglich. K ist in Gleichung (9) ein Faktor, der sich bei der Anpassung der Versuchswerte an die o.g. Beziehung ergibt.

Der Betrag der Geschwindigkeit V_o ist um so höher, je einfacher der Teilbereich des Rettungsweges zu begehen ist. Bei unübersichtlichen Rettungswegen wird nach /6/ ein Teil der sonst für die Bewegung zur Verfügung stehenden Energie für die Beobachtung und Änderung der Bewegung, z.B. Übergang von Treppe auf Ebene, verbraucht. Aus diesem Grund ergeben sich unterschiedliche Werte für V_o für die in Tabelle 3 angegebenen Wegarten. Die in /6/ beschriebenen Untersuchungen der Rettungsabläufe in Schulen mit Schülern unterschiedlicher Altersstufen hat gezeigt, daß der Bewegungsablauf auf Fluren und Treppen abwärts mit der gleichen nachstehenden Beziehung beschrieben werden kann.

$$V_i = 65 \cdot (1 - 0,295 \ln[D_i^*/0,0465]) \text{ in m/min} \quad (10)$$

Darin ist D_i^* die Dichte in m^2/m^2 . Für die Projektionsfläche einer Person werden folgende Werte angegeben.

Kinder der Klassen 1 bis 3	$f = 0,04 \text{ m}^2/\text{Pers.}$
Kinder der Klassen 4 bis 7	$f = 0,06 \text{ m}^2/\text{Pers.}$
Kinder der Klassen 8 bis 10	$f = 0,08 \text{ m}^2/\text{Pers.}$

Der Grund dafür, daß bei Schülern keine unterschiedlichen Geschwindigkeiten für horizontale Wege und Treppen abwärts auftreten, ist nach /6/ darin zu sehen, daß Kinder im Vergleich zu Erwachsenen keine Unterschiede zwischen kurzfristiger Bewegung über horizontale Strecken und

Treppen abwärts machen.

Für Erwachsene auf horizontalen Wegen ergibt sich nach /7/ die Beziehung

$$V_{iF} = V_{oF} \cdot (1 - 0,295 \cdot \ln [D_{iF} / 0,577]) \text{ in m/min} \quad (11)$$

Dabei ist D_{iF} in Pers/m² einzusetzen.

Bei den Untersuchungen nach /7/ wurden bei verschiedenen Untersuchungsorten trotz unterschiedlicher Geschwindigkeit V_o die gleiche Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der Dichte ermittelt. Die in /7/ angeführten Werte für V_o betragen 92 m/min bei natürlichen Beobachtungen sowie 143 m/min und 145 m/min bei Experimenten. Die unterschiedlichen Geschwindigkeiten werden nach /7/ auf die unterschiedliche psychologische Spannung zurückgeführt. Nach /6/ kann in Notsituationen der Wert von V_o bis auf den doppelten Wert für Normalbedingungen ansteigen. Bei Kindern wurde der Wert für V_o nach /6/ aus Gründen der psychologischen Leistungsfähigkeit kleiner angesetzt als bei Erwachsenen.

Da die in /6/ und /7/ angesetzte Abhängigkeit der Personenstromgeschwindigkeit von der Personendichte als sehr sinnvoll angesehen wird, wurden die vorliegenden Daten aus den in /4/ durchgeführten Versuchen entsprechend diesem Ansatz ausgewertet. Die Versuchswerte wurden dabei durch die Funktion

$$V = a + b \cdot \ln (D_i / D_o) \quad (12)$$

so approximiert, daß die Summe der Fehlerquadrate ein Minimum erreichte. Die Umrechnung mit $a = V_o$ und $K = b/a$ führt zu der Darstellung nach Gleichung (9).

Bei der Approximation der vorliegenden Versuchsdaten durch die Gleichung (12) und der Ermittlung des Grenzwertes D_o wurde wie folgt verfahren:

Durch den Wert D_o wurden die vorliegenden Versuchsdaten aufgeteilt in Wertepaare mit $D \leq D_o$ und $D > D_o$. Aus den Personenstromgeschwindigkeiten der Wertepaare mit $D \leq D_o$ wurde der arithmetische Mittelwert V_o ermittelt. Für die Wertepaare mit $D > D_o$ wurden die Konstanten a und b der Gleichung (9) so ermittelt, daß die Summe der Fehlerquadrate ein Minimum ergab. Diese Berechnungen wurden mit verschiedenen Werten D_o wiederholt. Als Grenzwert für D_o wurde der Wert festgelegt, bei dem für alle Versuche auf Treppen bzw. Flure gilt: $V_o = a$.

Danach ergibt sich für die Bewegung auf der Treppe abwärts die Beziehung:

$$V_{iT} = V_{oT} \cdot (1 - 0,263 \cdot \ln [D_{iT} / 0,5]) \text{ in m/min} \quad (13)$$

mit D_{iT} in Pers/m²

Der für die Treppe ermittelte Grenzwert der Dichte, der noch zu keiner Behinderung führt, stimmt mit den Angaben in /6/ für Erwachsene mit Winterbekleidung überein.

Aus den vorliegenden Versuchsdaten für Treppen ergab sich, daß der Wert V_{oT} von der Treppenbreite abhängig ist. In Bild 4 sind die ermittelten Werte von V_{oT} in Abhängigkeit von der Treppenbreite als Kurve 1 aufgetragen. Diese Abhängigkeit des Wertes V_{oT} von der Treppenbreite ist bei der Berechnung der Personenstromgeschwindigkeit nach Gleichung (13) zu berücksichtigen. Nach der Kurve 1 in Bild 4 liegt die maximale Geschwindigkeit V_{oT} mit 110 m/min bei einer Treppenbreite von 1,1 m. Zur einfacheren Berechnung der von der Treppenbreite abhängigen Geschwindigkeit V_{oT} wird die durch die Kurve 2 in Bild 4 angenommene Verteilung gewählt. Damit ist für den Bereich $0,9 \text{ m} \leq b \leq 2,25 \text{ m}$

$$V_{oT} = V_{oT}^* \cdot (1 - 0,45 \cdot b - 1,15) \quad (14)$$

Für den Bereich $2,25 \text{ m} \leq b \leq 2,6 \text{ m}$ gilt der Wert von V_{oT} für $b_T = 2,25 \text{ m}$. Nach Bild 4 beträgt $V_{oT} = 90 \text{ m/min}$, entsprechend der Kurve 2 bei $b_T = 1,15 \text{ m}$. Dieser Wert stimmt in etwa mit dem Wert 100 m/min nach /6/ überein.

Bei den Räumungsübungen in Verwaltungshochhäusern (siehe /3/) wurden jedoch wesentlich niedrigere Werte für V_{oT} ermittelt. Aus diesem Grund wird V_{oT} nur mit 60 m/min angesetzt. Die Abhängigkeit von der Treppenbreite erfolgt daher nach Kurve 3 in Bild 4. Dieser Wert für V_{oT} kann bei einem genau bekannten Personenkreis, dessen körperliche Leistungsfähigkeit und sein Verhalten im Gefahrenfall genau vorhersehbar ist, durch den Faktor g verändert werden. Dadurch wird $V_{oT}^* = 60 \text{ g m/min}$. Unter den Verhältnissen, wie sie bei der Räumungsübung in der Bundeswehrkaserne vorlagen (siehe Versuche 1.1), ergibt sich, bezogen auf den Wert von 60 m/min , ein Faktor $g = 3,6$. Dieser Faktor ist als Grenzwert unter optimalen Leistungsbedingungen sowie bei ständiger Übung der Räumungsteilnehmer anzusehen.

Für die Bewegung in der Ebene wurde als Mittel aus allen

Tabelle 3: Personenstromgeschwindigkeit und Bewegungsintensität in Abhängigkeit von der Personendichte nach /8/

Personendichte D^* m ² /m ²	Horizontaler Weg		Türöffnung	Treppe abwärts		Treppe aufwärts	
	Geschwindigkeit V , m/min.	Intensität q , m/min.	Intensität q , m/min.	Geschwindigkeit V , m/min.	Intensität q , m/min.	Geschwindigkeit V , m/min.	Intensität q , m/min.
0,01	100,0	1,0	1,0	100,0	1,0	60,0	0,6
0,05	100,0	5,0	5,0	100,0	5,0	60,0	3,0
0,10	80,0	8,0	8,7	95,0	9,5	53,0	5,3
0,20	60,0	12,0	13,4	68,0	13,6	40,0	8,0
0,30	47,0	14,1	16,5	52,0	15,6	32,0	9,6
0,40	40,0	16,0	18,4	40,0	16,0	26,0	10,4
0,50	33,0	16,5	19,6	31,0	15,5	22,0	11,0
0,60	27,0	16,2	19,0	24,0	14,4	18,0	10,8
0,70	23,0	16,1	18,5	18,0	12,6	15,0	10,5
0,80	19,0	15,2	17,3	13,0	10,4	13,0	10,4
0,90	15,0	13,5	8,5	8,0	7,2	11,0	9,9
und größer							

Anmerkung: Der in der Tabelle mit 8,5 m/min. festgelegte Wert für die Bewegungsintensität von Personenströmen mit Dichten von 0,9 und größer in Türöffnungen gilt nur für Türöffnungen ab 1,6 m Breite.

Für Türöffnungen von geringerer Breite (b) ist die Bewegungsintensität nach folgender Gleichung zu bestimmen:

$$q = 2,5 + 3,75 b,$$

f = Projektionsfläche einer Person in m²/Pers.

Erwachsener in Hausbekleidung	f = 0,100 m ²	$D = \frac{D^* (m^2/m^2)}{f (m^2/Pers)} \text{ Pers/m}^2$
Erwachsener in Winterbekleidung	f = 0,125 m ²	
Jugendlicher	f = 0,070 m ²	

$$\dot{P} = q \cdot b / f$$

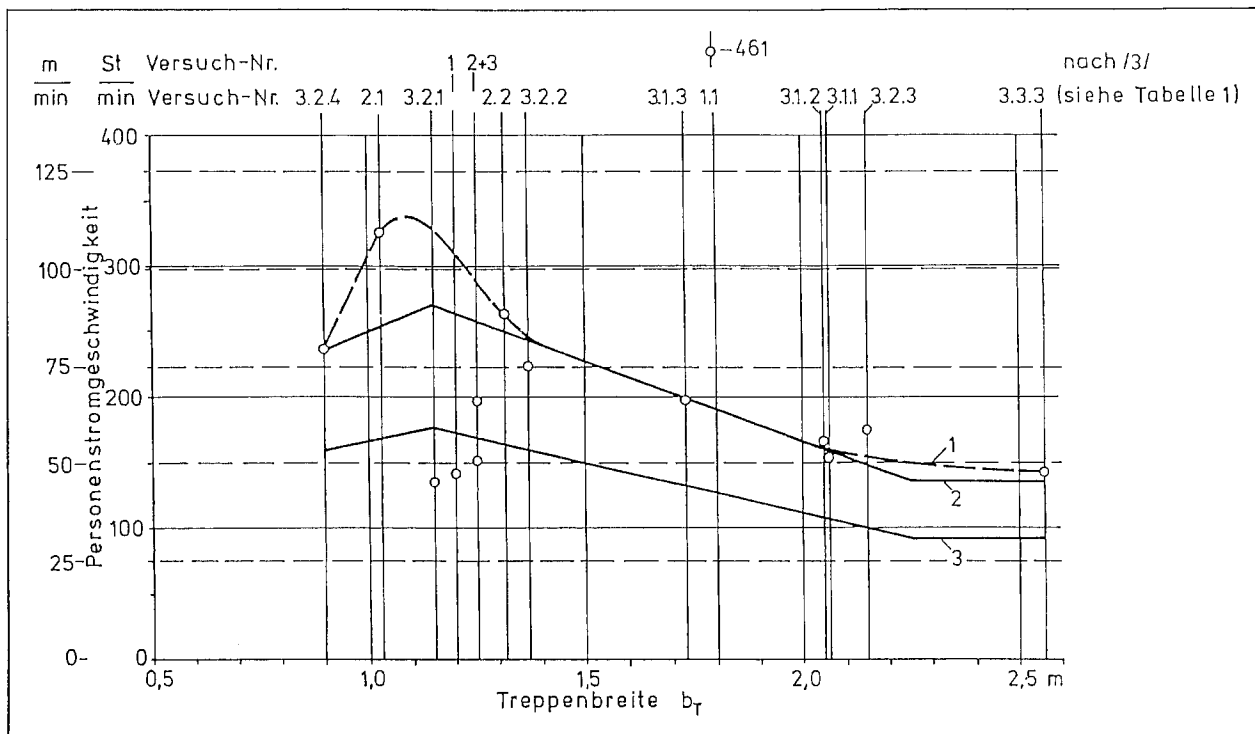


Bild 4: Personenstromgeschwindigkeit V_{oT} nach Gleichung (9) in Abhängigkeit von der Treppenbreite
1 gemessene Werte, 2 Approximation von (1) durch Geraden, 3 für die Berechnung von $V_o=f(b_T)$ verwendete Approximation aller Versuchswerte V_o .

Versuchen nach /4/ der Wert $V_{oF} = 65,7$ m/min ermittelt. Dieser Wert liegt im Bereich der für Schüler ermittelten Geschwindigkeiten nach /3/ sowie unterhalb der in /6/ mit 100 m/min und in /7/ mit 92 m/min angegebenen Werten. Mit dem Faktor g kann ebenso wie für die Bewegung auf der Treppe für ein bekanntes Verhalten der Personen im Räumungsfall der Wert von 65 m/min verändert werden. Mit den Gleichungen (14) und (13) wurde für eine Treppe von 1 m und 2 m Breite die Personenstromgeschwindigkeit V_T sowie mit der Gleichung $V_{IF} = V_{oF} \cdot (1 - 0,259 \cdot \ln[D_{IF}/0,4])$ in m/min (15) die Personenstromgeschwindigkeit V_F auf dem Flur in Abhängigkeit von der Personendichte berechnet und im Bild 5 graphisch dargestellt. In diesem Bild ist weiterhin der von der Personendichte abhängige Personenstrom bezogen auf einen 1 m breiten Rettungsweg für die drei Geschwindigkeiten $V_{oF} = 65$ m/min, $V_{oT} = 56$ m/min für $b = 1$ m und $V_{oT} = 37$ m/min für $b = 2$ m entsprechend den Gleichungen nach /4/

$$P_F = V_F \cdot D_F \cdot b_F \cdot 0,75 \quad (16)$$

$$P_T = V_T \cdot D_T \cdot b_T \cdot \cos \alpha \cdot 0,75 \quad (17)$$

berechnet worden.

Die Abhängigkeit des Personenstromes von der Treppenbreite b_T ist in Bild 6 für verschiedene Personendichten auf der Treppe dargestellt. Diese Werte wurden ebenfalls mit den Gleichungen (14), (13) und (17) berechnet. Für die Treppe wurden die Abmessungen $F_{St} = 0,172$ m und $t_{St} = 0,29$ m angenommen, woraus sich der Winkel α zu $30,7^\circ$ ergibt. Aus der Darstellung in Bild 6 folgt, daß der größte Personenstrom in Abhängigkeit von der Treppenbreite bei einer Personendichte von $8,24$ Pers/m² erreicht wird. Bei größeren Personendichten nimmt der Personenstrom wieder ab. Weiter zeigt dieses Bild, daß durch eine Verbreiterung der Treppe von 1,15 m bis 1,68 m nur eine sehr geringe Erhöhung des Personenstromes erreicht wird, der bei einer weiteren Verbreiterung bis auf 2,25 m wieder auf den Wert einer Treppe von ca. 1,15 m abfällt.

7. Zusammenfassung

Im Rahmen des vom Bundesminister für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau vergebenen Forschungsauftrages „Räumungsabläufe in Gebäuden als Grundlage für die Ausbildung von Rettungswegen“ wurden im Teil IV weitere Untersuchungen durchgeführt. Bei diesen Untersuchungen wurden durch Räumungsübungen und durch Beobachtungen u. a. die Bewegungsabläufe auf Treppen ermittelt und die Personendichteverteilung und Geschwindigkeit auf Treppen unterschiedlicher Breite sowie der Bewegungsablauf unter normalen Bedingungen sowie unter hohem körperlichem Einsatz untersucht.

Die dabei erhaltenen Ergebnisse für die Personenstromgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Personendichte auf Treppen wurden durch Gleichungen approximiert und mit Literaturwerten verglichen. Die Werte für den Personenstrom auf Treppen in Abhängigkeit von der Treppenbreite haben einen nicht linearen Zusammenhang ergeben. Die Versuche zeigten weiterhin, daß auch die mittlere Personenstromgeschwindigkeit auf Treppen von der Treppenbreite beeinflusst wird. Aus diesen Ergebnissen wurde eine Beziehung zur Berechnung des Personenstromes über Treppen abgeleitet.

Formelzeichen

a, b	Konstanten in Gleichung (12)
A, B	Konstanten in Gleichung (8)
b	Breite des Rettungsweges
b_F	Breite des Flures
b_T	Breite der Treppe zwischen den Handläufen
D	Personendichte
D^*	Personendichte in m ² /m ² (Projektionsflächen bezogen auf die Grundfläche) $D^* = D \cdot f$
\bar{D}	Zeitlicher Mittelwert der Personendichte
D_F	Personendichte im Flur
D_i	Personendichte im Abschnitt i

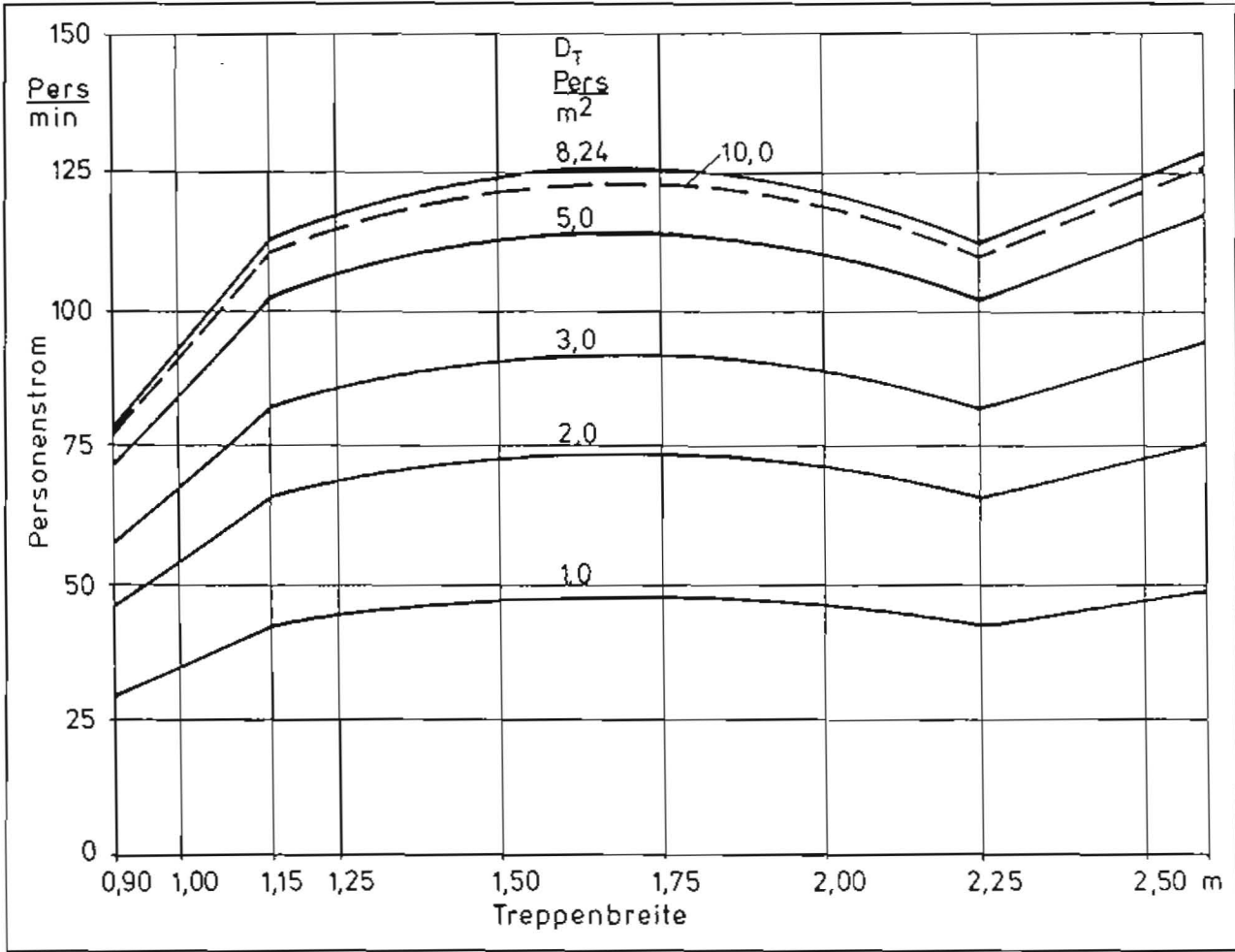
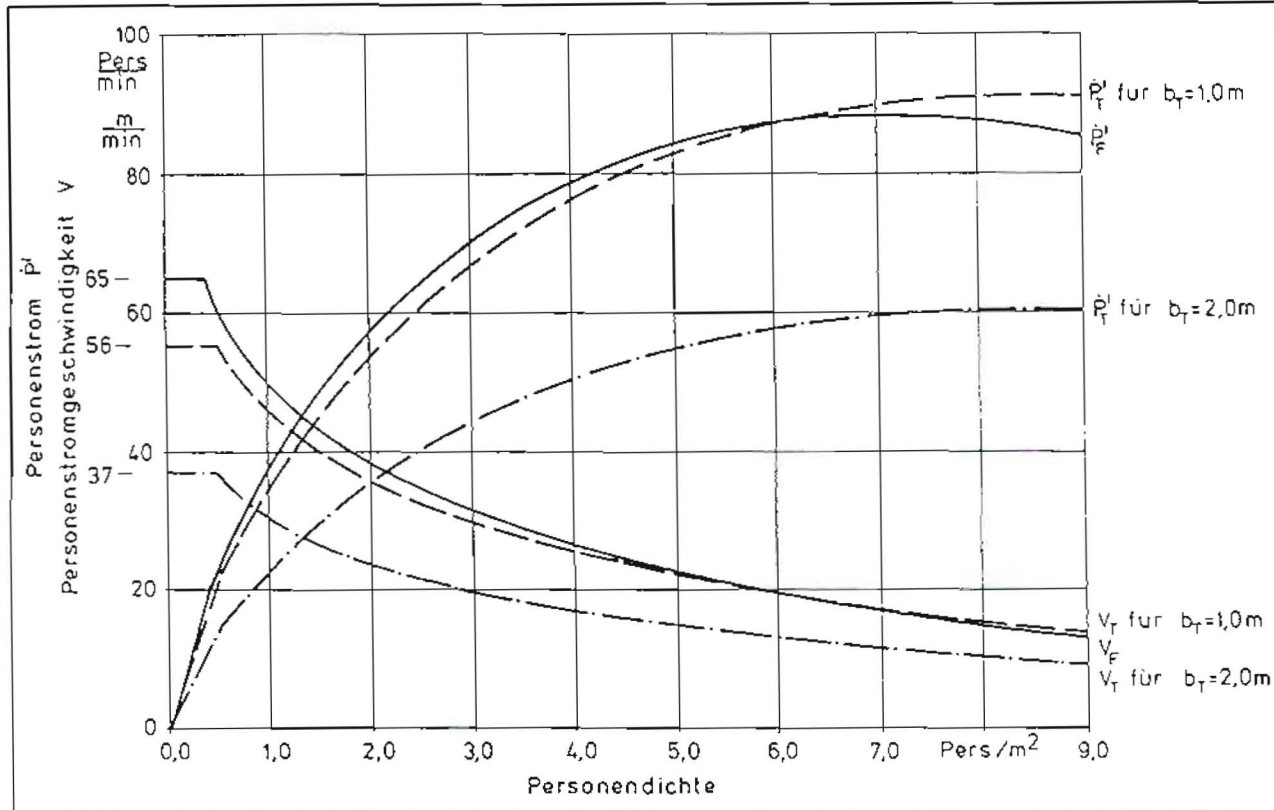


Bild 5: Personenstromgeschwindigkeit V_T nach Gleichung (13) und (14) für $b_T=1,0$ m und 2,0 m sowie V_F nach Gleichung (15), wobei die entsprechenden Personenströme auf einen Rettungsweg von 1 m Breite bezogen sind, in Abhängigkeit von der Personendichte

Bild 6: Personenstrom \dot{P}_T in Abhängigkeit von der Treppenbreite b_T für verschiedene Personendichten berechnet mit den Gleichungen (13), (14) und (17)



D_o	Grenzwert der Personendichte, bis zu der keine Verringerung von V auftritt
D_{St}	Personendichte auf der Treppe, Anzahl der Personen bezogen auf eine Stufe
D'_{St}	Personendichte auf der Treppe, Anzahl der Personen bezogen auf eine Stufe von 1 m Breite
D_T	Personendichte auf der Treppe, Anzahl der Personen bezogen auf die Grundfläche
f	Projektionsfläche einer Person auf die waagerechte Grundfläche
F_{St}	Fläche einer Stufe
g	Faktor zur Veränderung des Wertes V_{oT}^*
K	Faktor in Gleichung (9)
l	Weglänge
l_T	Lauflänge einer Treppe
n	Anzahl der Umschaltzyklen
n_{St}	Anzahl der Stufen je Treppe
P	Anzahl der Personen, die eine bestimmte Stelle eines Rettungsweges überschreiten
P_T	Anzahl der Personen auf einer Treppe
\dot{P}	Personenstrom
\bar{P}	Zeitlicher Mittelwert des Personenstromes
P'	Personenstrom bezogen auf eine Wegbreite von 1 m
\dot{P}_T	Personenstrom auf der Treppe
t_{St}	Tiefe einer Stufe
V	Personenstromgeschwindigkeit
\bar{V}	Zeitlicher Mittelwert der Personenstromgeschwindigkeit
V_i	Personenstromgeschwindigkeit im Abschnitt i
V_o	Personenstromgeschwindigkeit ohne gegenseitige Beeinflussung
V_{oT}^*	Freie Personenstromgeschwindigkeit auf einer Treppe von 1,15 m Breite

V_T	Personenstromgeschwindigkeit auf der Treppe
V'_T	Berechnete Personenstromgeschwindigkeit entsprechend Gleichung (8) für $D'_{St} = 0,455 \text{ Pers/St m}$
α	Neigungswinkel der Treppe
$\Delta\tau$	Zeitdifferenz

Literaturverzeichnis

- [1] Ahrens, H.; Karlsch, D.; Preuß, G.: Räumungsabläufe in Gebäuden als Grundlage für die Ausbildung von Rettungswegen Teil I: Literaturstudie
- [2] Steuer, W.; Karlsch, D.: Räumungsabläufe in Gebäuden als Grundlage für die Ausbildung von Rettungswegen Teil II: Theoriestudie
- [3] John, R.: Räumungsabläufe in Gebäuden als Grundlage für die Ausbildung von Rettungswegen Teil III: Reale Räumungsübung
- [4] John, R.: Räumungsabläufe in Gebäuden als Grundlage für die Ausbildung von Rettungswegen Teil IV: Untersuchung der Personenströme in Schleusen, an Türen aus Großräumen und auf Treppen unterschiedlicher Breite
- [5] Pauls, J. L.: Recommendations for improving the safety of stairs; Building Practic Note NO. 35, Ottawa; June 1982, National Research Council, Canada
- [6] Cholvevnikov, V.: Normung der Fluchtwege von Schulgebäuden (russisch); Pozarnoe delo (1980) Nr. 12, S. 26-29
- [7] Cholvevnikov, V.; Kopylov, V.: Bewegung von Personenströmen durch Türen und Öffnungen (russisch); Pozarnoe delo (1982) Nr. 3, S. 24-25
- [8] Baunormen und Bauvorschriften SNIP II-2-80, Blatt 2 „Brandschutznormen für die Projektierung von Gebäuden und baulichen Anlagen“ des staatlichen Komitees für Bauwesen der UdSSR vom 18. Dezember 1980
- [9] Kisho, T. M.; Francis, R. L.: Network models of building evacuation: development of softwar system; National Bureau of Standards, Center for Fire Research, Washington DC, NBS-GCR-82-417