

Transporttechnik der Fussgänger

Transporttechnische
Eigenschaften des
Fussgängerverkehrs
(Literaturauswertung)

Schriftenreihe des IVT Nr. 90
Zweite, ergänzte Auflage
Zürich, März 1993

Transporttechnik der Fussgänger

Transporttechnische
Eigenschaften des
Fussgängerverkehrs
(Literatúrauswertung)

Ulrich Weidmann
dipl. Ing. ETH/SIA
Verkehrsinženieur SVI

Schriftenreihe des IVT Nr. 90
Zweite, ergänzte Auflage
Zürich, März 1993

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	5
1.1	Problemstellung	5
1.2	Ziel der Arbeit und Abgrenzung	6
1.3	Vorgehen	6
1.4	Gliederung	6
2.	Eigenschaften der Fussgänger	9
2.1	Ueberblick	9
2.2	Geschlecht und Alter	9
2.21	Verteilung der Geschlechter	9
2.22	Altersverteilung	10
2.3	Grösse	13
2.31	Grössenverteilung	13
2.32	Körperproportionen und Platzbedarf	14
2.4	Biomechanik und Physiologie	16
2.41	Bewegungsabläufe	16
2.42	Energieverbrauch	19
2.43	Leistungsfähigkeit	27
2.5	Behinderungen	37
2.51	Definition der Behinderungen	37
2.52	Behindertenanteile	38
2.53	Bewegungsmöglichkeiten und besondere Anforderungen	40
3.	Geschwindigkeitsverhalten der Fussgänger	43
3.1	Mittelwert	43
3.2	Abhängigkeit von verschiedenen Einflüssen	43
3.21	Ueberblick	43
3.22	Eigenschaften der Fussgänger	44
3.23	Begleitumstände der Bewegung	45
3.24	Charakteristiken der Anlage	50
3.25	Einfluss der Fussgängerdichte	52
3.3	Streuung der Fussgängergeschwindigkeiten	53
4.	Dimensionierung von Fussgängeranlagen	55
4.1	Grundlagen der Dimensionierung	55
4.11	Grundbeziehung	55
4.12	Genereller Verlauf der Leistungsfähigkeit	56
4.2	Fussgängerdichte und nutzbare Breite des Verkehrsraumes	56
4.21	Platzbedarf	56
4.22	Nutzbare Breite des Verkehrsraumes	60
4.3	Leistungsfähigkeit der Fussgängeranlagen	62
4.31	Leistungsfähigkeit in der Ebene	62
4.32	Leistungsfähigkeit von Treppen	66
4.33	Leistungsfähigkeit mechanischer Fussgängeranlagen	68
4.4	Zulässige Belastung der Verkehrsanlagen	75
4.41	Das Level-of-Service-Konzept	75
4.42	Bemessung mit zulässiger Belastung	80

5.	Zusammenfassung und Folgerungen	85
5.1	Zusammenfassung der wichtigsten Fakten	85
5.11	Eigenschaften der Fussgänger	85
5.12	Geschwindigkeitsverhalten der Fussgänger	87
5.13	Leistungsfähigkeit von Fussgängeranlagen	89
5.2	Folgerungen und Schwerpunkte weiterer Forschungsarbeiten	90
A.	Anhang	93
A.1	Literatur	93
A.2	Abkürzungsverzeichnis	104
A.3	Abbildungsverzeichnis	106
A.4	Verzeichnis der Tabellen	109

1. Einleitung

1.1 Problemstellung

In den vergangenen 25 Jahren wurde eine umfassende Literatur zur städtebaulichen Bedeutung und zu Planungsfragen des Fussgängerverkehrs veröffentlicht. Transporttechnische Untersuchungen hingegen blieben eher selten. Verantwortlich dafür ist zunächst der grosse Aufwand für Versuche und deren Auswertung. Dem Verkehrszweig wurde aber auch von technischer Seite zu wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Den Ingenieur vermag das Gebiet nur wenig zu fesseln, weil die Bewegungsdynamik und die Lasteinwirkungen für die Anlagenprojektierung und die Bemessung der Bauteile kaum eine Rolle spielen. Für Städteplaner und Architekten stehen die Aspekte der Raumnutzung und des persönlichen Befindens im Vordergrund.

Dabei geht leicht vergessen, dass die Berücksichtigung der Transporttechnik der Fussgänger für das gute Funktionieren der ihnen zugedachten Anlagen von zentraler Bedeutung ist. Namentlich im städtischen Raum und im Zusammenhang mit dem öffentlichen Verkehr wird man mit Fragestellungen konfrontiert, zu deren Beantwortung fundierte transporttechnische Kenntnisse des Fussgängerverkehrs unerlässlich sind. Dies lässt sich anhand einiger Beispiele zeigen:

- Verkehrsraum im städtischen Gebiet ist Mangelware. Gleichzeitig wird dem Fussgängerverkehr im Rahmen der Aufwertung des Stadtraumes und einer umweltfreundlichen Verkehrspolitik eine wachsende Bedeutung zugemessen. Eine sorgfältige Dimensionierung der Fussgängeranlagen trägt zur Förderung dieser Bestrebungen bei und gestattet das Setzen richtiger Prioritäten bei der Flächenaufteilung.
- Angebote des öffentlichen Verkehrs nach dem Knotenpunktprinzip stossen auf zunehmende Resonanz. Ein Systemmerkmal sind die konzentrierten kurzzeitigen Belastungen der Knotenpunktbahnhöfe. Dabei wird nicht nur die Leistungsfähigkeit der Fussgängeranlagen kritisch, sondern mit zunehmender Fussgängerdichte sinkt auch die Fussgängergeschwindigkeit und wächst die Umsteigezeit. Die Annahmen für letztere müssen daher genau und unter Beachtung der Streuungen überprüft werden.
- Die Aufnahmefähigkeit von Stau- und Warteräumen ist zu gewährleisten. Deren Überlastung mindert nicht nur die Attraktivität des öffentlichen Verkehrs, sondern es wird auch die Fahrgastwechselzeit durch Rückstauererscheinungen verlängert und dadurch der Betriebsablauf gestört.
- Das Einzugsgebiet von Haltestellen des öffentlichen Verkehrs, von Verkaufslökalen und von öffentlichen Einrichtungen wird entscheidend von den Fussweglängen potentieller Benutzer und den zu überwindenden Steigungen bestimmt. Gerade der Mikrobereich ist wesentlich und muss sehr sorgfältig geplant werden.

Mit diesen Beispielen soll es sein Bewenden haben, zeigen sie doch hinreichend, dass sich eine Vernachlässigung der transporttechnischen Aspekte bitter rächen kann.

1.2 Ziel der Arbeit und Abgrenzung

Die vorliegende Arbeit bezweckt einen Ueberblick über den Stand des Wissens auf dem Gebiet der transporttechnischen Eigenschaften des Fussgängerverkehrs. Zielgrössen sind namentlich die massgebenden Charakteristiken der Fussgänger, deren Geschwindigkeitsverhalten sowie die Leistungsfähigkeit verschiedener Anlagentypen in Abhängigkeit vom Benützungskomfort.

Rahmen der Studie bildet ein Forschungsprojekt über den Fahrgastwechsel im öffentlichen Personenverkehr. Der Mangel an Fahrgastwechseluntersuchungen im engeren Sinne machte eine gezielte transporttechnische Fussgängeruntersuchung nötig, die mit diesem Bericht als selbständige Arbeit veröffentlicht wird. Nur gestreift werden aufgrund der speziellen Fragestellung die in der Fachliteratur intensiv behandelten Fahrbahnüberquerungen. Unberücksichtigt bleiben weiter die planerischen Aspekte. Zu architektonischen Gesichtspunkten, zur Schätzung des Verkehrsaufkommens, zu den zeitlichen Gesetzmässigkeiten, zu den Verkehrszwecken und zur Verkehrsmittelwahl werden somit keine Aussagen gemacht. Die vorliegende Literaturlauswertung erhält dadurch zwangsläufig eine einseitige Gewichtung, was nicht zur Auffassung verleiten soll, dass der Fussgängerverkehr auf der technischen Ebene abschliessend behandelt werden kann.

1.3 Vorgehen

Grundlage der Literaturlauswertung bildeten gegen 200 Veröffentlichungen zum Fussgängerverkehr in Fachzeitschriften und Büchern der letzten Jahrzehnte mit Schwerpunkt im deutschen und angelsächsischen Sprachraum. Soweit als möglich wurden die Literaturangaben zu zuverlässigen Richtwerten zusammengefasst. Das Schwergewicht der Hauptarbeit gestattete aber keine eigenen Felduntersuchungen, obschon dies im Sinne der Ergänzung und Eichung angezeigt gewesen wäre. Dies sowie das Ausfüllen von Lücken in der vorliegenden Literatur muss späteren Arbeiten überlassen werden.

1.4 Gliederung

Die Ergebnisse der Untersuchung werden in drei Teilen vorgestellt:

- Ein erster Abschnitt (Kapitel 2) befasst sich mit den Eigenschaften der Fussgänger als Individuen. Im wesentlichen handelt es sich dabei um das zahlenmässige Geschlechterverhältnis und dessen Abhängigkeit vom Alter, die Altersverteilung, die Körpergrössenverteilung und die Körperproportionen, die Bewegungsabläufe beim Gehen und Treppensteigen, den Energieverbrauch bei der Fortbewegung sowie die körperliche Leistungsfähigkeit und deren Gesetzmässigkeiten. Abschliessend wird auf die Behinderungen des Menschen und die Anteile behinderter Personen an der Gesamtbevölkerung eingegangen.
- Im zweiten Teil (Kapitel 3) wird das Geschwindigkeitsverhalten in Beziehung gebracht mit den Eigenschaften der Fussgänger und der Fusswege, den Besonderheiten der Anlagen sowie der Fussgängerdichte. Schliess-

lich wird die zu erwartende Streuung der Fussgängergeschwindigkeit diskutiert.

- Der dritte Teil (Kapitel 4) untersucht die Leistungsfähigkeit von Fussgängeranlagen, wobei zunächst das sogenannte Fundamentaldiagramm hergeleitet und die nutzbare Anlagenbreite bestimmt wird. Für die Dimensionierung wird analog zum Strassenverkehr zwischen der Leistungsfähigkeit (maximaler Durchfluss) und der zulässigen Belastung (Einhaltung einer bestimmten Benützungsqualität) unterschieden.

Um die Lesbarkeit zu erhöhen, werden die detaillierten Angaben und Ueberlegungen der Autoren nur in Einzelfällen getrennt nach den einzelnen Quellen dargestellt.

2. Eigenschaften der Fussgänger

2.1 Ueberblick

Um das verkehrstechnische Verhalten der Fussgänger zu verstehen sind einige Kenntnisse über die sie bestimmenden Fussgängereigenschaften erforderlich. Namentlich handelt es sich dabei um:

- das Geschlecht
- das Alter
- die Grösse, die Körperproportionen und der Platzbedarf
- die Biomechanik und die Physiologie

Diese vier Bereiche werden in diesem Abschnitt näher diskutiert. Die Grundlagen dazu stammen aus der medizinischen Literatur. Der Vergleich mit den verkehrstechnischen Erhebungen erfolgt in den Kapiteln 3 und 4.

2.2 Geschlecht und Alter

2.2.1 Verteilung der Geschlechter

Das Geschlecht eines Menschen beeinflusst die körperliche Leistungsfähigkeit und mit-hin die Gehgeschwindigkeit. Die Kenntnis der prozentualen Anteile in einem Fussgänger-kollektiv wäre somit nützlich, doch ist die Angabe allgemein gültiger Werte nahezu unmöglich. Zwar lässt sich bei den Neugeborenen ein weitgehend stabiles Verhältnis von 105 Knaben auf 100 Mädchen beziehungsweise von 51.2 zu 48.8 % ermitteln [168]. Bei allen übrigen Altersgruppen überlagern sich aber demographische und soziale Ein-flüsse dem natürlichen Geschlechterverhältnis. Namentlich die ausländische Erwerbsbe-völkerung, welche aus rechtlichen und teilweise wirtschaftlichen Gründen vorwiegend aus jüngeren Männern besteht, kann zu einer Verzerrung führen. Dadurch wird in den unteren Alterskategorien die grössere Sterblichkeit der Männer zunächst überkompensiert. In der Stadt Zürich, welche für mittlere Grossstädte hinreichend repräsentativ ist, wird erst in der Alterskategorie der 40- bis 44-jährigen wieder ein Gleichstand erreicht. In der Altersgruppe der 60- bis 64-jährigen kommen auf 100 Frauen lediglich noch 77 Männer, in der Altersgruppe zwischen 85 und 89 Jahren sind es sogar nur noch deren 40 [168].

Der verkehrstechnische Nutzen dieser Informationen muss leider beschränkt bleiben, da sich die Fussgängergruppen in der Praxis kaum je so zusammensetzen, dass alle Alters-schichten und beide Geschlechter ihrer statistischen Wahrscheinlichkeit entsprechend vertreten sind. Die Differenzen entstehen durch eine andere Verkehrsmittelwahl (Frauen benützen überdurchschnittlich häufig öffentliche Verkehrsmittel) sowie durch die unter-schiedliche Lebensweise (Berufstätigkeit, Wirtschaftsbranche). Beispielhaft hat dies [116] für eine Geschäftsstrasse in Bonn untersucht und dabei sowohl einen Tagesgang wie einen Wochengang festgestellt:

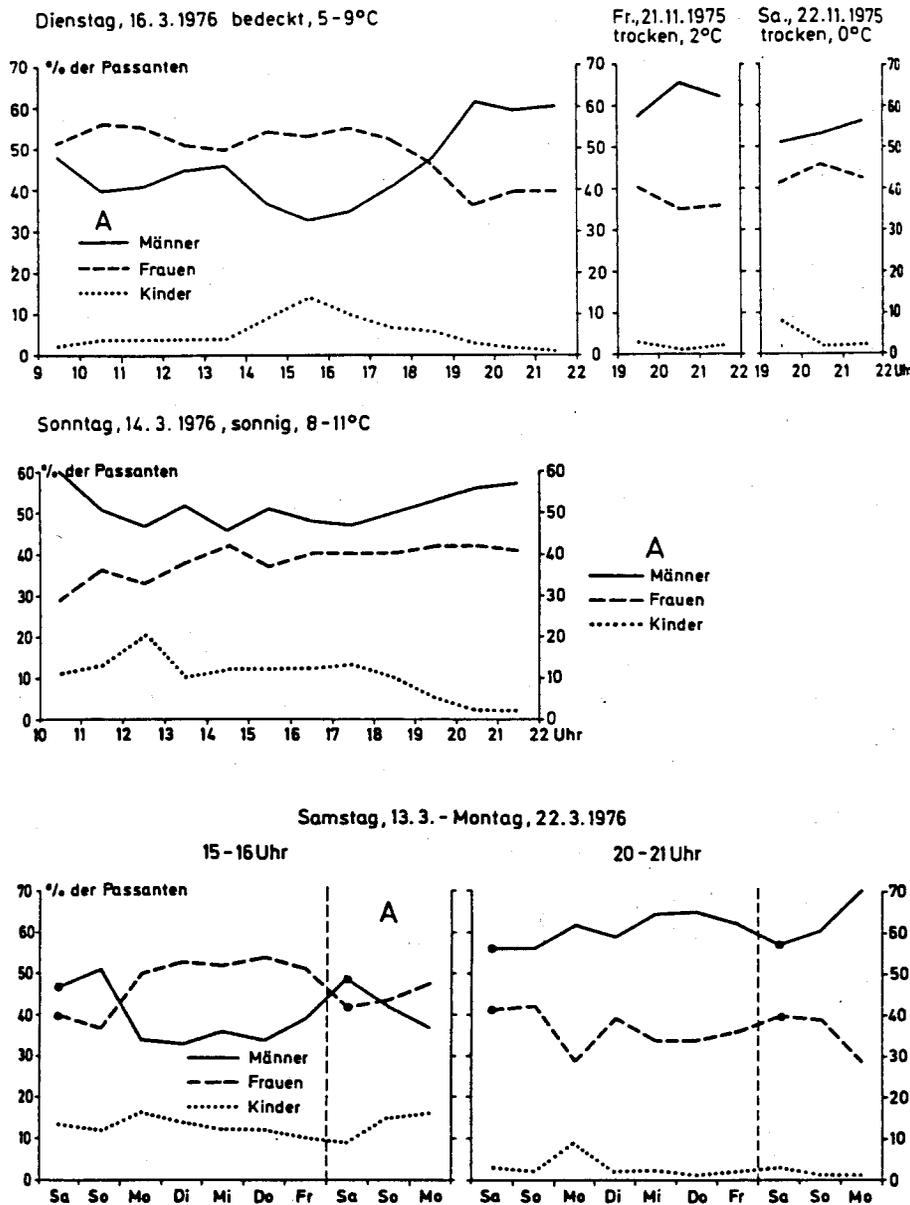


Abb. 1: Passantenstruktur nach Geschlecht in der Sternstrasse in Bonn. Oben: Tagesganglinie; unten: Wochenganglinie (Abbildung: [116]).

2.22 Altersverteilung

Aus dem genannten Grund kommt der mittleren Altersverteilung in der Bevölkerung ebenfalls nur eine mässige Aussagekraft zu. Wesentlich sind aber für den Verkehrsingenieur folgende Tendenzen:

- Die Bedeutung der Alterskategorien schwankt von Jahrgang zu Jahrgang. Kommen geburtenstarke Jahrgänge ins höhere Alter, so steigt dadurch das Durchschnittsalter und der Anteil der älteren Bevölkerung. Ein solcher Trend lässt sich aus der Bevölkerungspyramide recht zuverlässig vorausbestimmen, vorausgesetzt dass starke Wanderungsbewegungen ausbleiben.

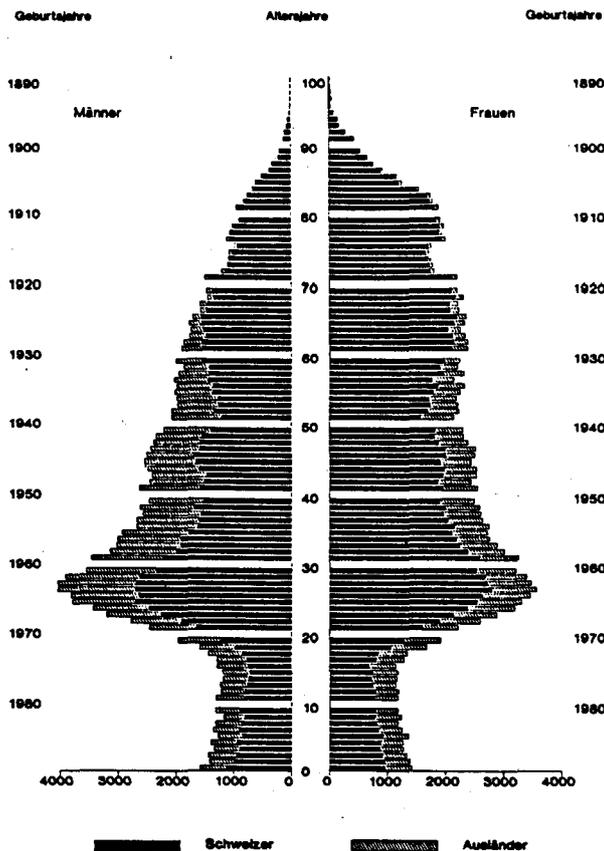


Abb. 2: Alterspyramide der Stadt Zürich, Stand 1990 (Abbildung: [168]).

Die Lebenserwartung wächst seit Jahren stetig an. In der Schweiz ist sie für den Zeitpunkt der Geburt seit 1880 von 44 auf 81 Jahre bei Frauen und von 41 auf 74 Jahre bei Männern gestiegen.

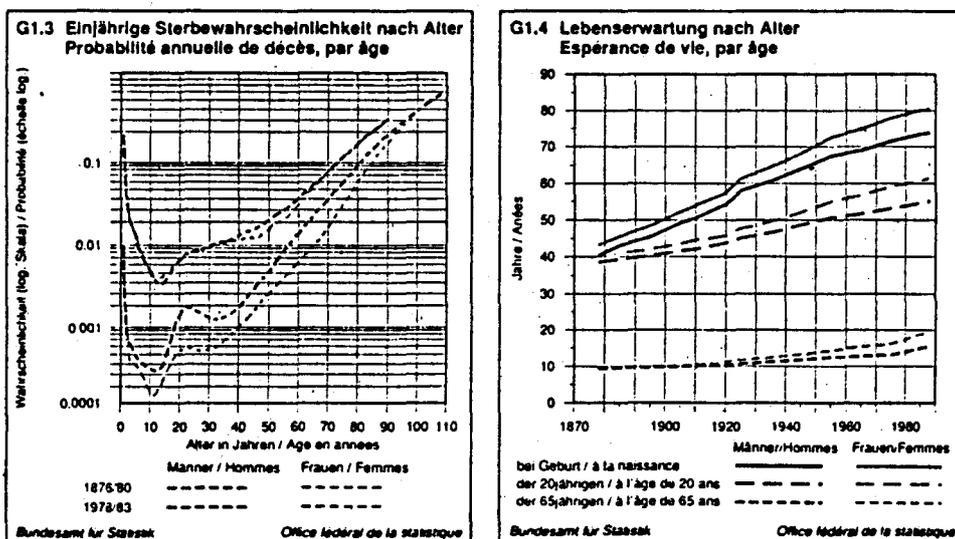


Abb. 3: Sterbewahrscheinlichkeit (links) und Lebenserwartung (rechts) der Schweizer Bevölkerung nach Alter und Geschlecht (Abbildung: [167]).

Die wachsende durchschnittliche Lebenserwartung ist kaum auf den Anstieg des erreichten Höchstalters zurückzuführen, welches praktisch unverändert bei etwa 90 bis 100 Jahren liegt. Vielmehr gelangen immer mehr Angehörige eines Jahrganges in ein mittleres oder höheres Alter. Somit ist vor allem das Absinken der Sterblichkeit in jüngeren Jahren für die höhere statistische Lebenserwartung verantwortlich. Begründet wird diese Erscheinung mit den Errungenschaften der Zivilisation, namentlich der gesünderen Ernährung, der besseren Hygiene, der grösseren Sicherheit am Arbeitsplatz und dem ausgebauten Gesundheitswesen [137].

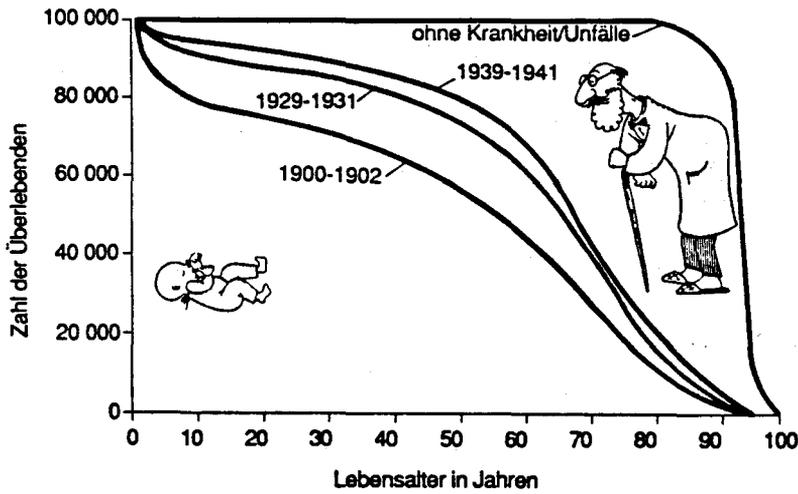


Abb. 4: Ueberlebensrate von jeweils 100'000 US-Amerikanern in aufeinanderfolgenden Zeiträumen. Die oberste Kurve stellt die theoretische Ueberlebenskurve ohne Krankheiten oder Unfälle dar (Abbildung: [137]).

Die Restlebenserwartung der beiden Geschlechter gleicht sich im höheren Alter wieder an, da verschiedene geschlechtsspezifische Todesfaktoren wie allgemeine Unfälle, Motorfahrzeugunfälle und Berufskrankheiten entfallen [168].

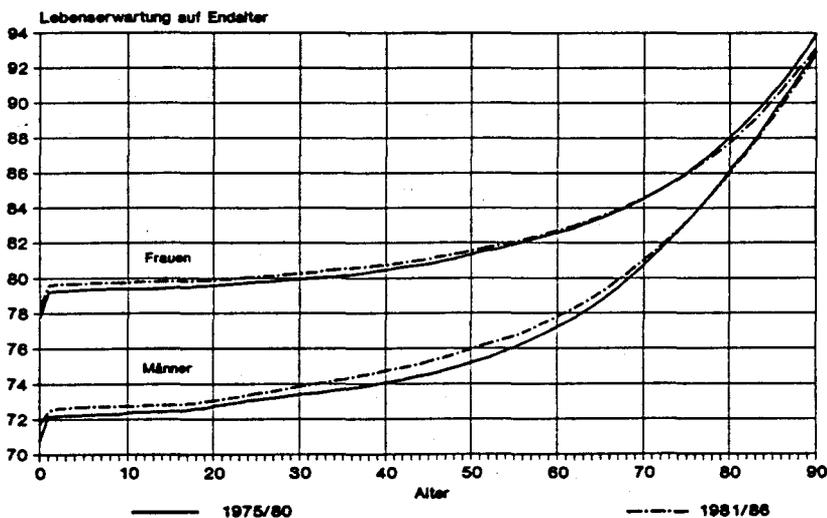


Abb. 5: Lebenserwartung auf Endalter in der Stadt Zürich (Abbildung: [168]).

Es ist davon auszugehen, dass künftig der Anteil der Menschen in der Altersgruppe zwischen 60 und 90 Jahren stark ansteigt. Diese Altersgruppe zeichnet sich durch eine zunehmende Aktivität aus und wird in vermehrter Masse als Verkehrsteilnehmer in Erscheinung treten, sei es als Automobilist, als Fussgänger oder als Benutzer öffentlicher Verkehrsmittel.

2.3 Grösse

2.31 Grössenverteilung

Die Grösse des menschlichen Körpers ist eine Funktion des Alters, des Geschlechts, des Jahrganges und der Rasse. Die Altersabhängigkeit ist primär in der Altersgruppe zwischen 0 und etwa 20 Jahren von Belang. Das Wachstum der Kinder verläuft nahezu stetig und zeigt nur im Alter von etwa 8 bis 12 Jahren eine leichte Verzögerung, wobei diese Aussage für die Mittelwerte der Jahrgänge gilt. Bei den einzelnen Individuen sind die Wachstumsschübe und Stagnationsphasen ausgeprägter. Die Mädchen eilen den Knaben während des gesamten Wachstumsprozesses um mehr als ein Jahr voraus und erreichen ihre endgültige Körpergrösse bereits mit etwa 17 Jahren, während dies bei den Knaben erst im 18. Lebensjahr der Fall ist. Die Körpergrösse von erwachsenen Frauen liegt im Mittel um etwa 7 % unter jener von Männern [91].

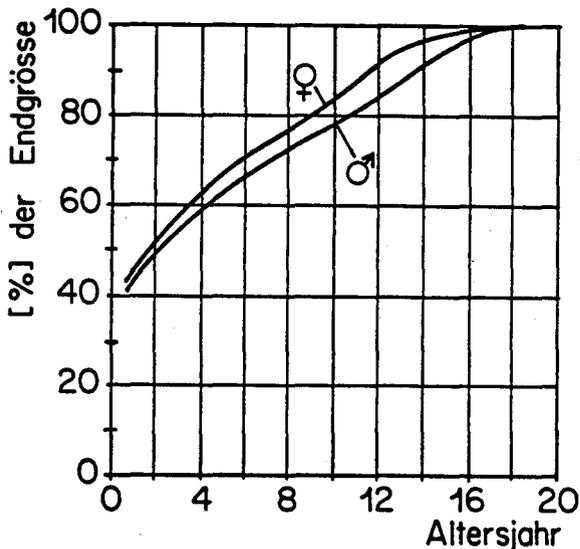


Abb. 6: Wachstumsverlauf von Kindern in Prozenten der erreichten Endgrösse (Abbildung: IVT nach [44], [59]).

Die mittlere Körpergrösse wächst zumindest in Europa und Nordamerika seit Jahrzehnten beständig, was als Akzeleration bezeichnet wird. Erklärt wird die Akzeleration mit den veränderten Ernährungsgewohnheiten, so beispielsweise mit der Verwendung von raffiniertem Zucker. Das Ausmass ist mit ungefähr 1.1 cm pro Jahrzehnt beachtlich und hat allein seit dem Zweiten Weltkrieg zu einer rund 5 cm grösseren Körperlänge geführt. In jüngster Zeit scheint sie sich zu verlangsamen [44], [81].

Die mittlere Grösse eines Menschen in Zentraleuropa kann aus den verschiedenen Angaben und unter Berücksichtigung der Akzeleration bei den Männern auf derzeit etwa 178.5 cm und bei den Frauen auf 166.0 cm geschätzt werden. Für beide Geschlechter

zusammen liegt der Mittelwert der Körpergrösse bei etwa 172.3 cm. Die Grössenverteilung innerhalb eines Geschlechts entspricht ungefähr einer Normalverteilung mit einer Standardabweichung von 3.3 % der Körpergrösse. Dies ergibt beim Mann ± 5.9 cm und bei der Frau ± 5.5 cm.

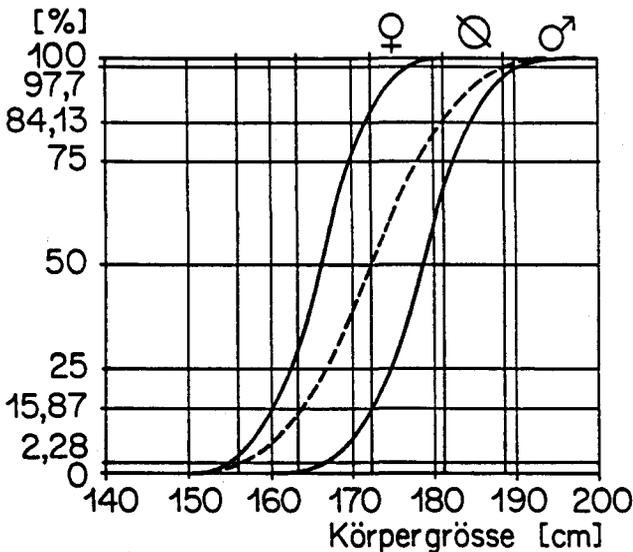


Abb. 7: Grössenverteilung erwachsener Menschen in Mitteleuropa, nach Geschlecht und total (Abbildung: IVT).

In südlichen und asiatischen Ländern liegen die Werte tiefer. [40] gibt beispielsweise an, dass ein Mann in Frankreich 3 %, in Italien 4 %, in Japan 6 %, in Thailand 8 % und in Vietnam 9 % kleiner ist als in Mitteleuropa. Gemäss [91] sind erwachsene Mitteleuropäer auch ungefähr 1 bis 2 cm grösser als Einwohner von Grossbritannien.

2.32 Körperproportionen und Platzbedarf

2.32.1 Körperproportionen

Von den Körperproportionen sind im vorliegenden Zusammenhang insbesondere von Belang:

- das Verhältnis zwischen Körpergrösse und Beinlänge
- das Verhältnis zwischen Körpergrösse und minimalem Platzbedarf

Die Länge der Gliedmassen der Frau ist im Vergleich zum Mann leicht unterproportional, dafür ist der Rumpf etwas länger. Die Länge der Beine (massgebend ist die Distanz vom Boden bis zum Gelenkpunkt des Oberschenkels) wird mit 52 % der gesamten Körperlänge oder 86.3 cm angegeben. Beim Mann beträgt dieser Wert 53 % oder 94.6 cm [44], [118], [162], [177]. Die maximale Körperbreite beträgt bei mittleren Verhältnissen für Männer und Frauen 0.46 m (27 % der Körpergrösse), dies im ruhenden Zustand und ohne Berücksichtigung der Kleidung. Die Körpertiefe beläuft sich auf 0.23 m (13 % der Körpergrösse). Der 97.5 %-Wert dieser Zahlen liegt bei etwa 0.50 m beziehungsweise 0.27 m [44]. Die unterschiedliche Wachstumsgeschwindigkeit der einzelnen Körperteile führt dazu, dass Kinder andere Körperproportionen aufweisen als Erwachsene.

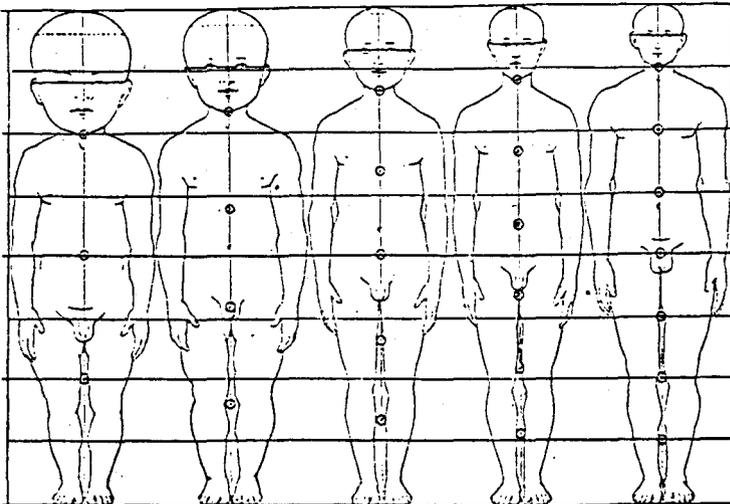


Abb. 8: Verschiebung der Körperproportionen im Laufe des Wachstums (Abbildung: [162] nach Stratz).

2.32.2 Platzbedarf

Der Platzbedarf als minimale auf den Boden projizierte Grundfläche des Rumpfes ergibt sich ohne Standfläche der Füße näherungsweise als Ellipse mit der Körperbreite und der Körpertiefe als Hauptachsen. Aufgrund von [44] beträgt der Mindestplatzbedarf ohne Kleidung und ohne Gepäckstücke im Mittel rund 0.085 m^2 , was einer Personendichte von 11.8 P/m^2 entspricht. Berechnet man die Grundfläche zur Berücksichtigung der nicht auffüllbaren Zwischenräume als Rechtecke, so ergibt sich ein Platzbedarf von 0.11 P/m^2 oder eine mögliche Grenzdichte von 9.3 P/m^2 .

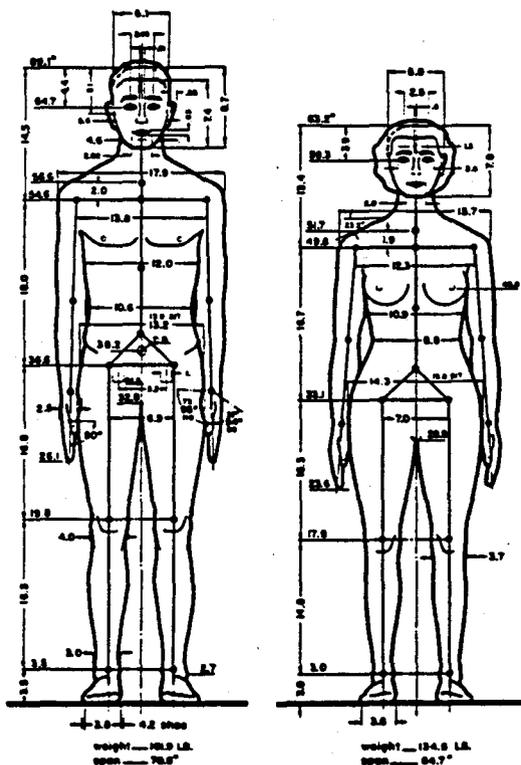


Abb. 9: Anthropometrische Daten eines stehenden Mannes und einer stehenden Frau, Durchschnittswerte für USA-Bevölkerung ca. 1960, alle Angaben in [inch] (Abbildung: [44]).

Der Platzbedarf eines stehenden Menschen umfasst unter praktischen Bedingungen zusätzlich die Füße, die Kleidung sowie die nicht ausfüllbaren Zwischenräume. Die wenigen Angaben dazu schwanken stark. Mit hinreichender Genauigkeit kann davon ausgegangen werden, dass die Projektion des Körperumrisses mit Berücksichtigung der genannten Faktoren im Mittel eine Fläche von etwa $0.15 \text{ m}^2/\text{P}$ ergibt, also rund das Doppelte der minimalen Fläche. Dies entspricht einer Personendichte von rund 6.6 P/m^2 , welche nicht überschritten werden kann [25], [85], [140]. Allfällig mitgeführtes Gepäck lässt die praktisch erreichbare Fussgänerdichte weiter absinken.

2.4 Biomechanik und Physiologie

2.41 Bewegungsabläufe

Die Muskelkräfte, die äusseren Reaktionskräfte, die Schwerkraft, die Trägheitskräfte sowie die Reibung bestimmen die Bewegungsabläufe des Menschen. Der kybernetische Mechanismus ist äusserst komplex, da der Aufbau des Bewegungsapparates nur Rotationen zulässt. Alle Bewegungen müssen darauf zurückgeführt werden, wozu sich kinematische Ketten aus einer Anzahl Gliedern und Gelenken bilden [63]. Die Bewegung eines Beines lässt sich als Pendelbewegung idealisieren. Die Gehgeschwindigkeit und der Energieverbrauch des Menschen hängen daher mit dessen Eigenfrequenz zusammen [43]. Ändert sich der Abstand des Schwerpunktes des Beines vom Drehpunkt, was zum Beispiel durch schwerere Schuhe verursacht werden kann, so ändert sich auch die Schrittfrequenz und nähert sich einem neuen Energieoptimum an [170]. Die Pendelbewegung wird beidseitig durch die elastischen Muskeln begrenzt. Die Bewegungsenergie geht bei der Auslenkung in die potentielle Energie des gedehnten Muskels über. Für die Rückstellung wäre keine Energie erforderlich, wenn die Lagerung reibungsfrei und die Energiespeicherung im Muskel verlustlos wäre.

Der Mensch kennt die beiden Fortbewegungsarten des Gehens und des Laufens. Beim Gehen sind während kurzer Zeit beide Füße und immer mindestens ein Fuss in Kontakt mit dem Boden. Beim Laufen tritt dagegen zwischen den Stützphasen eine Flugphase auf [43].

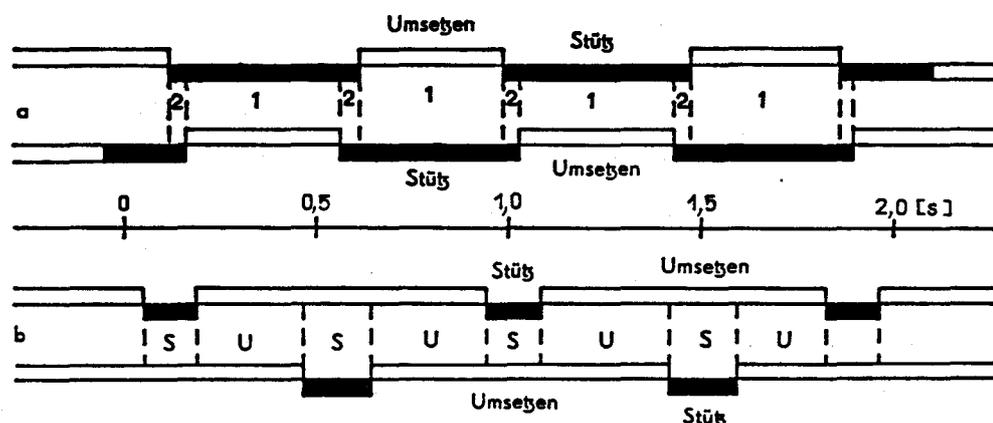


Abb. 10: Chronogramm von Gehen (a) und Laufen (b) (Abbildung: [43]).

Der Schwerpunkt des Körpers erreicht beim Gehen in der Stützphase den höchsten Punkt, während dies beim Laufen in der Flugphase eintritt.

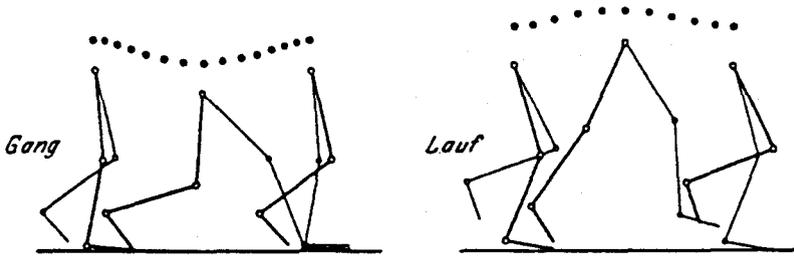


Abb. 11: Verlauf der Schwerpunktlage des Körpers während des Bewegungsvorganges beim Gehen beziehungsweise beim Laufen (Abbildung: [16]).

Während der Gehbewegung unterliegt der Körperschwerpunkt vielfältigen Beschleunigungen und Verzögerungen:

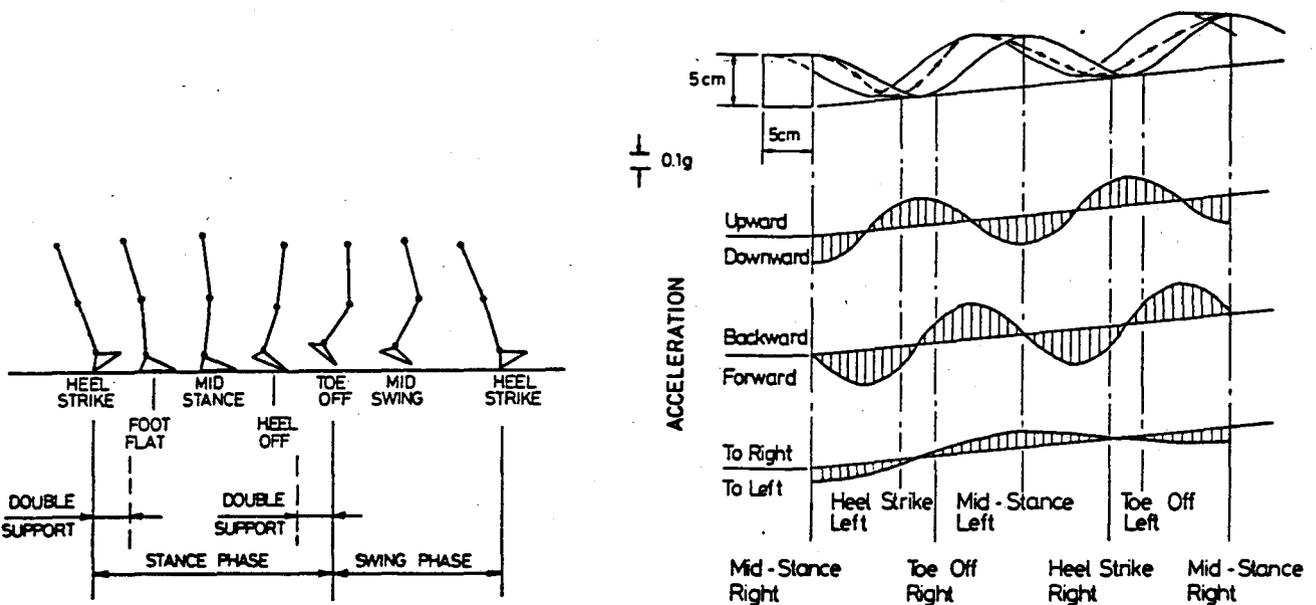


Abb. 12: Links: Phasenverlauf der Bewegung eines Beines. Rechts: Bewegung des Körperschwerpunktes und Verlauf der auf ihn einwirkenden Beschleunigungen und Verzögerungen (Abbildung: [118]).

Das Körpergewicht lagert sich bei jedem Schritt von einem Bein auf das andere um. Das maximal vom Knie zu tragende Gewicht inklusive dynamischem Anteil beträgt etwa 110 Prozent der statischen Gesamtlast. Dies korrespondiert mit der oben dargestellten zusätzlichen vertikalen Beschleunigung von etwa 0.1 g infolge der Gehbewegung [118].

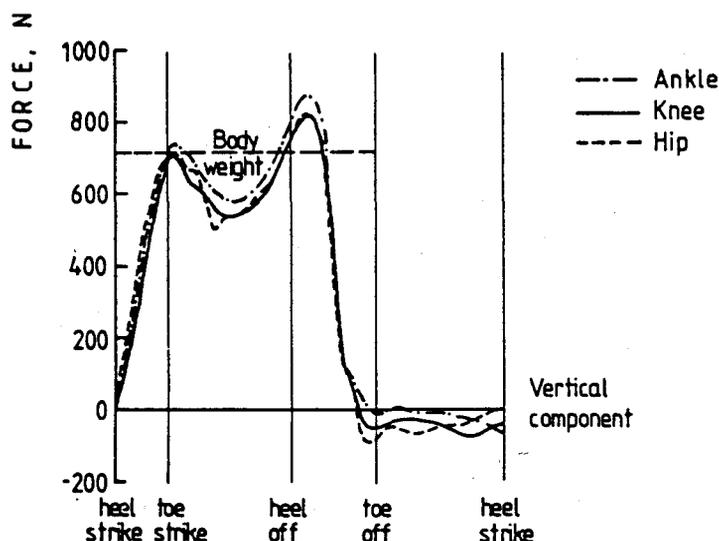


Abb. 13: Gelenkkräfte beim Gehen in der Ebene (Abbildung: [118]).

Die Fortbewegungsgeschwindigkeit kann erhöht werden durch die Verlängerung der Schritte, die Vergrößerung der Frequenz oder eine Kombination von beiden. Im tiefen Geschwindigkeitsbereich vergrößert sich sowohl die Frequenz wie die Schrittlänge, wobei letztere linear mit der Geschwindigkeit wächst. Nach [111] gilt dafür folgende Beziehung:

$$(1) \quad l_s(v_F) = 0.235 \text{ m} + 0.302 \cdot v_{F,h}$$

wobei l_s = Schrittlänge [m]
 $v_{F,h}$ = Horizontale Fussgängergeschwindigkeit [m/s]

Im mittleren Geschwindigkeitsbereich liegt das Hauptgewicht auf der Verlängerung der Schritte [80]. Bei einer Gehgeschwindigkeit von über 2.5 m/s kann nur noch die Frequenz erhöht werden, wobei bereits bei 2.0 m/s die obere Grenze des natürlichen Gehens erreicht ist [111], [125]. Befunde deuten darauf hin, dass ähnliches auch für eine Laufgeschwindigkeit von über 6.0 m/s bei einer Schrittlänge von über zwei Metern gilt. Als untere Geschwindigkeitsgrenze aus Gleichgewichts- beziehungsweise Stabilitätsgründen gilt allgemein 0.5 m/s. Die Spannweite der normalen Gehgeschwindigkeiten reicht somit von 0.5 bis 2.2 m/s [152].

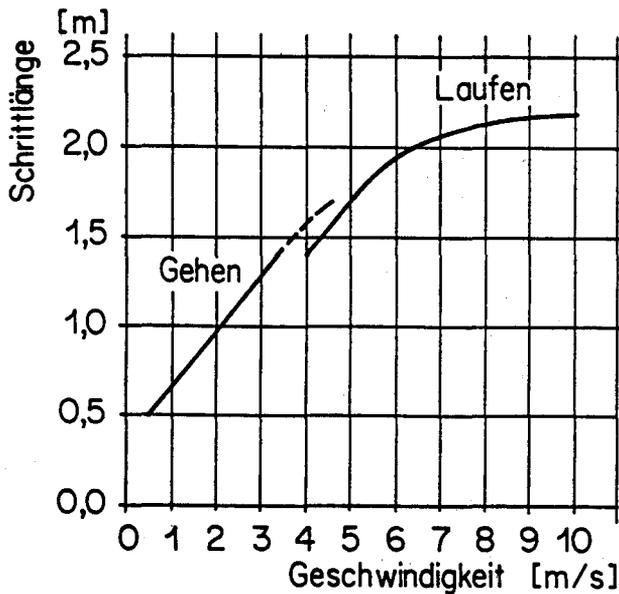


Abb. 14: Schrittlänge in Funktion der Geschwindigkeit beim Gehen und Laufen (Abbildung: IVT nach [111]).

Als Schrittlänge im Gehen nennt [43] zwischen 0.80 und 0.90 m und als Schrittfrequenz 1.8 bis 2.0 Hz. Dies entspricht einer Geschwindigkeit von rund 1.63 m/s, was zu hoch ist. Gut zutreffen dürfte die genannte Frequenz, da man diese auch beim Hüpfen auf einem Bein (2.06 Hz) oder beim Tanzen (2.10 Hz) festgestellt hat [16]. Die Schrittlänge hingegen liegt eher bei 0.63 m, woraus sich eine Geschwindigkeit von etwa 1.32 m/s ableitet [147].

2.42 Energieverbrauch

2.42.1 Grundumsatz

Der Gesamtenergieverbrauch eines Menschen setzt sich zusammen aus dem Grundumsatz und dem Arbeitsumsatz. Der Grundumsatz ist der Energiebedarf bei absoluter Körperruhe. Gemessen wird er bei der sogenannten Indifferenztemperatur von 28 bis 31 Grad C. Er dient der Aufrechterhaltung der lebensnotwendigen Körperfunktionen und teilt sich folgendermassen auf [170]:

•	Herz	9%
•	Leber	25%
•	Muskulatur	25%
•	Gehirn	20%
•	Uebrige Organe	21%

Der Grundumsatz liegt für Männer bei etwa 300 kJ/h und für Frauen bei 250 kJ/h oder 7200 kJ/d beziehungsweise 6000 kJ/d. Bezogen auf das Körpergewicht ist der Grundumsatz der Frauen um etwa 10 % kleiner als jener von Männern, was mit einer stärkeren Ausbildung des Unterhautfettgewebes begründet wird. Bezogen auf 1 kg fettfreies Körpergewicht ist er praktisch identisch [11], [170], [175]. Der Grundumsatz ist altersabhän-

gig. Er fällt bezogen auf die Körperoberfläche bis zum zwanzigsten Altersjahr zunächst stark ab. Anschliessend verringert er sich langsam weiter und erreicht im höheren Alter sein Minimum [149].

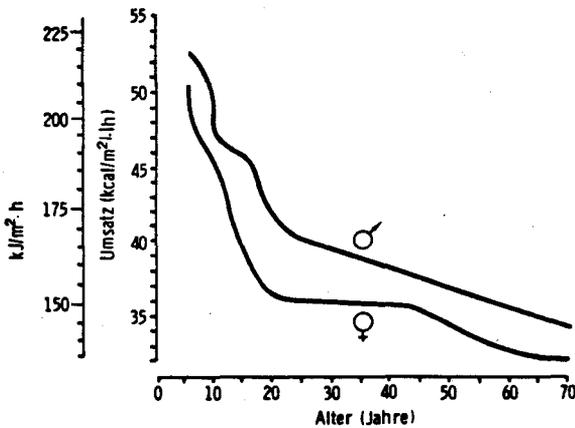


Abb. 15: Abhängigkeit des Grundumsatzes vom Alter und vom Geschlecht, bezogen auf die Körperoberfläche (Abbildung: [149] nach Boothby).

2.42.2 Gesamtumsatz und Wirkungsgrad

Zum Grundumsatz kommt der Arbeitsumsatz hinzu (Gesamtumsatz abzüglich des Grundumsatzes). Bezogen auf das Körpergewicht ist dabei der Energieaufwand für alle Menschen ungefähr gleich. Um den Energieaufwand für die Fortbewegung einordnen zu können, werden vergleichsweise die Energieverbräuche für einige andere Tätigkeiten aufgeführt:

Tab. 1: Gesamtumsätze bei verschiedenen Tätigkeiten pro kg Körpergewicht. Der Energieverbrauch wird in [kJ/kg · h] angegeben, obschon verschiedene der Tätigkeiten kaum während einer ganzen Stunde mit der genannten Leistung ausgeübt werden können ([11], [138], [149], [162], [163], [175]).

Tätigkeit	Energieverbrauch [kJ/kg · h]
Ruheumsatz	3.89
Ruhen im Liegen	4.19
Ruhen im Sitzen	4.35
Sitzen	5.00
Schreiben im Sitzen	7.14
Stehen	7.59
Essen im Sitzen	8.71
Velofahren 9 km/h	14.83
Tanzen	19.98
Bergsteigen	30.00
Laufen	33.86
Velofahren 21 km/h	36.53
Eislauf	41.56
Schwimmen 50 m/min	44.91
Velofahren 30 km/h	50.28
Skilanglauf 14 km/h	96.78
Delphinschwimmen 100 m/min	477.66

Vom Energieverbrauch der einzelnen Tätigkeiten zu unterscheiden ist der gesamte tägliche Energieverbrauch als Summe der Energieverbräuche sämtlicher Tätigkeiten des Tages. Da insbesondere die Tätigkeiten mit hohem Energiebedarf nur während einer kurzen Zeit ausgeübt werden, kommt dem Grundumsatz trotz seines kleinen absoluten Betrages eine gesamthaft wesentliche Stellung zu, die vom Arbeitsumsatz nur bei sehr anstrengender Berufstätigkeit übertroffen wird. Damit kann der Mensch seinen Energiebedarf nur beschränkt durch Reduktion seiner Tätigkeit einschränken [80].

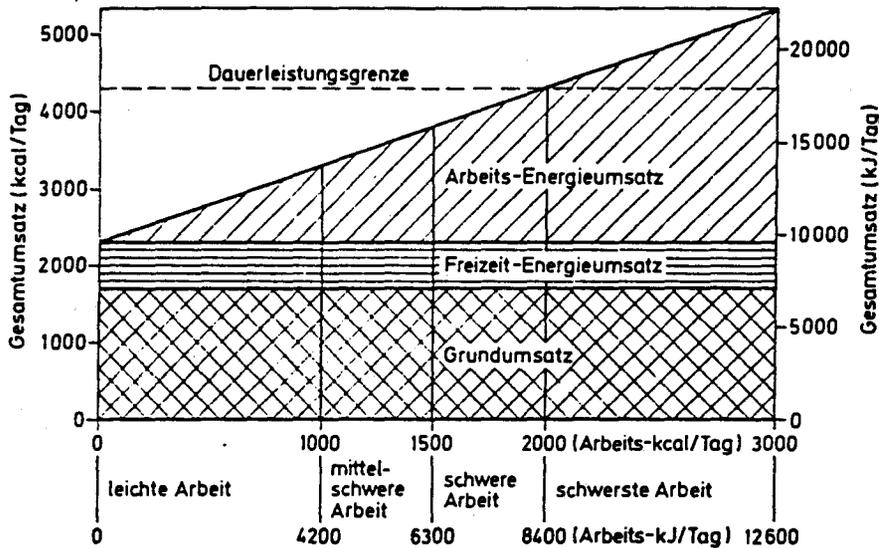


Abb. 16: Unterteilung des täglichen Energieumsatzes nach leichter, mittelschwerer, schwerer und schwerster Arbeit (Abbildung: [80]).

Die Muskeln vermögen die in den Nährstoffen gespeicherte Energie nur unzureichend in die mechanische Form überzuführen. Die Effizienz dieser Umsetzung wird mit dem Wirkungsgrad gemessen, welcher als Verhältnis zwischen der Leistung und dem Arbeitsumsatz definiert ist. Dafür werden Werte von zwischen 20 und 30 %, in Ausnahmefällen bis 35 %, angegeben ([111], [162], [163], [170], [175]).

2.42.3 Energieverbrauch beim Gehen

Beim Gehen wird die Energie weitgehend zum Heben und Senken des Körpers sowie zu dessen Beschleunigung und Verzögerung bei jedem Schritt aufgewendet. Da die Zahl dieser Vorgänge pro Streckenlänge für die üblichen Geschwindigkeiten ähnlich ist, hat letztere nur einen beschränkten Einfluss auf den Energieaufwand pro kg Körpergewicht zur Ueberwindung bestimmter Distanzen. Erkennbar ist aber der Einfluss der Schrittfrequenz. Je höher diese ist, desto grösser ist auch der Energieverbrauch, da der Körper sich zunehmend vom Eigenschwingungsbereich der Beine, welcher das Energieminimum bestimmt, entfernt [111]. Die Fussgänger wählen deshalb intuitiv jene Schrittfrequenz, welche dem Energieminimum entspricht [170]. Es handelt sich dabei gleichzeitig um jene Geschwindigkeit, welche für die Fussgänger am angenehmsten ist [80].

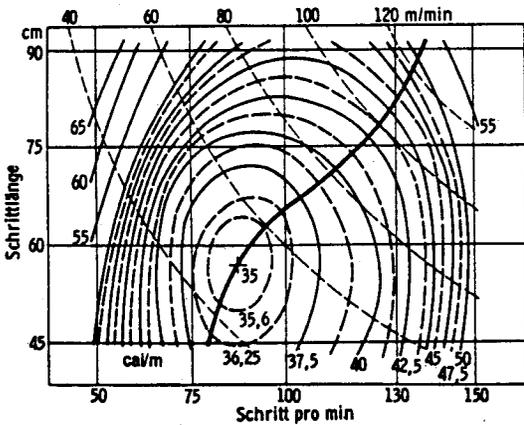


Abb. 17: Energieumsatz pro zurückgelegte Distanz in [cal/m] beim Gehen in der Ebene in Abhängigkeit von Schrittlänge und Schrittzahl (Abbildung: [149]).

Der Gesamtumsatz für einen bestimmten Weg zeigt zwei typische Energieminima für das Gehen und das Laufen bei etwa 1.39 m/s (5 km/h) beziehungsweise 3.89 m/s (14 km/h). Die absolute Grösse ist nahezu gleich, nämlich 274 kJ/km beziehungsweise 250 kJ/km. Das Energieminimum des Gehens ist ausgeprägter als jenes des Laufens, da die relative Bedeutung des Grundenergieumsatzes bei sehr tiefen Geschwindigkeiten rasch zunimmt und bei höheren Gehgeschwindigkeiten die Eigenschwingung des Beines bald verlassen wird. Eine vernachlässigbare Rolle spielt der Luftwiderstand, welcher selbst bei Geschwindigkeiten von 10 m/s nur gerade 3.5 % des gesamten Bewegungswiderstandes ausmacht.

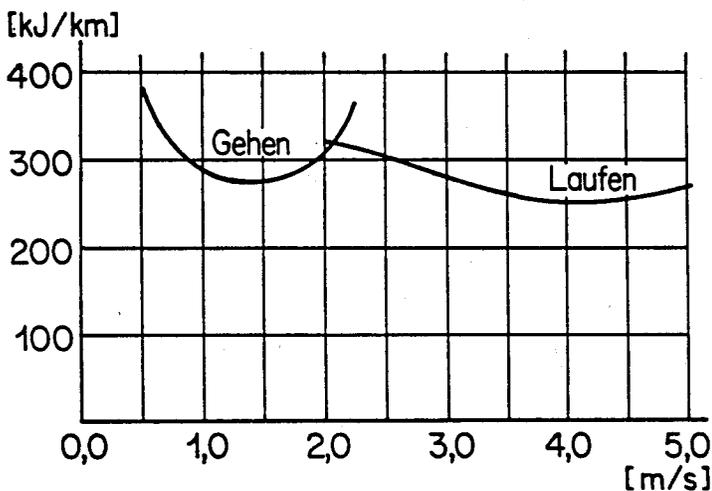


Abb. 18: Gesamtenergieverbrauch für eine Strecke von 1000 m Länge in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit (Abbildung: IVT).

Die erforderliche Leistung hängt ungefähr quadratisch mit der Geschwindigkeit zusammen. Bei tiefen Geschwindigkeiten ist das Gehen leistungsoptimal. Ueber etwa 1.4 m/s steigt die Leistung steil an und bei 1.9 bis 2.5 m/s wechselt der Mensch auf die Bewegungsart des Laufens. Dieser sogenannte Oekonomieschnittpunkt der Bewegungsarten

verschiebt sich bei trainierten Menschen gegen den höheren Geschwindigkeitsbereich. Im Uebergangsbereich sind die beiden Fortbewegungsarten leistungsmässig gleichwertig und der Fussgänger ist unschlüssig, welche von beiden er wählen soll. Darüber ist das Laufen dem Gehen überlegen. Bei einer Geschwindigkeit von etwa 3.8 m/s liegt beispielsweise der Sauerstoffbedarf eines Läufers unterhalb jenes eines Leistungsgehers. Bei der Laufbewegung tritt eine starke Leistungserhöhung erst über 4.2 m/s auf [16], [25], [80], [111], [149], [170].

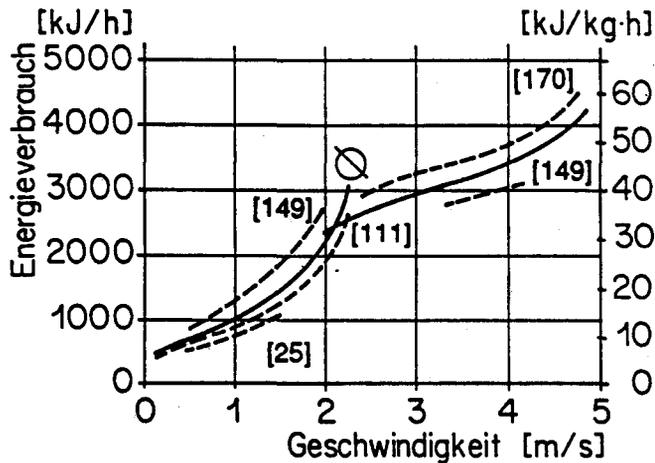


Abb. 19: Energieverbrauch beim Gehen und Laufen [16], [25], [111], [149], [170] (Abbildung: IVT).

Bei einer Belastung des Menschen mit Zusatzgewichten und bei einem schlechten Zustand der Wegoberfläche nimmt der Energieverbrauch zu:

Tab. 2: Energiemehrverbrauch durch Rückenlasten und verschiedene Zustände des Weges bei einer Geschwindigkeit von 1.1 m/s (4 km/h) sowie für verschiedenes Schuhwerk bei 1.3 m/s (4.8 km/h) [80], [149].

Situation	Mehrverbrauch
Gehen mit Rückenlast	
• 10 kg Last	+ 5 %
• 30 kg Last	+ 49 %
• 50 kg Last	+ 89 %
Gehen ohne Last	
• Landstrasse	+ 1 %
• Grasweg	+ 4 %
• Stoppelacker, Fichtennadelboden, Kartoffelfurche	+ 23 %
• leicht vereiste Strasse	+ 26 %
• geschälter Stoppelacker	+ 32 %
• schwerer, gepflügter und geeegter Acker	+ 75 %
• Weideland, 5 bis 10 cm Schnee	+ 194 %
verschiedenes Schuhwerk	
• Halbschuhe, 800 g	+ 22 %
• Schnürschuhe, 1300 g	+ 28 %
• Stiefel, 1800 g	+ 42 %

2.42.4 Energieverbrauch auf Rampen

Eine Steigung führt zur Erhöhung des Energiebedarfes, ein Gefälle zu dessen Senkung. Der Energieverbrauch reagiert dabei sehr empfindlich auf das Ausmass der Neigung. Bei zehn bis zwölf Prozent Steigung beispielsweise verdoppelt er sich nahezu gegenüber der Ebene. Bei einem Gefälle gleicher Grössenordnung halbiert er sich. Bei einem Gefälle von über 25 % liegt er wieder über dem Wert der ebenen Strecke.

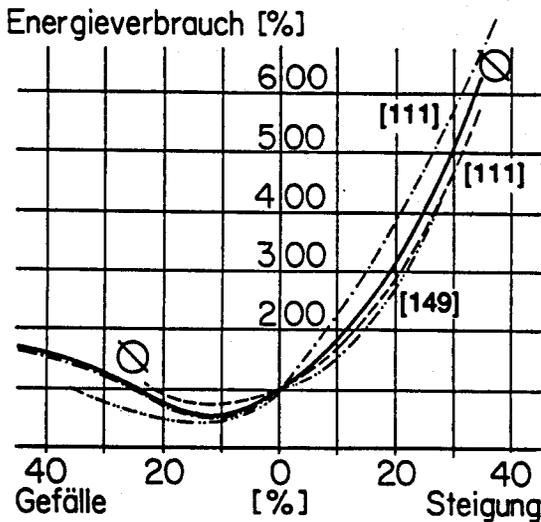


Abb. 20: Energieverbrauch beim Gehen auf geneigten Strecken, bezogen auf den Verbrauch in der Ebene. Die Steigungen über etwa 15 % sind der Anwendungsbereich der Treppen ([80], [111], [149]; Abbildung: IVT).

Setzt man der geleisteten mechanischen Arbeit den Energieaufwand gegenüber, so erhält man die Effizienz beziehungsweise den früher definierten Wirkungsgrad. Die mechanische Arbeit ist die Änderung der potentiellen Energie des Körpers infolge eines Standortwechsels. Die Effizienz ist demnach bei ebener Bahn gleich Null. Bei grösseren Steigungen nähert sie sich 25 % an, was ungefähr dem Muskelwirkungsgrad entspricht. Im Gefälle liegt sie bei -120 %, da zur Reduktion der potentiellen Energie des Körpers positive Arbeit geleistet werden muss.

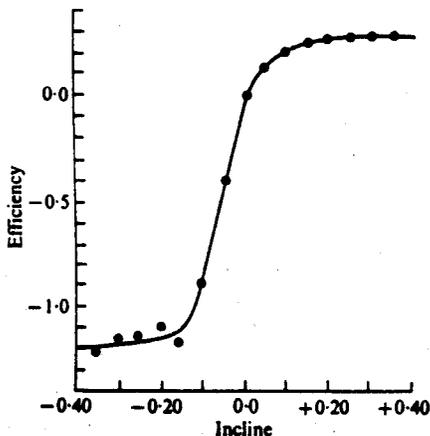


Abb. 21: Effizienz beim Gehen auf verschiedenen Neigungen (Abbildung: [111]).

2.42.5 Energieverbrauch beim Treppensteigen

Zum Energieverbrauch auf Treppen finden sich widersprüchliche Angaben, wobei es mangels Geschwindigkeitsangaben schwer fällt, die Ursache für diese Differenzen zu ermitteln. [158] spricht beispielsweise von einem um lediglich 30 % erhöhten Energieverbrauch, während [25] bei gleicher Horizontalgeschwindigkeit einen Mehrverbrauch beim Aufwärtsgehen von rund 690 % sowie einen Minderverbrauch von etwa 25 % beim Abwärtsgehen ausweist. Diese Angabe stimmt gut mit den Werten für das Gehen auf Rampen im grossen Steigungsbereich überein. [149] nennt einen Mehrverbrauch von 400 %, [85] gar einen solchen von 900 bis 1400 % beim Aufwärtsgehen und von 35 % beim Abwärtsgehen. Gemäss [80] verzehnfacht sich der Energieverbrauch des Treppensteigens bei einer Geschwindigkeit von etwa 0.6 m/s, während er sich beim Treppenabgehen bei derselben Geschwindigkeit mehr als verdoppelt. Die Arbeit von Döll und Lehmann (zitiert in [147] und [149]) liegt mit ihren Angaben für den Steigungsfall etwa im Mittel der verschiedenen Werte. Zu beachten ist bei der folgenden Darstellung aber, dass sie den Energieverbrauch nicht in Funktion der Geschwindigkeit, sondern für eine Hubarbeit von 1 mkg darstellt. Der Energieverbrauch für eine bestimmte Distanz muss demnach mit dem Körpergewicht und dem Steigungsverhältnis der Treppe errechnet werden.

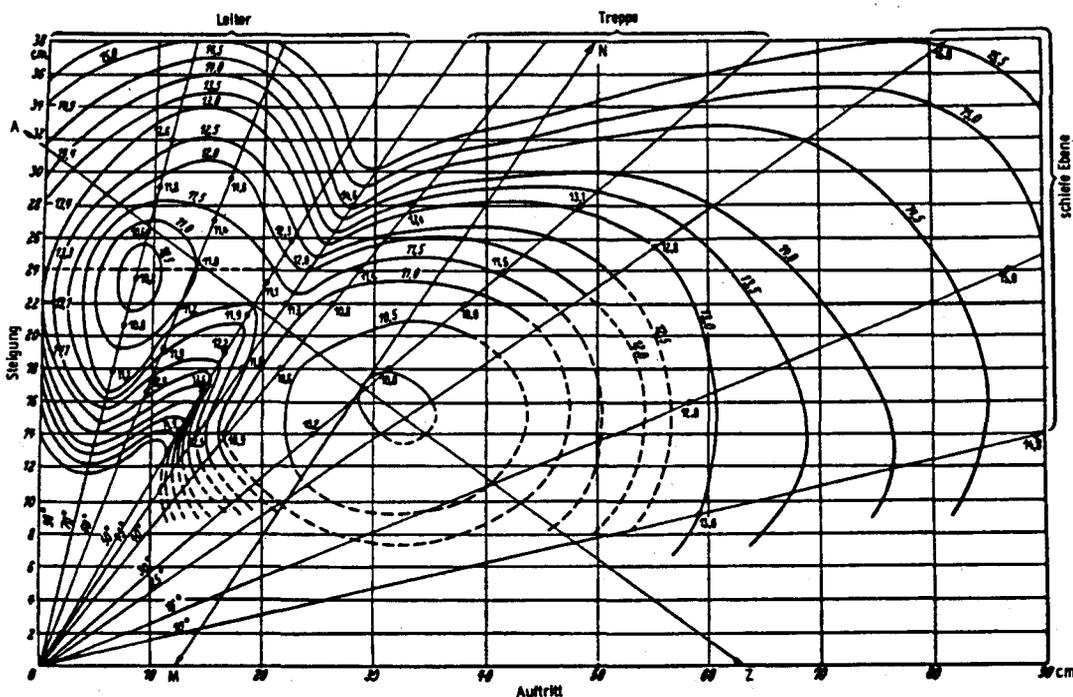


Abb. 22: Energieumsatz für eine Hubarbeit von 1 mkg für Rampe, Treppe und Leiter [cal/mkg]. Die Punkte gleichen Energieumsatzes sind mit einer Linie verbunden (Abbildung: [149]).

Leider gibt [149] keine Auskunft über den Energieverbrauch beim Abwärtsgehen. Analog zum Energieverbrauch auf Rampen ist für die üblichen Treppensteigungen mit einem ähnlichen Energieverbrauch wie in der Ebene zu rechnen.

Die Abbildung 22 zeigt weiter, dass der Energieaufwand zusätzlich eine Funktion der ergonomischen Gestaltung der Treppe ist. Am geringsten ist er danach bei einer Stufenhöhe von 16 cm, einer Stufentiefe von 31 cm und einer Steigung von 52 %, was eine horizontale Schrittlänge von 0.62 m und eine schräge Schrittlänge von 0.70 m ergibt. Für

diesen Fall errechnet sich bei einer Horizontalgeschwindigkeit von 1.0 km/h (0.28 m/s) ein Energiemehrverbrauch von 154 %, bei 2.0 km/h (0.56 m/s) ein solcher von 236 % und bei 2.5 km/h (0.69 m/s) ein solcher von 353 %.

Für die optimale Treppengestaltung finden sich weitere Bestimmungsüberlegungen. Dabei wird die Schrittlänge mit der Stufentiefe und der Stufenhöhe in Verbindung gebracht, woraus sich der konstante Wert in den folgenden Beziehungen ergibt. Scholz (zitiert in [47]) gibt an, dass sich das optimale Stufenmass bei einer Steigung von zwischen 40 und 80 % folgendermassen errechnet:

$$(2) \quad a_T + 1.6 \cdot h_T = 56$$

wobei a_T Stufentiefe einer festen Treppe [cm]
 h_T Stufenhöhe einer festen Treppe [cm]

Allgemein üblich ist nach [47] und [152] aber auch die folgende Beziehung, welche für $14 \text{ cm} < h_T < 17 \text{ cm}$ und $29 \text{ cm} < a_T < 34 \text{ cm}$ gilt:

$$(3) \quad a_T + 2 \cdot h_T = 63$$

Bei sehr grossen und sehr kleinen Steigungen sind eher die folgenden Formeln angebracht [147]:

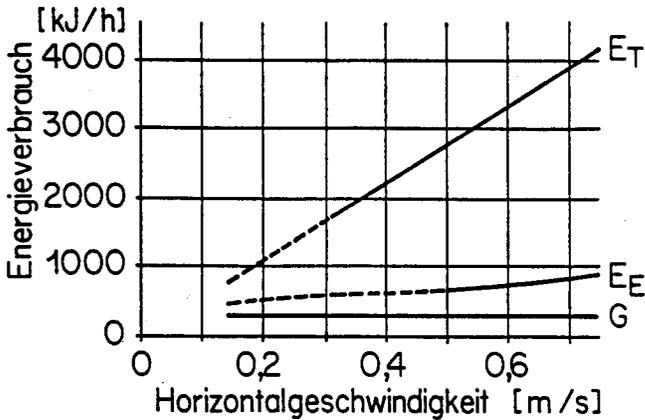
$$(4) \quad a_T + h_T = 47$$

$$(5) \quad a_T \cdot h_T = 480$$

Für alle Steigungen günstig ist schliesslich [147]:

$$(6) \quad 1.33 \cdot h_T + a_T = 52$$

Als weitere Bedingung für ein angenehmes Begehen einer Treppe soll nach [147] die Stufentiefe um 12 cm grösser sein als die Stufenhöhe. Kombiniert man (3) mit dieser zusätzlichen Bedingung, so verbleibt eine optimale Treppe mit einer Stufentiefe von 29 cm und einer Stufenhöhe von 17 cm sowie einer Steigung von 59 % [147]. Nach Scholz beträgt dagegen die energieoptimale Neigung bei Höhendifferenzen bis 5 m lediglich 43 %, dies bei einer Stufentiefe von ebenfalls 29 cm und einer Stufenhöhe von 12 cm [133]. Bei der konkreten Festlegung besteht somit ein gewisser Ermessensspielraum.



E_E Gesamtenergieverbrauch Ebene
 E_T Gesamtenergieverbrauch Treppe
 G Grundumsatz

Abb. 23: Energieverbrauch auf energieoptimaler Treppe und Vergleich mit Energieverbrauch in der Ebene (Abbildung: IVT).

2.43 Leistungsfähigkeit

2.43.1 Einfluss des Geschlechts

Die körperliche Leistungsfähigkeit eines Menschen ist seine Fähigkeit, mit den Muskeln Leistungen zu vollbringen, wobei ein einheitliches Mass zur Bestimmung nicht existiert und auf Indikatoren zurückgeriffen werden muss. Die Leistungsfähigkeit von Frauen ist deutlich kleiner als jene von Männern. Dies liegt unter anderem daran, dass der Anteil der Muskeln am Körpergewicht der Frau nur etwa 25 bis 35 % ausmacht, während dies bei Männern 40 bis 45 % sind [80]. Ihr Sauerstoff-Aufnahmevermögen ist um etwa 30 % tiefer als dasjenige von Männern und bezogen auf das Körpergewicht um 21 % [149], [170]. Die Muskelkraft liegt bei 50 bis 80 % (im Mittel etwa 67 %), die körperliche Leistungsfähigkeit (gemessen in [mkg/min]) bei 58 % [11], [43], [149].

Die Kraft der einzelnen für die Fortbewegung zuständigen Muskeln der Frau liegt bei 74 bis 94 % jener des Mannes und damit wesentlich höher als im Durchschnitt des ganzen Körpers, sodass ein kleinerer Rückstand bei der Gehgeschwindigkeit als bei den übrigen Leistungskennwerten zu erwarten ist [80]. Dies wird dadurch bestätigt, dass Frauen bei Schnellläufen rund 75 % der Geschwindigkeit der Männer erzielen. Im Spitzensport schliessen Frauen bis gegen 90 % der Leistung von Männern auf [118].

2.43.2 Einfluss des Alters

Das Maximum seiner körperlichen Leistungsfähigkeit erreicht der Mensch mit 18 bis 20 Jahren. Im Gegensatz zu anderen physiologischen Parametern wie Vitalkapazität der Lunge, Sauerstoff-Aufnahmevermögen oder Herzschlagvolumen bilden sich Muskelkraft und Muskelleistungsfähigkeit [mkg/min] bis zum 25. Altersjahr bereits spürbar zurück, um anschliessend während zwanzig Jahren nur unmerklich weiter abzusinken. Ein starker Abfall folgt über etwa 50 bis 60 Jahren. Im Alter von 80 Jahren wird der Stand des 10.

Lebensjahres erreicht oder sogar unterschritten. Besonders von der Rückentwicklung im Alter betroffen ist die für die Fortbewegung bedeutsame Bein- und Rumpfmuskulatur [11], [80].

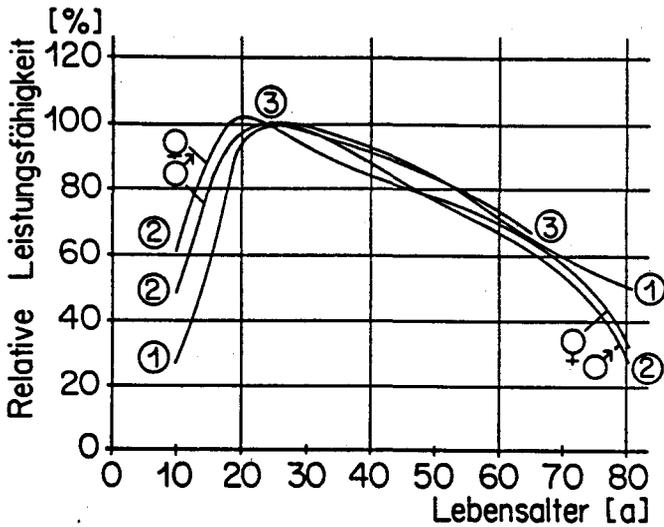


Abb. 24: Körperliche Leistungsfähigkeit in Funktion des Alters. 1 = Vitalkapazität der Lunge [170], 2 = Sauerstoff-Aufnahmevermögen [170], 3 = Maximales Herzschlagvolumen [11]. Die Vitalkapazität der Lunge spielt insofern eine Rolle, als dass bei einer Leistungssteigerung die Atemfrequenz konstant bleibt, während sich das Atemvolumen vergrössert und somit das Sauerstoff-Aufnahmevermögen allein vom erreichten Atemvolumen abhängt (Abbildung: IVT).

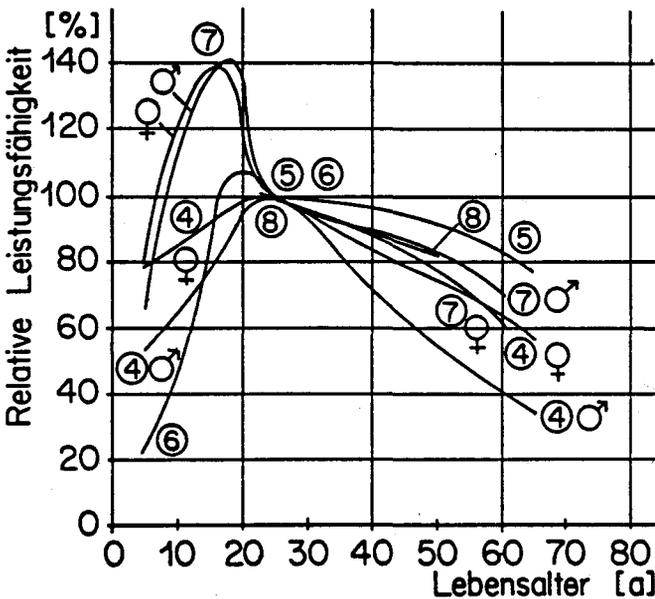


Abb. 25: Körperliche Leistungsfähigkeit in Funktion des Alters. 4 = Trainierbarkeit [170], 5 = Muskelkraft [11], 6 = Körperliche Leistungsfähigkeit [149], 7 = Laufgeschwindigkeit [43], 8 = Montageleistung von Arbeitern [149] (Abbildung: IVT).

2.43.3 Einfluss von Jahres- und Tageszeit

Die Leistungsbereitschaft des Menschen unterliegt im Tages-, Monats- und Jahresverlauf einer typischen Periodizität. Dem Tages- und namentlich bei Frauen dem Monatsrhythmus überlagert sich ein starker Jahresgang. Am leistungsfähigsten ist der Mensch zwischen April und Juni sowie zwischen Mitte August und Ende September, während sich insbesondere der Juli und die Zeit zwischen November und Februar ungünstig auf die Leistungsfähigkeit auswirken [138].

Die tägliche Periodizität der menschlichen Leistungsfähigkeit entsteht, indem der Körper jeweils grössere oder kleinere Anteile des theoretischen Leistungsvermögens freisetzt. Man unterscheidet dabei den Bereich der automatisierten Leistung, der physiologischen Leistungsbereitschaft, der Einsatzreserven und der autonom geschützten Reserven:

- Die automatisierten Leistungen liegen bei 40 % der gesamten Leistungsfähigkeit und sind praktisch konstant. Sie können vom Menschen ohne Willensanstrengung erbracht werden.
- Die Nutzung der physiologischen Leistungsbereitschaft erfordert eine mässige Willensanstrengung. Im Gegensatz zur automatisierten Leistung zeigt sie Leistungsmaxima am frühen Vormittag und früheren Abend sowie Leistungsminima am Nachmittag und in der Nacht.
- Die Einsatzreserven sind im Tagesverlauf nahezu konstant, erreichen aber am frühen Morgen ihr Maximum. Sie umfassen etwa 20 bis 30 % der totalen Leistungsfähigkeit und werden insbesondere bei sportlichen Höchstleistungen genutzt. Sie können willkürlich freigesetzt werden. Je höher der Nutzungsgrad der Einsatzreserven sein soll, desto höher ist die dazu erforderliche Willenskraft.
- Auf die autonom geschützten Reserven hat der Mensch keinen willentlichen Zugriff. Zu ihrer Nutzung ist eine Adrenalinausschüttung erforderlich, welche durch Emotionen oder Affekte ausgelöst werden kann. Der Einsatz von Dopingmitteln im Sport bezweckt diesen Zugriff über eine künstlich veranlasste Adrenalinausschüttung [64], [80], [149], [162], [170].

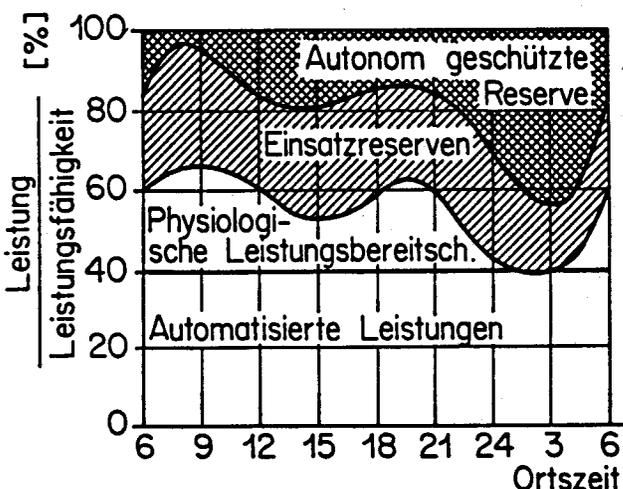


Abb. 26: Tagesperiodik der Leistungsbereitschaft (Abbildung: IVT nach Graf, Handbuch der gesamten Arbeitsmedizin).

Bei der vorstehenden Abbildung handelt es sich um Mittelwerte. Je nach Individuum kann sich der Grad der Ausprägung unterscheiden, wobei [80] rund 20 % Morgentypen, 30 % Abendtypen und 50 % indifferente Personen beobachtet hat. Beim Morgentyp ist das morgendliche Maximum, beim Abendtyp das abendliche Maximum stärker. Die theoretisch dargestellte Periodizität der Leistungsfähigkeit lässt sich durch experimentelle Befunde verdeutlichen. Im folgenden sind das Einschlafen von Autofahrern und die Fehler von schwedischen Gasarbeitern abgebildet:

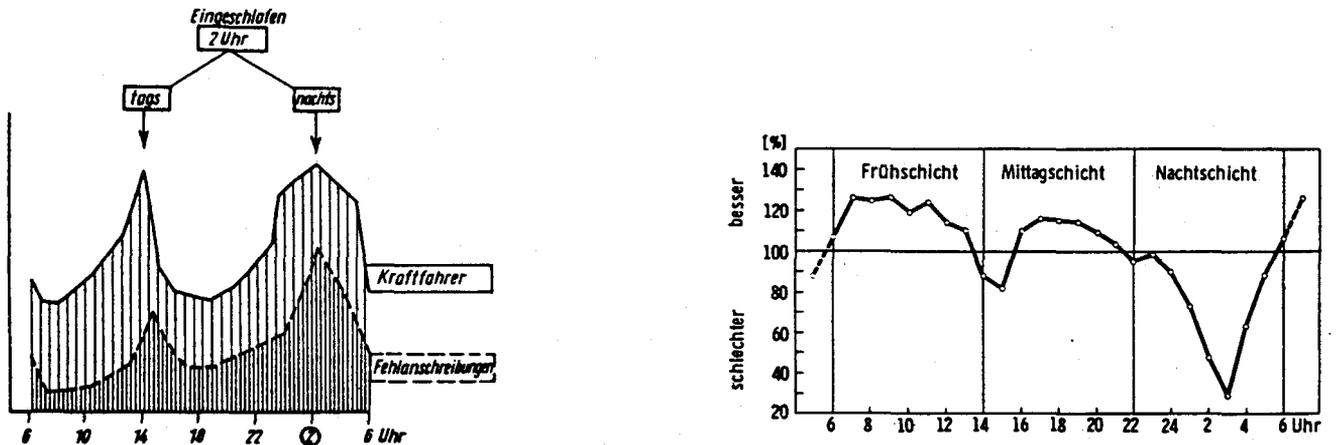


Abb. 27: Links: Uebereinstimmung der Zeitpunkte gehäuften Einschlafens bei Autofahrern (nach Prokop) mit gehäuften Fehlanscheinungen von Gasarbeitern, erhoben in den Jahren 1912 bis 1931 durch Bjerner et al. Die Spitzen der Fehlleistungen fallen mit den Minima der physiologischen Leistungsbereitschaft zusammen (Abbildung: [64]). Rechts: Tagesganglinie der Leistungsdisposition der Gasarbeiter aus der links bereits genannten Untersuchung (Abbildung: [149]).

Ein ähnliches Bild ergibt der Tagesverlauf der akustischen Reaktionszeiten und der Arbeitskapazität:

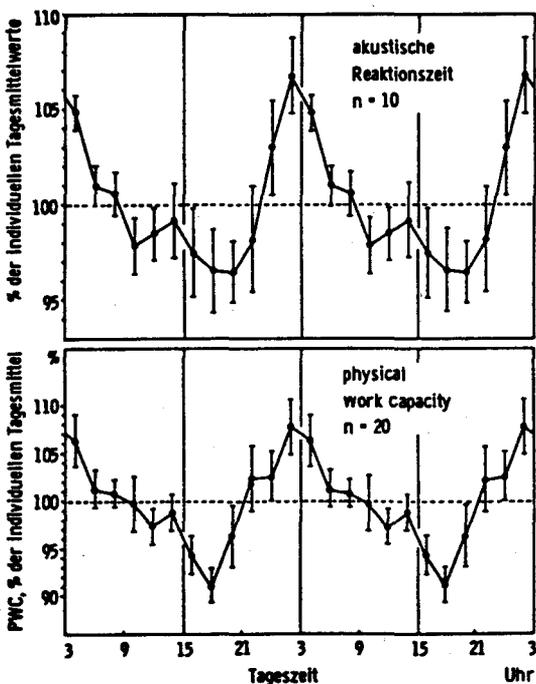


Abb. 28: Mittlerer tagesrhythmischer Verlauf der akustischen Reaktionszeiten (oben) und der ergonomisch bestimmten Arbeitskapazität für 170 Pulse/Minute (unten; Abbildung: [149] nach Voigt und Mitarbeitern).

Sowohl der jahreszeitliche wie auch insbesondere der tageszeitliche Rhythmus werden durch die klimatischen Verhältnisse mitbestimmt. Die Zeitpunkte der maximalen Leistungsfähigkeit werden in warmen Klimazonen zeitlich auseinandergezogen und in kalten Klimata zusammengerückt [138]. Der Tagesrhythmus wird durch Ernährung, Stoffwechselforgänge, Arbeitsbelastung und Lebensgewohnheiten gesteuert und reagiert sehr robust auf Abweichungen. Er wird von der Ortszeit bestimmt mit Synchronisierung über den Sonnenstand und erfasst das gesamte vegetative Nervensystem, was sich zum Beispiel in der Pulsfrequenz oder der Körpertemperatur äussert. Die Umstellung auf eine andere Ortszeit erfolgt träge, indem die Anpassung mit nur etwa zwei Stunden pro Tag vor sich geht [138]. Dies bedeutet beispielsweise, dass der Körper nach einem Flug auf die entgegengesetzte Seite der Erde erst eine bis zwei Wochen später seinen Rhythmus wiedergefunden hat [80].

2.43.4 Einfluss des Umgebungsklimas

Der menschliche Organismus muss seine Körpertemperatur in einem engen Regelbereich halten. Lediglich während kurzer Zeit vermag er Umgebungstemperaturen von zwischen -70 und +100 Grad C zu ertragen. Begrenzend wirkt die Kerntemperatur, welche nur um 4 Grad C schwanken darf. Dieser Körperkern produziert indes rund 70 % der gesamten Wärme des Körpers. Der Wärmeüberschuss muss durch das Blut an die Körperoberfläche transportiert werden, wo er an die Umgebung abgegeben wird [80]. Demzufolge sind es Klimafaktoren wie Lufttemperatur, Luftdruck, Luftfeuchtigkeit, Bewölkung, Wind und Strahlungsverhältnisse, welche die körperliche Leistungsfähigkeit massgeblich bestimmen und darüber entscheiden, wie der Körper seine Temperatur mittelfristig konstant halten kann [11], [138]. Die Wärmeflüsse einer unbedeckten und ruhenden Person sind bei einer Aussentemperatur von etwa 28 Grad C im Gleichgewicht, dies bei einer Hauttemperatur von 33 Grad C und einer Kerntemperatur von 37 Grad C [80]. Der Wärmetausch mit der Umgebung erfolgt über Konvektion, Wärmestrahlung und Schweissverdunstung [11], [138], [162], [163], [170], [175]:

$$(7) \quad D_{WS} = W_M \pm W_C \pm W_R - W_E$$

wobei	D_{WS}	Wärmemenge, die vom Körper aufgenommen oder abgegeben wird
	W_M	Wärmeproduktion des Organismus
	W_C	Wärmetausch durch Konvektion
	W_R	Wärmetausch durch Wärmestrahlung
	W_E	Wärmetausch durch Schweissverdunstung

- Konvektion: Solange die Umgebungstemperatur unter jener des Körpers liegt, wird Energie abgegeben. Liegt sie darüber, so nimmt der Körper Energie auf. Die Energiemenge, welche pro Zeit- und Flächeneinheit ausgetauscht wird, ist proportional zur Temperaturdifferenz [175]:

$$(8) \quad w_C = a \cdot (T_H - T_L)$$

wobei	w_C	Wärmestrom pro Flächeneinheit infolge Konvektion
	T_H	Hauttemperatur
	T_L	Temperatur der Luftgrenzschicht
	a	Wärmeübergangszahl der Konvektion

Die Ausdehnung der ruhenden Grenzschicht über der Haut und damit das Wärmeübertragungsvermögen wird durch die Windgeschwindigkeit wesentlich beeinflusst:

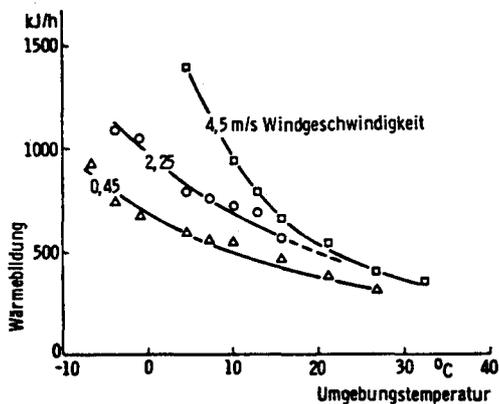


Abb. 29: Energieumsatz nach einstündigem Sitzen in unterschiedlicher Umgebungstemperatur (Abbildung: [149] nach Wenzel und Pierarski).

Wärmestrahlung: Zwischen dem Menschen und festen Körpern findet auch ohne direkte Berührung ein Energieausgleich über langwellige Strahlung statt. Der Wärmeübergang ist nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz proportional zur vierten Potenz der Oberflächentemperaturen [175]:

$$(9) \quad w_R = g \cdot (T_H^4 - T_W^4)$$

wobei

w_R	Wärmestrom pro Flächeneinheit infolge Strahlung
T_H	Hauttemperatur
T_W	Temperatur der strahlenden Fläche
g	Proportionalitätsfaktor der Wärmestrahlung, abhängig von den Emissions- und Absorptionseigenschaften der beteiligten Körper

Die Umgebungstemperatur spielt bei diesem Prozess keine Rolle, wohl aber die Hauttemperatur.

Schweissverdunstung: Eine hohe Luftfeuchtigkeit führt zur schlechten Verdunstung des Schweißes und damit zu einem kleinen Wärmetausch. Entscheidend ist die Differenz des Wasserdampfdruckes der Haut und der Luft [175]:

$$(10) \quad w_E = b \cdot (P_H - P_L)$$

wobei

w_E	Wärmeabgabe durch Verdunstung pro Flächeneinheit
P_H	Wasserdampfdruck der Haut
P_L	Wasserdampfdruck der Luft
b	Verdunstungszahl für Schweißverdunstung

Zur Übertragung von 250 kJ Wärme ist die Verdunstung von 100 ml Schweiß erforderlich. Die Wärmeabgabe durch Verdunstung ist solange effizient, als die Hauttemperatur über der Umgebungstemperatur liegt.

Unter dieser Voraussetzung ist selbst bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 100 % noch eine Verdunstung möglich. Da die Möglichkeit zur Schweissbildung bei Frauen weniger ausgeprägt ist als bei Männern, liegt die Obergrenze der Temperaturregulierung für Frauen tiefer und ist die Empfindlichkeit auf Hitze grösser als bei Männern [80].

Bei durchschnittlichen Verhältnissen (Umgebungstemperatur 20 bis 22 Grad C, relative Luftfeuchtigkeit 50 %, Windstille) werden rund 90 % der Wärme durch die Haut und 10 % durch die Atemwege abgegeben. Vom Hautanteil entfallen 45 % auf Strahlung, 25 % auf Konvektion und 20 % auf Verdunstung. Der Atemwegsanteil setzt sich aus 2 % Leitung und Ventilation sowie 8 % Wasserverdunstung zusammen [175]. Andere Quellen nennen einen Energieaustausch von 60 % durch Strahlung, 15 % durch Leitung oder Konvektion sowie 20 % durch Wasserverdunstung [162]. Gemeinsam ist beiden Angaben der hohe Anteil der langwelligen Strahlung. Die Wärmetauschkmöglichkeiten weisen ihre spezifischen Arbeitsbereiche auf. Ein Beispiel hierzu ist die Schweissbildung, welche die bei steigender Temperatur verkleinerte Wärmeabgabe durch Strahlung und Konvektion kompensiert [11], [149]:

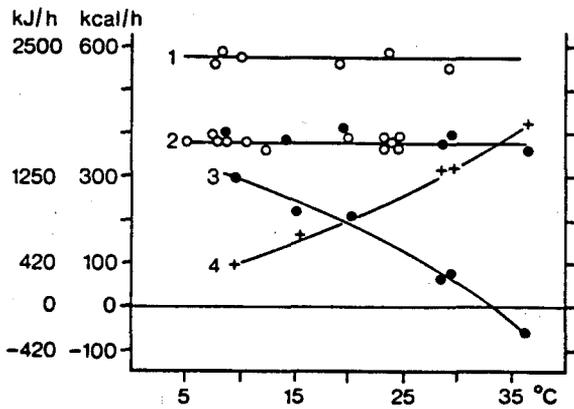


Abb. 30: Wärmeaustausch einer nackten Versuchsperson während der Arbeit (Leistung 150 Watt) in unterschiedlichen Raumtemperaturen. 1: Gesamter Energieumsatz. 2: Wärmeproduktion. 3: Wärmeabgabe durch Konvektion und Strahlung. 4: Wärmeabgabe durch Verdunstung. Die Verdunstung muss bei 36 Grad C zusätzlich die Wärmeaufnahme durch Konvektion und Strahlung kompensieren! (Abbildung: [11]).

Die Kerntemperatur des Körpers kann durch die beschriebenen Mechanismen trotz wechselnder Umgebungstemperatur zwischen der oberen und der unteren Grenze des Regelbereiches gehalten werden (Normothermie). Bei hoher Temperatur wird dazu die Wärmebildung durch Reduktion der Körperaktivitäten sukzessive bis auf den Grundumsatz abgesenkt. Diese Möglichkeit ist in ihrer Wirksamkeit beschränkt. Wird der Regelbereich von der Umgebungstemperatur überschritten, so lässt sich die äusserliche Wärmebelastung nicht mehr ausgleichen, die Kerntemperatur des Menschen steigt an und der Hitzetod droht (Hyperthermie). Weniger Schwierigkeiten verursacht eine zu tiefe Aussen-temperatur, da sie durch erhöhte Körperaktivität (Zittern, Schlottern) ausgeglichen werden kann und da die Wärmeabgabe der Haut mittels der Vasokonstriktion auf einen Sechstel gesenkt werden kann [80]. Einem übermässigen Energieverlust wirkt der Mensch ausserdem durch eine entsprechende Bekleidung entgegen. Die Kleidung schafft eine ruhende Grenzschicht der Luft über der Haut mit einer Temperatur von etwa 30 Grad C, welche die Wärme schlecht ableitet [163]. Die Isolationswirkung der Kleidung wird mittels der Einheit [clo] = $0.043 \text{ K}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}/\text{kJ}$ beschrieben (von engl. "clothing"), welche dem Isolationswert einer üblichen Strassenbekleidung entspricht [149].

<i>unbekleidet</i>	0	<i>leichter Straßenanzug</i>	
<i>Shorts</i>	0,1	kurze Unterwäsche, geschlossenes Oberhemd, leichte Jacke, lange Hose, Socken, Schuhe	1,0
<i>Tropenkleidung</i>		<i>leichter Straßenanzug mit leichtem Mantel</i>	1,5
offenes, kurzes Oberhemd, kurze Hose, leichte Socken, Sandalen	0,3–0,4	<i>fester Straßenanzug</i>	
<i>leichte Sommerkleidung</i>		lange Unterwäsche, geschlossenes Oberhemd, feste Jacke und Hose, Weste aus Tuch oder Wolle, Wollsocken, Schuhe	1,5
offenes, kurzes Oberhemd, lange leichte Hose, leichte Socken, Schuhe	0,5	<i>Kleidung für naßkaltes Wetter</i>	
<i>leichte Arbeitskleidung</i>		lange Unterwäsche, geschlossenes langes Oberhemd, feste Jacke und Hose, Pullover, Wollmantel, Wollsocken, feste Schuhe	1,5–2,0
kurze Unterhose, offenes Arbeitshemd oder leichte Jacke, Arbeits-hose, Wollsocken, Schuhe	0,6	<i>Polarkleidung</i>	ab 3,0
<i>leichte Außensportkleidung</i>			
kurzes Unterzeug, Trainingsjacke, -hose, Socken, Turnschuhe	0,9		
<i> feste Arbeitskleidung</i>			
lange Unterwäsche, einteiliger Arbeitsanzug, Socken, feste Schuhe	1,0		

Abb. 31: Beispiele für den thermischen Widerstand gebräuchlicher Bekleidungen (Abbildung: [149] nach Fanger und Frank).

Genügt auch dies nicht und gerät der Mensch unter den Regelbereich, so erleidet er den Kältetod (Hypothermie) [175].

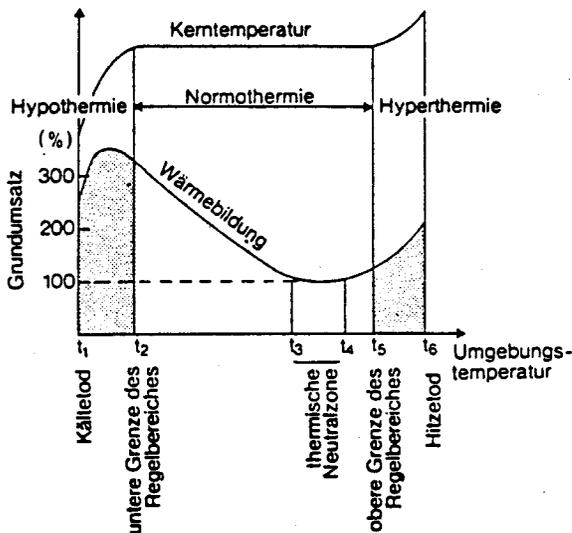


Abb. 32: Körpertemperatur und Wärmebildung des Menschen in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur (Abbildung: [175] nach Hensel, Brück, Rath).

Von einer zu hohen Aussentemperatur ist insbesondere die Ausdauer betroffen, während die Koordination, die Flexibilität, die Kraft und die Schnelligkeit weniger beeinträchtigt werden [80]. Eine Umgebungstemperatur von 20 Grad C wird unter normalen Bedingungen als metabolisch indifferent betrachtet, da hier der Sauerstoffverbrauch nicht von

gungen als metabolisch indifferent betrachtet, da hier der Sauerstoffverbrauch nicht von ihr abhängt. Die genannte Temperatur gilt daher im Durchschnitt als Behaglichkeitstemperatur [163]. Auf die Temperatur reagieren aber nicht alle Menschen gleich. Die folgende Darstellung besagt beispielsweise, dass 25 Grad von gleich vielen Personen (je etwa 20 %) als zu warm beziehungsweise zu kalt empfunden werden und dass gleichzeitig höchstens etwa 60 % der Versuchspersonen eine bestimmte Temperatur als behaglich beurteilen [149].

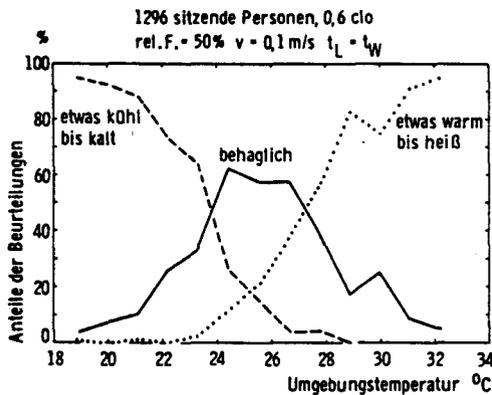


Abb. 33: Individuelle Unterschiede in der Beurteilung verschiedener Umgebungstemperaturen (Abbildung: [149] nach Fanger: Arbeitsmedizin).

Im vorliegenden Zusammenhang muss das Aussenklima mit Konvektion, Strahlung und Verdunstung als gegeben betrachtet werden, sodass der Mensch durch eine Anpassung seiner körperlichen Leistung und durch die Bekleidung die Temperatur innerhalb des Regelbereiches halten muss. Mit zunehmender Aussentemperatur sinkt daher die Leistungsfähigkeit [170]:

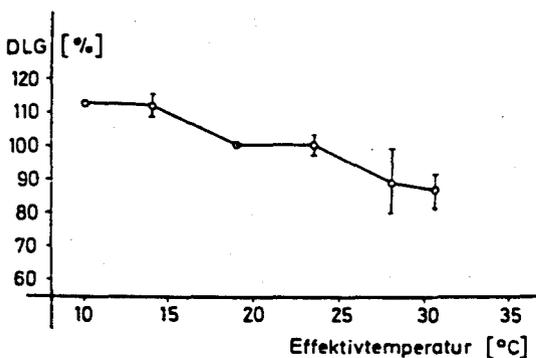


Abb. 34: Abnahme der Dauerleistungsgrenze mehrerer Versuchspersonen in Abhängigkeit von der Effektivtemperatur (Abbildung: [170]).

2.43.5 Einfluss der Höhenlage

Wesentliche Einflüsse der Höhenlage über Meeresspiegel bestehen in der unterschiedlichen Strahlungsintensität sowie in geringerer Luftdichte und tieferem Wasserdampf- und Sauerstoffpartialdruck [80], [138].

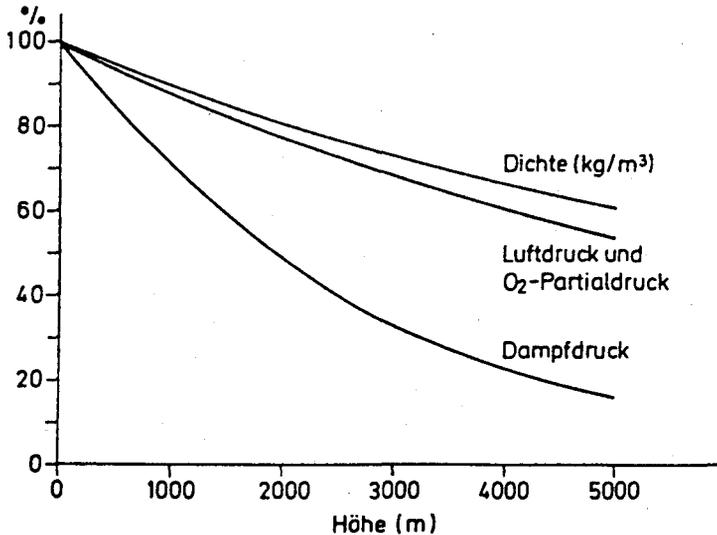


Abb. 35: Veränderung von Luftdichte, Sauerstoff-Partialdruck und Dampfdruck bei verschiedener Höhe über Meeresspiegel [80].

Die Dauerleistung nimmt bereits bei 1000 m.ü.M. spürbar ab, während die Muskelkraft bis etwa 3000 m.ü.M. nicht geschmälert wird und sich erst bei 4000 m.ü.M. allmählich verkleinert. Verursacht wird die Leistungseinbusse durch die Reduzierung der Sauerstoffaufnahme mittels äusserer Atmung. Deutlich wurde dies bei der Sommerolympiade 1968 in Mexiko: Während bei den Laufdisziplinen bis zu einer Distanz von 800 m bessere Werte als im Tiefland erzielt wurden, konnten die Zeiten bei den längeren Distanzen nicht egalisiert werden. Am ausgeprägtesten war der Zeitmehrbedarf gegenüber dem damaligen Weltrekord mit 6.24 % beim Marathonlauf [80]. Dauert der Aufenthalt in einer anderen als der gewohnten Höhenlage nur etwa ein bis zwei Tage, so kann die übliche Leistung ohne Akklimatisierung erbracht werden. Wenn die der Höhenlage entsprechende Dauerleistung erreicht werden soll, ist eine Akklimatisationszeit von zwei Wochen pro 1000 m Höhendifferenz erforderlich.

Ausser im Spitzensport ist der geringere Luftwiderstand bei grösserer Meereshöhe praktisch nicht spürbar. Hingegen sinkt die Atmungsarbeit zur Ueberwindung des Strömungswiderstandes in der Lunge durch die geringere Luftdichte. Der geringere Wasserdampfdruck in der Luft wirkt sich leistungsmässig negativ aus, indem die Flüssigkeitsabgabe durch die dadurch hervorgerufene stärkere Verdunstung ansteigt. Bei längerem Aufenthalt in grosser Höhe verkleinert sich die maximale Herzschlagzahl. Der tiefere Sauerstoffpartialdruck kann durch Hyperventilation nicht voll wettgemacht werden. Deshalb vergrössert sich die Hämoglobinkonzentration im Blut, damit dem Körper eine ähnliche Menge Sauerstoff angeboten wird wie auf Meereshöhe. Da das Blut dadurch zähflüssiger wird, steigt jedoch die Beanspruchung des Herzens bis in den leistungsbegrenzenden Bereich. Trotz Akklimatisation verbleibt dadurch ein Rückstand bei der Dauerleistungsfähigkeit von etwa 6 % [80], [138].

2.5 Behinderungen

2.51 Definition der Behinderungen

Durch Behinderungen kann der Mensch in seinen Bewegungsmöglichkeiten eingeschränkt werden. Ein Mensch gilt bezüglich seiner Bewegungsmöglichkeiten im Verkehr als behindert, wenn eine oder mehrere der dabei erforderlichen Fähigkeiten reduziert ist. Die Behinderten im engeren Sinn lassen sich somit in folgende vier Gruppen einteilen [31], [129], [166]:

- Körperbehinderte
- Sehbehinderte
- Hörbehinderte
- Geistig Behinderte

Die Gruppe der Körperbehinderten wird in der Norm SN 521 500 weiter gegliedert [166]:

- Gehbehinderte: Sie können nur mühsam gehen beziehungsweise sind auf Gehhilfen angewiesen. Sie können zu Fuss keine grossen Strecken zurücklegen und Niveauunterschiede nur mit Schwierigkeiten überwinden.
- Rollstuhlfahrer: Sie können sich nur mit einem Rollstuhl fortbewegen.
- Arm- beziehungsweise Handbehinderte: Sie können ihre Arme beziehungsweise ihre Hände nur mühsam oder gar nicht gebrauchen.

Schwierigkeiten bei der Benützung von Verkehrsanlagen haben nicht nur Behinderte im engeren Sinn, sondern auch ältere Menschen, werdende Mütter, Erwachsene mit Kinderwagen, Personen mit sperrigem Gepäck, Reisende mit Gepäckkarren oder Einkaufswagen sowie im weitesten Sinne auch Kinder und Ortsunkundige. Man fasst sämtliche Personen mit Benützungsschwierigkeiten von Verkehrsanlagen unter dem Begriff der Verkehrsbehinderten zusammen, der allerdings uneinheitlich definiert ist [61], [98], [165], [183].

Ein Fragezeichen ist hinter die Tendenz zu setzen, dass immer grössere Gruppen von Personen als behindert bezeichnet werden. Eine präzisere begriffliche Unterscheidung zwischen Personen mit körperlichen Gebrechen einerseits und Personen mit eingeschränkter Beweglichkeit andererseits wäre angezeigt. Als behindert im engeren Sinne sollte nur gelten, wer nicht die seinem Alter entsprechenden körperlichen Fähigkeiten aufweist. Damit werden die natürlichen Leistungseinbussen durch das Alter oder die Belastung mit Gepäck von der Klassierung als Behinderung ausgeschlossen.

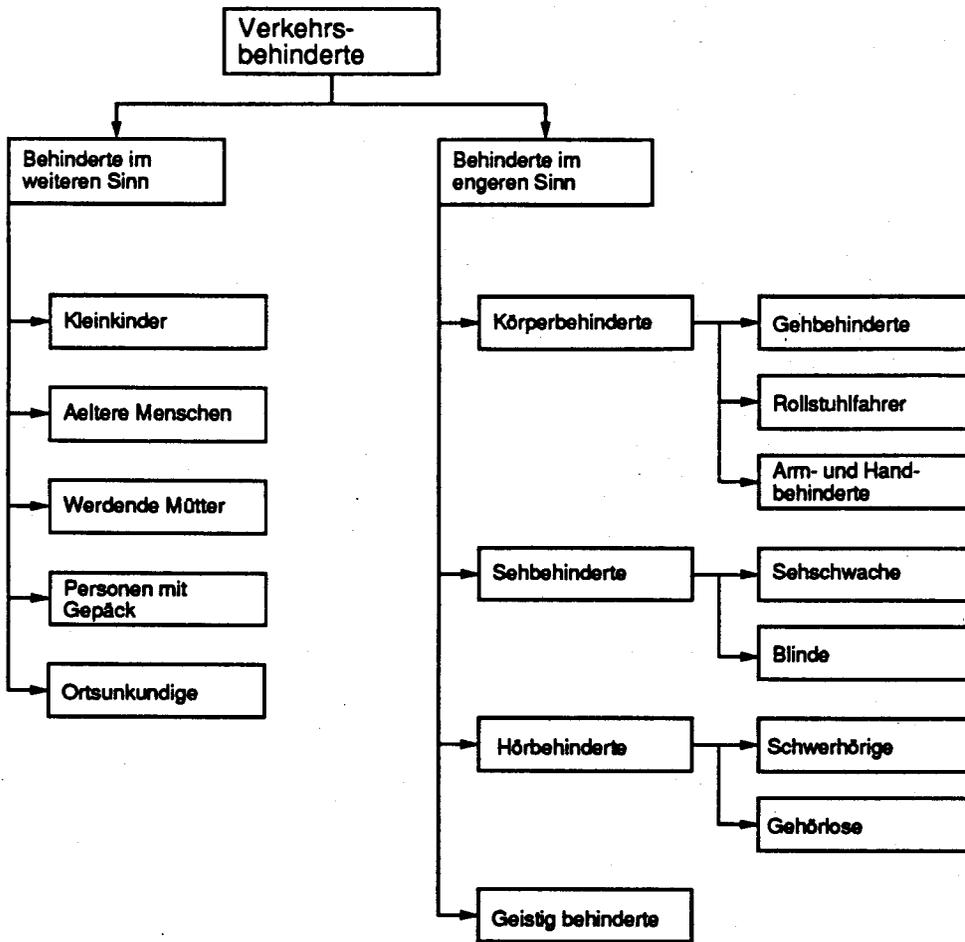


Abb. 36: Einteilung der verkehrsbehinderten Personen (Abbildung: IVT nach [31], [129], [166]).

2.52 Behindertenanteile

2.52.1 Gegenwärtige Situation

Die Angaben in der Literatur zu den Behindertenanteilen schwanken stark, was weitgehend auf eine unterschiedliche Abgrenzung zurückzuführen ist. Die Beweglichkeit von 25 bis 30 % der Bevölkerung ist im weitesten Sinn eingeschränkt [31]. Für die Behinderungen im engen Sinne in der BRD erwähnt [183] einen Anteil von 7.77 % Bewegungs-, Seh- und Hörbehinderten, was praktisch mit der Angabe von [129] für die Schweiz übereinstimmt. [98] nennt für vier Länder die folgenden Anteile von Körperbehinderten und Rollstuhlfahrern:

Tab. 3: Anteile der Körperbehinderten und Rollstuhlfahrer an der Bevölkerung [98].

Land	Körperbehinderte total	davon Rollstuhlfahrer
USA	6.5 %	0.21 %
Schweden	12.5 %	0.25 %
Frankreich	5.4 %	0.23 %
BRD	10.2 %	0.48 %

Für die Aufteilung auf die verschiedenen Behinderungsarten hat [165] folgende Anteile ermittelt (gilt für die Schweiz; Kumulation von Behinderungen möglich):

•	Körperbehinderte	
	- Rollstuhlfahrer	0.46 %
	- Para- und Tetraplegiker	0.12 %
	- Cerebralgelähmte	0.11 %
	- Multiple Sklerose	0.15 %
	- Rheumakranke	1.83 %
•	Sehbehinderte	
	- Vollblinde	0.12 %
	- in der Lebensführung erheblich eingeschränkt	0.20 %
	- stark sehbehindert	0.99 %
•	Hörgeschädigte	7.61 %
•	geistig Behinderte	2.74 %

Rund 5 % der bundesdeutschen Bevölkerung gehören zu den Gehbehinderten mit entsprechendem Ausweis. Schwer Gehbehinderte, welche beim klassischen öffentlichen Verkehr einen Sondertransportdienst erfordern, machen etwa 2 % der Bevölkerung aus [18], [164], [169]. Etwa 0.8 % der Bevölkerung sind gänzlich von der Verkehrsteilnahme ausgeschlossen [129]. Die Zahl der Rollstuhlfahrer schliesslich liegt bei 0.3 bis 0.5 % der Bevölkerung [98], [188]. Die Zahlen machen deutlich, dass die behinderten Menschen einen beachtlichen Anteil der Bevölkerung ausmachen und dass die Problemstellung der Körperbehinderung nicht ausschliesslich mit Blick auf die Rollstuhlfahrer behandelt werden kann.

Die Grenze zwischen den als unbehindert oder behindert geltenden Menschen ist ohnehin fließend. So hängt der Bevölkerungsanteil, welcher eine bestimmte Anlage zu benützen vermag, auch von der Gestaltung der Anlage selbst ab. Für die Fähigkeit, einen Fahrzeugeinstieg zu benützen, hat [106] beispielsweise beobachtet, dass alle älteren Fahrgäste in der Lage sind, einen Stufeneinstieg von 150 mm Höhendifferenz mit Griffstangen zu überwinden. Bei einer Höhendifferenz von 300 mm sind es bereits nur noch 80 Prozent. Fehlen die Griffstangen, so sinken diese Anteile auf 70 beziehungsweise 30 Prozent.

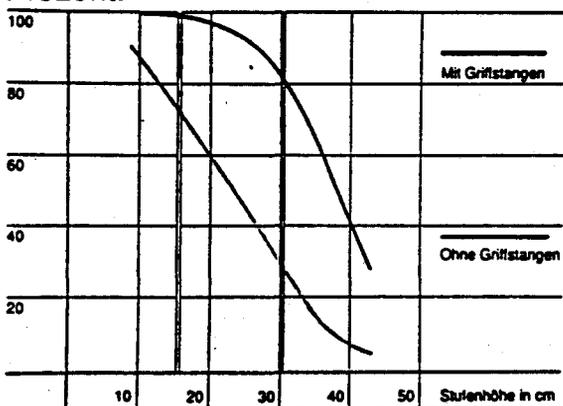


Abb. 37: Prozentsatz der älteren Personen, welche verschiedene Stufen mit beziehungsweise ohne Griffstangen bewältigen können [106].

Der Grad der Behinderungen wächst mit steigendem Alter. Dazu erwähnt [18] eine Zählung aus Belgien, wonach bei den über 65-jährigen Menschen mit folgenden Behinderungsanteilen zu rechnen ist:

- bettlägrig 2.0 %
- unfähig, das Haus zu verlassen 15.0 %
- Schwierigkeiten beim Verlassen des Hauses 15.4 %
- keine Schwierigkeiten beim Verlassen des Hauses 67.6 %

Dies bedeutet beispielsweise, dass eine Person im höheren Alter bei der Benützung bestimmter Anlagen mit Schwierigkeiten kämpft, welche sie zuvor nicht hatte. Mit anderen Worten sind diese Anlagen für sie plötzlich nicht mehr benützbar. Der Anteil der behinderten Personen steigt mit dem Alter exponentiell an. Zwischen dem fünfzigsten und dem achtzigsten Altersjahr verzehnfacht sich beispielsweise der Anteil der Menschen, welche keine Treppen mehr zu bewältigen vermögen [82].

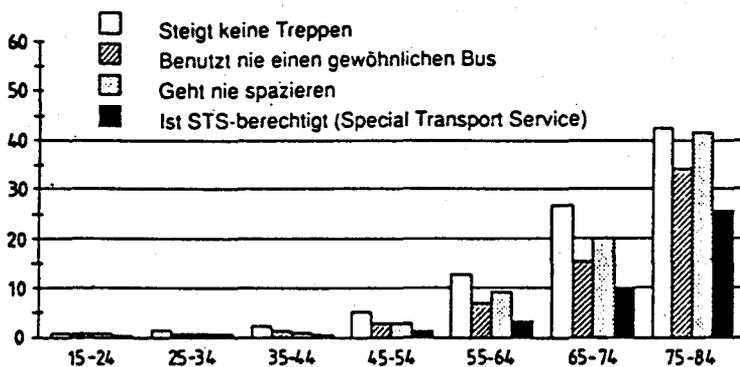


Abb. 38: Mobilitätsbehinderungen bei verschiedenen Alterskategorien [82].

2.52.2 Künftige Entwicklung

Die Angaben zur künftigen Entwicklung sind uneinheitlich. Der Anteil der Kriegsversehrten in den vom Zweiten Weltkrieg heimgesuchten Nationen sowie die Zahl der bei Arbeitsunfällen verletzten Personen vermindert sich allmählich [183]. Hingegen wird der Anteil der durch Verkehrsunfälle Behinderten, die Zahl der Menschen mit Erkrankungen durch sitzende Tätigkeit und der Anteil der behinderten Menschen im hohen Alter steigen [98].

Beobachtungen zeigen zudem, dass Behinderte den öffentlichen Verkehr überdurchschnittlich häufig benützen und dass Fahrtenhäufigkeit und Zeitaufwand der mobilen Schwerstbehinderten identisch ist mit jener von Nichtbehinderten [90], [196]. Es ist daher insgesamt mit einem höheren Anteil behinderter Menschen bei starkem Wachstum des Anteils mobilitätsbehinderter Senioren, namentlich im öffentlichen Verkehr, zu rechnen.

2.53 Bewegungsmöglichkeit und besondere Anforderungen

2.53.1 Bewegungsmöglichkeiten von Behinderten

Die Fortbewegungsgeschwindigkeit von Personen im Rollstuhl beträgt in der Ebene etwa 0.5 m/s [152]. Gehbehinderte Personen vermögen über Distanzen bis 3 m eine Neigung von bis zu 11 % zu überwinden. Bei längeren Rampen soll die Neigung aber höch-

stens 8 % betragen [129]. Rollstuhlfahrer vermögen aus eigener Kraft eine Steigung von etwa 5 % zu überwinden, weshalb Rampen, welche von Rollstühlen benützt werden sollen, diesen Wert nicht überschreiten dürfen. Grössere Neigungen sind nur auf sehr kurzen Rampen zulässig [152]:

- bis zu einer Länge von 0.5 m 16 %
- bei Längen von zwischen 0.5 und 2.0 m 12 %
- bei Längen von zwischen 2.0 und 6.0 m 8 %

Kann mit Hilfspersonen gerechnet werden, so sind über längere Strecken bis maximal 12 % Längsneigung möglich [129], [166]. Von besonderer Bedeutung für die Anlagengestaltung ist die Grösse von Hindernissen. Nach [31] und [197] können Rollstuhlfahrer eine Höhendifferenz oder Spaltbreite von 50 mm ohne fremde Hilfe bewältigen. Eine engere diesbezügliche Grenze setzt [166] mit lediglich 30 mm, wobei darauf hingewiesen wird, dass dies gleichzeitig das Minimalmass darstellt, bei welchem Blinde einen Absatz zu erkennen vermögen. Bis zu einer Höhendifferenz von 100 mm gelingt dies aber mit Unterstützung durch eine Drittperson [31]. Auf ähnliche Werte kommen [129] und [166]. Die Beobachtung, wonach guttrainierte Rollstuhlfahrer eine Höhendifferenz von 80 bis 100 mm ohne Hilfe überwinden können, darf dagegen nicht massgebend sein, da dies die meisten Rollstuhlfahrer ausschliessen würde [62].

2.53.2 Besondere Anforderungen von Behinderten

Nebst ihrer gegenüber unbehinderten Menschen reduzierten Bewegungsmöglichkeit unterscheiden sich Behinderte auch in ihrem Platzbedarf. Gehbehinderte an einem Stock benötigen eine Spurbreite von etwa 0.70 m, Gehbehinderte an zwei Stöcken eine solche von 0.90 m. Sehbehinderte brauchen eine Gehwegbreite von mindestens 0.80 m, damit sie mit dem Langstock in einer Pendelbewegung den Gehweg abtasten können [129]. Ebenfalls etwa 0.70 m beträgt die Spurbreite eines Rollstuhles, bei einer Länge von etwa 1.20 bis 1.25 m. Die minimale Durchfahrtsbreite beläuft sich auf etwa 0.80 m. Für eine Drehung des Rollstuhles um 90 Grad steigt der Platzbedarf auf ein Quadrat von 1.40 m Kantenlänge, während für eine Drehung um 180 Grad eine Spurbreite von 1.40 m und eine freie Länge von 1.70 m erforderlich ist [166].

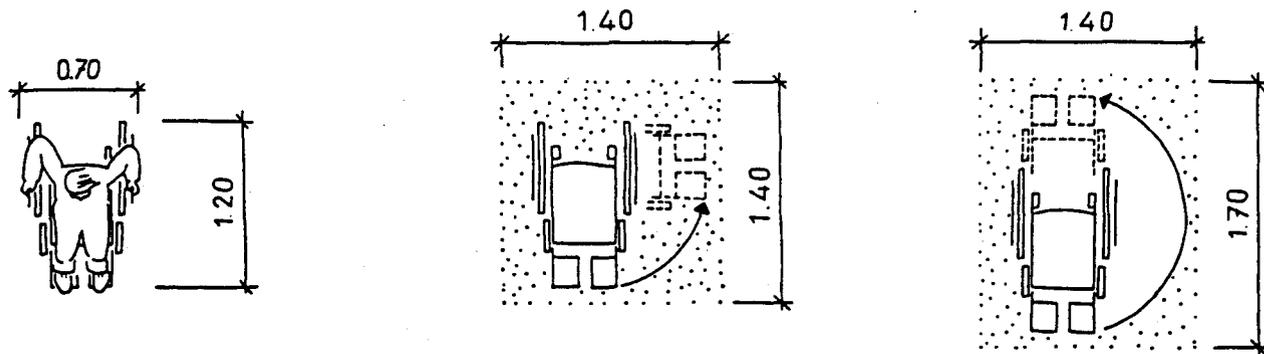


Abb. 39: Platzbedarf von Rollstuhlfahrern [166].

3. Geschwindigkeitsverhalten der Fussgänger

3.1 Mittelwert

In der untersuchten Literatur fanden sich 52 Angaben zur Durchschnittsgeschwindigkeit des Menschen, welche stark streuen. Der Durchschnitt liegt bei 1.34 m/s (4.83 km/h) bei einer Spannweite von 0.97 bis 1.65 m/s und stimmt mit Abschnitt 2.41 (optimale Schrittlänge und -frequenz) und 2.42.3 (Energieminimum) praktisch überein. Die Extremwerte lassen sich nicht plausibel begründen und müssen auf besondere Umstände zurückgeführt werden. Die überwiegende Zahl der Angaben (28) bewegt sich zwischen 1.25 und 1.45 m/s. Der Sonderfall der Strassenüberquerung zeigte bei 17 Angaben im Mittel eine leicht tiefere Durchschnittsgeschwindigkeit von 1.28 m/s (4.60 km/h). Auch hier streuen die Extremwerte stark zwischen 0.90 m/s und 1.69 m/s. Die Geschwindigkeitsmittelwerte entstehen als Überlagerung sämtlicher Einflussfaktoren. Je nach Situation kann demnach die Geschwindigkeit eines Fussgängers oder einer Fussgängergruppe höher oder tiefer liegen. Die Grössenordnung dieser Abweichung wird im folgenden Abschnitt diskutiert.

Bei der früher erwähnten Schrittlänge von 0.63 m [147] ergibt das Geschwindigkeitsmittel eine Schrittfrequenz von 2.13 Hz. Gemäss [111] müsste dagegen die Schrittlänge bei dieser Geschwindigkeit etwa 0.70 m und die Schrittfrequenz 1.91 Hz betragen. Als Richtwert kann daher mit 2.05 Hz und einer Schrittlänge von 0.65 m gerechnet werden.

3.2 Abhängigkeit von verschiedenen Einflüssen

3.2.1 Überblick

Das Geschwindigkeitsverhalten der Fussgänger wird bestimmt durch die Eigenschaften der Fussgänger selbst, durch die Begleitumstände der jeweiligen Bewegung und durch die Charakteristiken der benützten Anlagen:

Tab. 4: Einflüsse auf die Fussgängergeschwindigkeit.

Eigenschaften des Fussgängers	Begleitumstände der Bewegung	Charakteristiken der Anlage
Geschlecht Alter Grösse Gesundheitszustand Erholungsgrad Charakter, Temperament Stimmungslage Zeitdruck Belastung durch Gepäck Behinderungen	Verkehrszweck Jahres- und Tageszeit Witterung, Klima Höhenlage über Meer Länge des Weges	Steigung von Rampen Steigung und Schrittmasse von Treppen Zustand der Oberfläche Attraktivität der Umgebung Strassenbelastung bei Fahrbahn- überquerungen

Hinzu kommt eine starke Abhängigkeit von der Fussgängerverkehrsdichte. Ein Teil dieser Einflüsse ist leicht beobachtbar und entsprechend gut dokumentiert (Geschlecht, Alter, Rampen, Treppen, Fussgängerdichte). Ein anderer, beträchtlicher Teil indessen ist nur schwer oder gar nicht zu erfassen.

3.22 Eigenschaften der Fussgänger

3.22.1 Geschlecht

Aus 43 Angaben lässt sich ermitteln, dass die Gehgeschwindigkeit von Männern im Mittel um 10.9 % höher liegt als jene von Frauen. Die höchste Angabe liegt bei 28.6 %, die tiefste bei 0.0 %. Rund die Hälfte der Angaben bewegt sich zwischen +7.5 % und +12.5 %. Dies ergibt für Männer eine mittlere Geschwindigkeit von 1.41 m/s und für Frauen eine solche von 1.27 m/s. Die entsprechenden Werte für die Strassenüberquerung betragen 1.35 m/s für Männer und 1.21 m/s für Frauen. Der empirisch gefundene Unterschied stimmt gut mit den Differenzen in der Körpergrösse und der körperlichen Leistungsfähigkeit überein.

3.22.2 Alter

Ueber die Geschwindigkeitsabhängigkeit in Funktion des Alters äussern sich zwanzig Autoren in unterschiedlicher Detaillierung. Nur ein Autor [64] stellt eine vollständige Kurve des Geschwindigkeitsverlaufes dar, während sich bei den übrigen Autoren nur Einzelangaben finden.

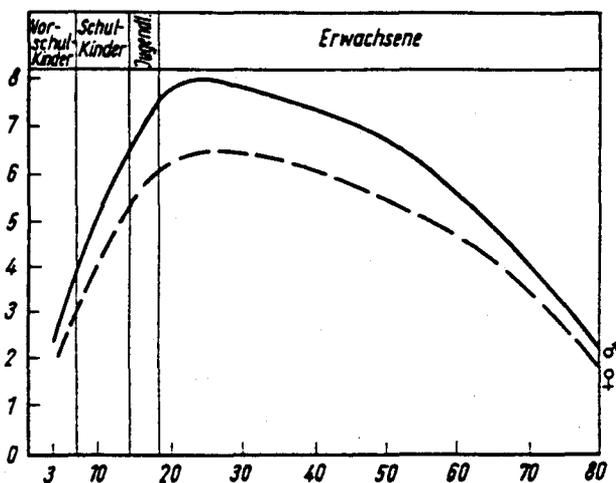


Abb. 40: Mittlere Gehgeschwindigkeit im Strassenverkehr von gesunden Menschen in Abhängigkeit vom Lebensalter. Das absolute Geschwindigkeitsniveau ist deutlich zu hoch (Abbildung: [64]).

Zur Ermittlung einer Geschwindigkeitskurve wurden sämtliche Angaben zuerst auf eine Referenzgeschwindigkeit bezogen (Geschwindigkeit im Alter von 40 Jahren, da dazu praktisch alle Autoren eine Angabe machen). Diese Kurve musste mit der Bevölkerungspyramide normiert werden, damit das gewichtete Mittel aller Jahrgänge eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 1.34 m/s ergab. Als Altersverteilung wurde jene einer Stadt

(Stadt Zürich 1989 [168]) verwendet, da praktisch sämtliche Fussgängeruntersuchungen in Städten durchgeführt wurden und somit die stadttypische Altersverteilung zu berücksichtigen ist.

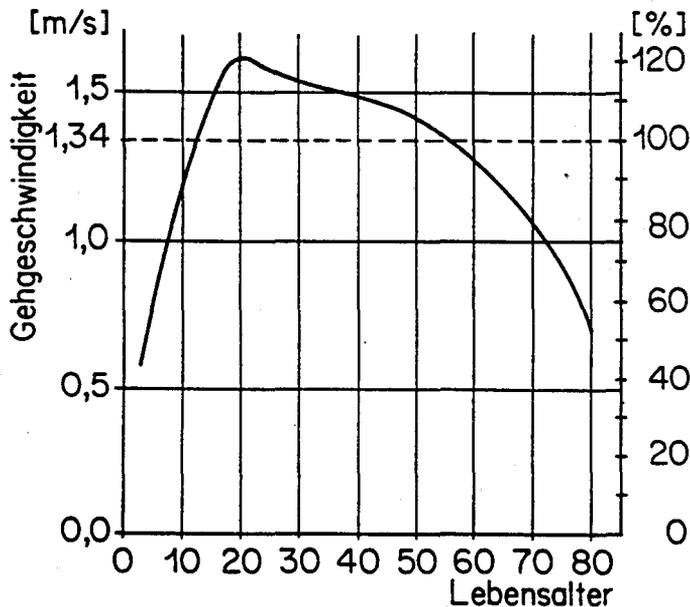


Abb. 41: Verlauf der Fussgängergeschwindigkeiten in Funktion des Lebensalters (Abbildung: IVT).

Der so ermittelte Kurvenverlauf entspricht weitgehend jenem der körperlichen Leistungsfähigkeit. Zu beachten ist namentlich der starke Geschwindigkeitsabfall im Alter von über 50 Jahren. Eine 70-jährige Person erreicht lediglich noch etwa 72 % und eine 80-jährige Person sogar nur 50 % der durchschnittlichen Geschwindigkeit. Dies wird dort relevant, wo die älteren Fussgänger zumindest zeitweise überdurchschnittlich stark vertreten sind, beispielsweise bei Bahnhöfen und Umsteigeanlagen.

3.22.3 Grösse

Verkehrstechnische Untersuchungen zur Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der Körpergrösse liessen sich nicht finden, obwohl ein entsprechender Zusammenhang evident ist. Es muss daher auf die Darlegungen des Gehvorganges in Abschnitt 2 verwiesen werden. Demnach besteht eine Proportionalität zwischen der Körpergrösse und der Beinlänge, sodass die Geschwindigkeit eines grossen Fussgängers höher als die eines kleinen Fussgängers sein dürfte. Da es sich bei der Beinbewegung um einen Eigenschwingungsvorgang handelt, wird der Zusammenhang unterproportional sein.

3.23 Begleitumstände der Bewegung

3.23.1 Verkehrszweck

Verkehrsplanerisch unterteilt man die Ortsveränderungen in die vier Kategorien Pendlerverkehr, Einkaufsverkehr, Nutzverkehr und Freizeitverkehr. Die Unterscheidung der Fussgängergeschwindigkeit nach Verkehrszweck ist methodisch heikel. Erstens gibt es

zwar Verhaltensweisen, welche eindeutig mit dem Verkehrszweck zusammenhängen, zum Beispiel ein gemütliches Schlendern in der Freizeit oder das Hasten zum Arbeitsplatz im Pendlerverkehr. Insofern ist die Verkehrskategorie ein Parameter für die Fussgängergeschwindigkeit. Zweitens aber unterscheidet sich die Zusammensetzung der Fussgängergruppen je nach Verkehrszweck bezüglich Alter, Geschlecht oder Gesundheitszustand. Definitionsgemäss sind beispielsweise Pendler berufstätige Menschen, welche 20 bis 65 Jahre zählen und weitgehend gesund sind. Die Durchschnittsgeschwindigkeit des Verkehrszwecks Pendlerverkehr wird daher allein schon deshalb höher sein als beim Einkaufsverkehr.

Eine weitere Schwierigkeit besteht in der Zuordnung der von den Autoren genannten Verkehrszwecken zu den in der Verkehrsplanung gebräuchlichen Kategorien. Es ist anzunehmen, dass die Begriffe nicht immer deckungsgleich sind. Aus den 13 verfügbaren Angaben können ansatzweise folgende Geschwindigkeiten abgeleitet werden:

•	Pendlerverkehr	1.34 m/s
•	Einkaufsverkehr	1.04 m/s
•	Nutz- und Werkverkehr	1.45 m/s
•	Touristik- und Freizeitverkehr	0.99 m/s

Letztere Angabe zum Freizeitverkehr streut stark. Während die meisten Autoren tiefe Werte nennen, sind die Geschwindigkeitsangaben von [125] und [156] für den Freizeitverkehr praktisch gleich hoch wie für den Pendlerverkehr. Die Differenz erklärt sich durch die Vielfalt des Freizeitverkehrs. Während sich die beiden hohen Angaben auf den Fussgängerverkehr bei einer Massenveranstaltung beziehen, handelt es sich bei den übrigen Angaben um Spaziergänger.

Die vorgenannten Geschwindigkeiten müssen zusätzlich mit dem Mittelwert gemäss 3.1 in Übereinstimmung gebracht werden, wozu die Anteile der Verkehrszwecke bekannt sein müssten. Diese schwanken massgebend nach Tageszeit und Ort und nur überschlägig kann angenommen werden, dass jeder Verkehrszweck etwa einen Viertel des Gesamtverkehrs ausmacht. Daraus ergeben sich folgende Geschwindigkeiten:

•	Pendlerverkehr	1.49 m/s
•	Einkaufsverkehr	1.16 m/s
•	Nutz- und Werkverkehr	1.61 m/s
•	Touristik- und Freizeitverkehr	1.10 m/s

Der Pendler- und der Werkverkehr sind somit um 11 beziehungsweise 20 % schneller als das Mittel, der Einkaufs- und der Freizeitverkehr um 13 beziehungsweise 18 % langsamer.

3.23.2 Jahres- und Tageszeit

Die Tageszeitabhängigkeit ist sehr spärlich dokumentiert, zum ersten weil ein praktischer Nutzen dieser Erkenntnisse nicht ohne weiteres ersichtlich ist und zum zweiten infolge des grossen Erhebungsaufwandes. Eine spürbare Abhängigkeit zwischen Tageszeit und Fussgängergeschwindigkeit ist aber aufgrund der physischen Leistungsfähigkeit zu erwarten. Einen Geschwindigkeitsverlauf für die Zeit zwischen 8.30 und 13.30

Uhr liefert [79]. Die einzelnen Stundenmittelwerte sind in guter Uebereinstimmung mit der physiologischen Leistungsfähigkeit. Als wenig hilfreich erscheint dagegen die Ausgleichskurve:

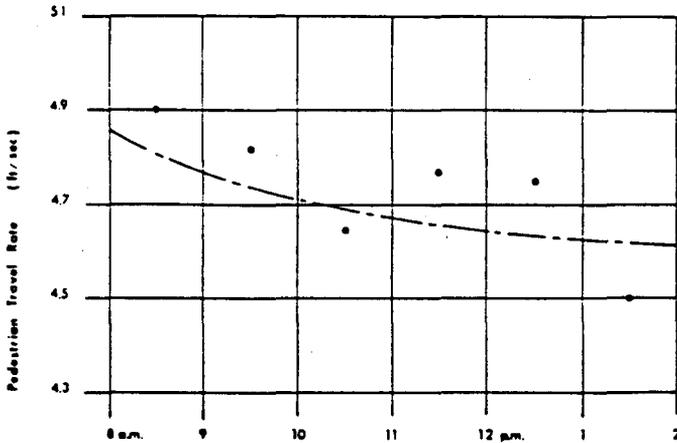


Abb. 42: Fussgängergeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Tageszeit (Abbildung: [79]).

Nach [193] ist der Spitzenverkehr morgens und mittags etwa gleich schnell, während [125] festgestellt haben will, dass der Spitzenverkehr abends um etwa 0.2 m/s schneller ist als morgens. [92] schliesslich hat bei mehreren Messungen eine Geschwindigkeitsabnahme um rund 6 % vom Mittag zum Abend ermittelt. Er widerspricht damit [125]. Die Erklärung dafür ist, dass sich die Angabe von [125] auf den Werkverkehr an einem Fabrikator bezieht. Es ist anzunehmen, dass sich die dort beobachteten Personen abends besonders beeilt haben, um einen Zug oder eine Strassenbahn zu erreichen. Zu anderen Resultaten kommt eine Untersuchung aus den USA von 1927 (zitiert in [13], [50], [125]):

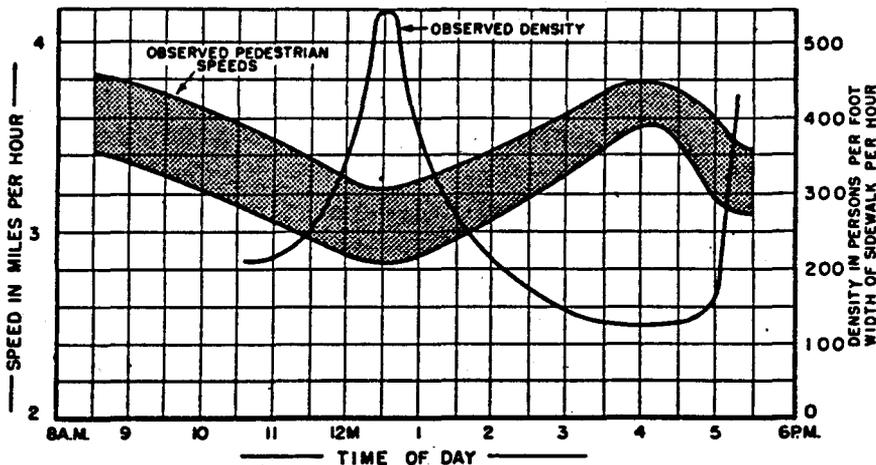


Abb. 43: Fussgängergeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Tageszeit und der Verkehrsdichte (Abbildung: [13]).

Berücksichtigt man den Einfluss der Fussgängerdichte gemäss Abschnitt 3.25, so lässt sich der Einfluss der Tageszeit herausfiltern. Demnach kann man davon ausgehen, dass die Fussgängergeschwindigkeit während der Morgenspitze ähnlich hoch ist wie in der Abendspitze. Es fehlt aber eine Geschwindigkeitsspitze über Mittag. Als Erklärung bietet sich an, dass die in der Mittagsspitze ausgewiesene Dichte von maximal 0.4 P/m² lokal

und kurzzeitig viel höher war. Eine Rolle gespielt haben könnten auch klimatische Einflüsse (San Francisco). Gesamthaft erscheint aber ein Kurvenverlauf nach [79] wahrscheinlicher, woraus sich folgende Hypothese ergibt:

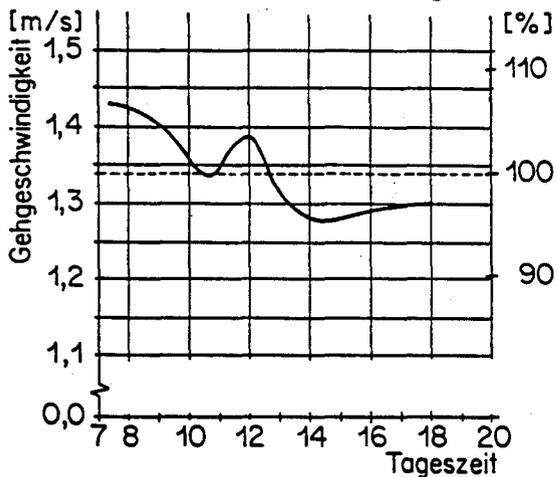


Abb. 44: Hypothese zum Geschwindigkeitsverlauf im Tagesgang, basierend auf [79] und [92] (Abbildung: IVT).

Zur jahreszeitlichen Abhängigkeit der Fussgängergeschwindigkeit fanden sich keine Angaben.

3.23.3 Witterung/Klima

Wie bereits in Kapitel 2.43.4 dargestellt, wird die körperliche Leistungsfähigkeit von Umgebungstemperatur, Luftfeuchtigkeit und Wärmestrahlung beeinflusst [64]. Der Witterungseinfluss auf die Geschwindigkeit ist aber bislang kaum untersucht worden. In der geprüften Literatur fanden sich nur zwei Autoren, welche die Fussgängergeschwindigkeit in Funktion der Umgebungstemperatur darstellen ([79], [116]). Beide kommen zum Befund eines Geschwindigkeitsabfalles mit steigender Temperatur. Ein Unterschied besteht lediglich im Kurvenverlauf. Während [79] über 15 Grad keinen Geschwindigkeitsabfall mehr feststellt, nimmt dieser bei [116] gerade hier stark zu.

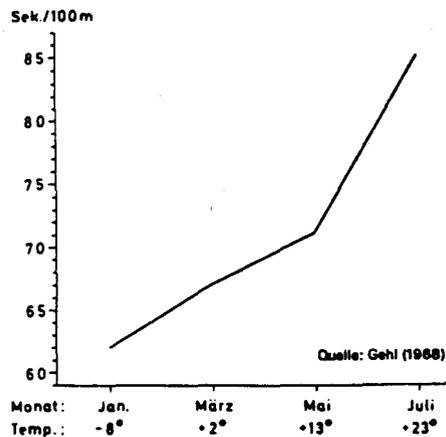
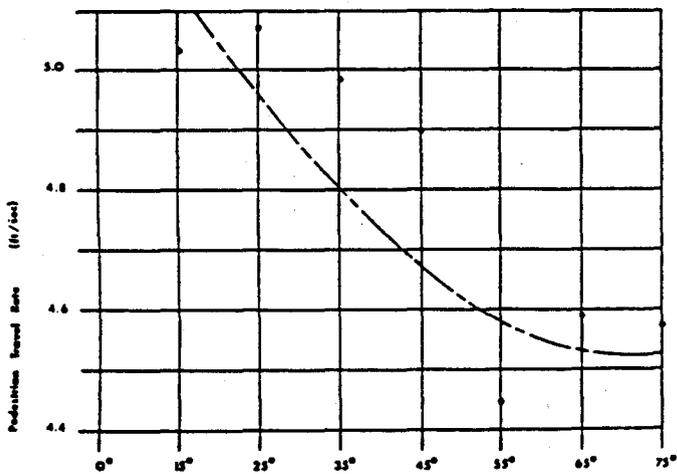


Abb. 45: Geschwindigkeit beziehungsweise Zeitaufwand für eine bestimmte Strecke in Funktion der Umgebungstemperatur (Abbildungen: Links: [79]; rechts [116]).

Die Angaben wurden gemittelt und auf die Durchschnittsgeschwindigkeit von 1.34 m/s normiert. Mangels entsprechender Information muss die Normtemperatur (= Temperatur, bei welcher die Fussgängergeschwindigkeit dem Mittel entspricht) geschätzt werden. Berücksichtigt man die Umstände der verschiedenen Erhebungen sowie die Angaben von [79] und [116], so kann man sie mit etwa 15 Grad annehmen.

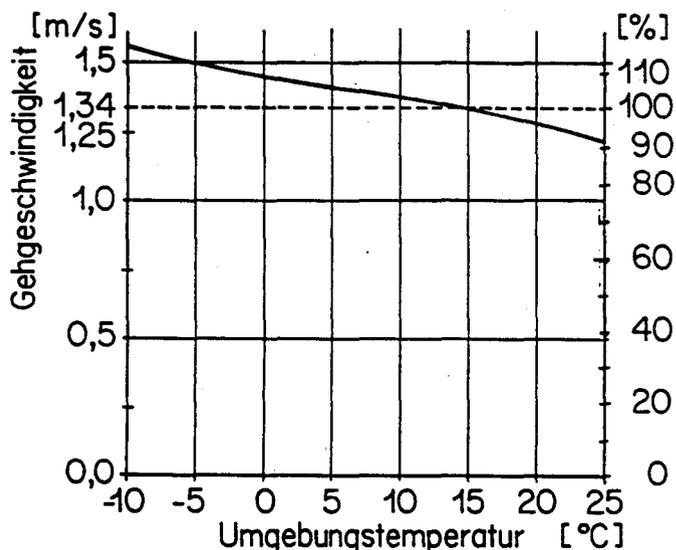


Abb. 46: Fussgängergeschwindigkeit in Funktion der Umgebungstemperatur zwischen -10 und +25 Grad (Abbildung: IVT).

3.23.4 Fussweglänge

Die Ermüdungsanfälligkeit des menschlichen Körpers lässt eine Geschwindigkeitsabnahme mit steigender Weglänge erwarten. Untersuchungen dazu finden sich aber nicht und es ist fraglich, ob im relevanten Distanzbereich überhaupt ein Einfluss festzustellen wäre. Der Mensch ist immerhin in der Lage, täglich mehrere Dutzend Kilometer zurückzulegen. Man darf somit davon ausgehen, dass im örtlichen Distanzbereich keine Abhängigkeit zwischen der Fussweglänge und der Geschwindigkeit besteht. Für Treppen hat [120] diese Frage untersucht. Demnach lässt sich hier eine Geschwindigkeitsabnahme mit zunehmender Länge der Treppe nachweisen:

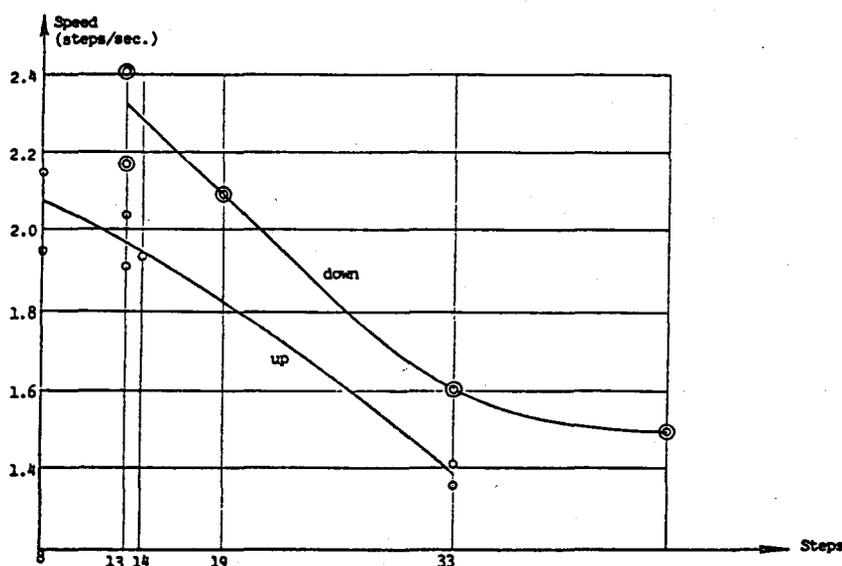


Abb. 47: Abnahme der Fussgängergeschwindigkeit auf Treppen in Funktion der Stufenzahl (Abbildung: [120]).

3.24 Charakteristiken der Anlage

3.24.1 Gehen auf Rampen

Zum Geschwindigkeitsverhalten auf geneigten Fusswegen und Rampen liegen nur spärliche Angaben vor. Zudem machen die Autoren oft nicht deutlich, ob sie vom Mittelwert aus Steigung und Gefälle oder nur von der Steigungsgeschwindigkeit sprechen. Fünf Autoren geben an, dass im Neigungsbereich zwischen 0 und etwa 8 % kein Einfluss auf die Geschwindigkeit festzustellen ist ([26], [67], [85], [140], [180]). Andere Quellen weisen im Gegensatz dazu eine deutliche Geschwindigkeitsabnahme bereits bei Steigungen von 5 % und eine leichte Geschwindigkeitserhöhung bei Gefällen ab 5 % experimentell nach ([13], [15], [94]). Gestützt wird letztere Angabe durch die frühere Feststellung, wonach die Neigung einen starken Einfluss auf den Energieverbrauch hat. Aus den 16 auswertbaren Angaben zum Geschwindigkeitsverhalten sowie dem Mittelwert gemäss 3.1 lässt sich folgende Neigungs-/Geschwindigkeitskurve ableiten:

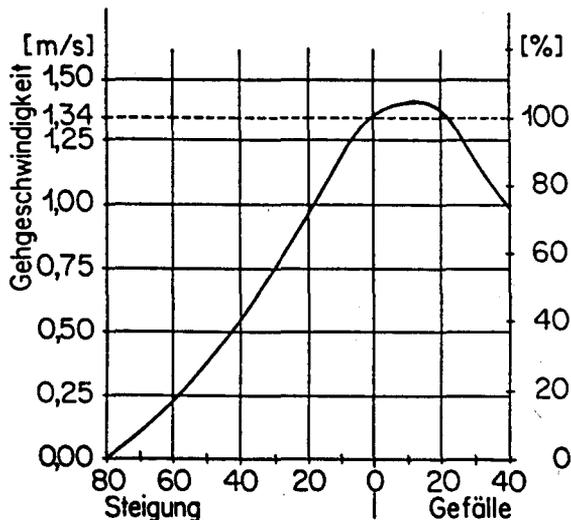


Abb. 48: Geschwindigkeit der Fussgänger in Funktion der Gehwegneigung. Die Neigungsbereiche über $\pm 20\%$ haben hypothetischen Charakter, da dies der Anwendungsbereich von Treppen ist (Abbildung: IVT).

Tab. 5: Mittlere horizontale und vertikale Geschwindigkeiten auf typischen Neigungen.

Neigung	aufwärts		abwärts	
	horizontal	vertikal	horizontal	vertikal
0 %	1.34 m/s	0.00 m/s	1.34 m/s	0.00 m/s
5 %	1.29 m/s	0.06 m/s	1.38 m/s	0.07 m/s
10 %	1.19 m/s	0.12 m/s	1.40 m/s	0.14 m/s
15 %	1.07 m/s	0.16 m/s	1.40 m/s	0.21 m/s

3.24.2 Gehen auf Treppen

58 Angaben zur Fussgängergeschwindigkeit auf Treppen konnten ausgewertet werden. 10 Angaben betrafen die mittlere Geschwindigkeit sowie je 24 die Geschwindigkeit beim Aufwärts- beziehungsweise Abwärtsgehen. Die Angaben erfolgten entweder als Horizontalgeschwindigkeit oder als Anzahl Stufen pro Zeiteinheit, nur selten aber als Vertikalgeschwindigkeit. Bei der Umrechnung in die jeweils andere Masseinheit waren teilweise Annahmen zur Stufenhöhe und zur Treppenneigung zu treffen.

Die mittlere Horizontalgeschwindigkeit beträgt $v_{F,h} = 0.652$ m/s, die mittlere Vertikalgeschwindigkeit $v_{F,v} = 0.326$ m/s sowie die mittlere Anzahl Schritte 2.103 pro Sekunde. Die Geschwindigkeit ist beim Aufwärtsgehen um 6.5 % tiefer, beim Abwärtsgehen um 6.5 % höher als im Durchschnitt:

Aufwärtsgehen	$v_{F,h} = 0.610$ m/s	$v_{F,v} = 0.305$ m/s	1.97 Schritte/s
Abwärtsgehen	$v_{F,h} = 0.694$ m/s	$v_{F,v} = 0.347$ m/s	2.24 Schritte/s

Verglichen mit der Geschwindigkeit in der Ebene ist das Treppensteigen im Mittel um 51% langsamer (Aufwärtsgehen: 54 %; Abwärtsgehen: 48 %). Ueberschlägig kann mit einer Halbierung der Horizontalgeschwindigkeit gerechnet werden. Die Vertikalgeschwindigkeit ist im Uebergangsbereich von der Rampe zur Treppe praktisch identisch.

3.25 Einfluss der Fussgängerdichte

3.25.1 Gehen in der Ebene

Die Abhängigkeit zwischen der Fussgängerdichte und der Fussgängergeschwindigkeit geht in die Berechnung der Leistungsfähigkeit von Fussgängeranlagen ein und ist besonders dort zu beachten, wo der Zeitbedarf eines Fussgängers von Belang ist. Erstaunlich sind die in der Literatur anzutreffenden grossen Unterschiede. Neben Differenzen bezüglich des Geschwindigkeitsniveaus betreffen sie auch den Kurvenverlauf. Einig sind sich alle Untersuchungen, dass der entscheidende Geschwindigkeitsabfall im Bereich zwischen etwa 0.5 und 2.0 P/m² eintritt. Ein Teil der Autoren nähert diesen Kurvenabschnitt mit einer Gerade an ([52], [126], [128], [179]). Deren Steigung ist jeweils so gross, dass bereits bei einer Belegung von 3 bis 4 P/m² ein Stillstand der Fussgängerbewegung eintreten müsste. Da dies nicht zutrifft, bleibt die Aussagekraft der linearen Regressionen auf den genannten Bereich beschränkt. Andere Untersuchungen zeigen einen Verlauf vom Typ k/x , welcher einen grösseren Dichtebereich abzudecken vermag, bei dem aber die Werte bei sehr geringen Fussgängerdichten kaum plausibel sind ([13], [35], [47], [60], [94], [120], [142], [161]). Einzelne Autoren beschreiben daher den Verlauf mit einer doppel-S-förmigen Kurve. Kennzeichnend ist die im tiefen Dichtebereich zunächst zögernde Geschwindigkeitsabnahme sowie der Abbruch aller Fussgängerbewegungen oberhalb von etwa 5 P/m² (insbesondere [73], [122], aber auch [5], [58], [135] und [160]).

Als Basis für eine Geschwindigkeitskurve konnten total 25 Angaben zumindest in Teilbereichen des Dichtespektrums verwendet werden. Daraus wurde ein mittlerer Kurvenverlauf errechnet. Bereits bei einer bescheidenen Fussgängerdichte von 0.5 P/m² ist demnach ein spürbarer Rückgang der Geschwindigkeit um nahezu 10 % zu erwarten. Bei 1.5 P/m² sinkt die Fussgängergeschwindigkeit auf gegen die Hälfte.

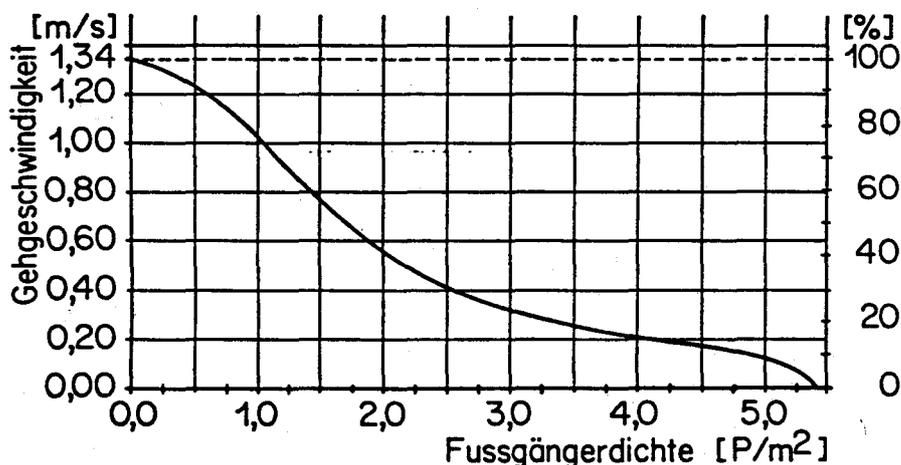


Abb. 49: Abhängigkeit der Fussgängergeschwindigkeit von der Fussgängerdichte in der Ebene (Abbildung: IVT).

3.25.2 Gehen auf Treppen

Die Datenbasis der analogen Darstellung für Treppen ist mit lediglich sieben Angaben ([52], [54], [64], [73], [120], [123], [161]) schwach und zudem widersprüchlich. Es fällt auf, dass die Geschwindigkeit im tiefen Dichtebereich (bis etwa 1.0 P/m^2) toleranter auf eine zunehmende Fussgängerdichte reagiert als in der Ebene. Der Fussgänger verlangt bei Treppen offensichtlich kleinere dynamische Zusatzräume, was mit der geringeren Horizontalgeschwindigkeit zusammenhängen mag. Die obere Grenze der Fussgängerdichte wird mit 5.4 P/m^2 angegeben und stimmt mit dem Grenzwert der Ebene überein.

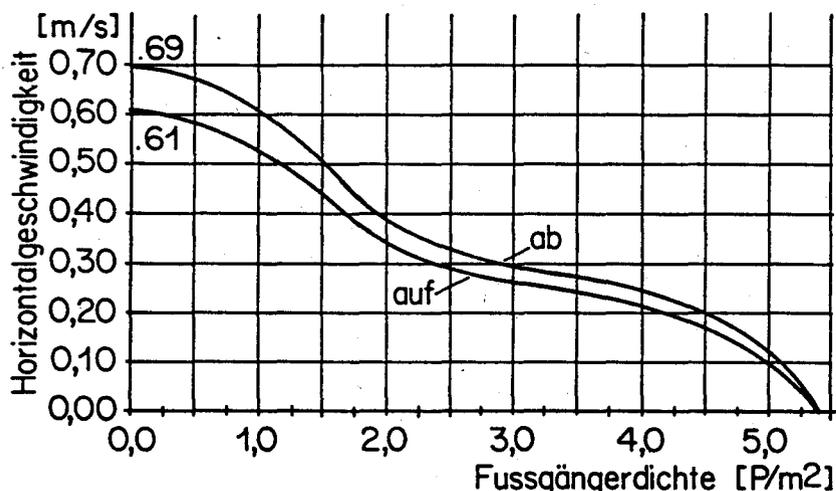


Abb. 50: Abhängigkeit der Fussgängergeschwindigkeit von der Fussgängerdichte auf Treppen (Abbildung: IVT).

3.3 Streuung der Fussgängergeschwindigkeiten

Die Geschwindigkeiten der einzelnen Fussgänger und der Fussgängergruppen streuen aus zwei Gründen um den Mittelwert: Zum ersten bewegt sich ein bestimmter Fussgänger auch unter gleichen äusseren Umständen nicht immer gleich schnell, sondern seine Geschwindigkeit ist abhängig zum Beispiel von seiner Eile oder seinem Gesundheitszustand. Zum zweiten verändert sich die Zusammensetzung der Fussgängergruppen. Insgesamt zeigen die Geschwindigkeiten eine Normalverteilung um den Mittelwert. Die total 17 Streuungswerte aus zwölf Quellen ([13], [15], [25], [79], [81], [85], [135], [140], [158], [173], [179], [193]) ergeben im Mittel eine Standardabweichung σ von 0.26 m/s oder 19.3% des Mittelwertes. Häufige Angaben zur Verteilung sind die 1σ -, 2σ - und 3σ -Bereiche:

•	0.13 %	< 0.56 m/s	< 0.42 $v_{F,m}$	- 3 σ
•	2.28 %	< 0.82 m/s	< 0.61 $v_{F,m}$	- 2 σ
•	15.87 %	< 1.08 m/s	< 0.81 $v_{F,m}$	- 1 σ
•	50.00 %	< 1.34 m/s	< 1.00 $v_{F,m}$	Mittel
•	84.13 %	< 1.60 m/s	< 1.19 $v_{F,m}$	+ 1 σ
•	97.72 %	< 1.86 m/s	< 1.39 $v_{F,m}$	+ 2 σ
•	99.87 %	< 2.12 m/s	< 1.58 $v_{F,m}$	+ 3 σ

Die 3σ -Bereiche stimmen gut mit den genannten unteren und oberen Grenzen der natürlichen Bewegung überein. [5] wendet allerdings bei sehr dichtem Fussgängerverkehr eine Geschwindigkeit von lediglich 0.2 m/s an.

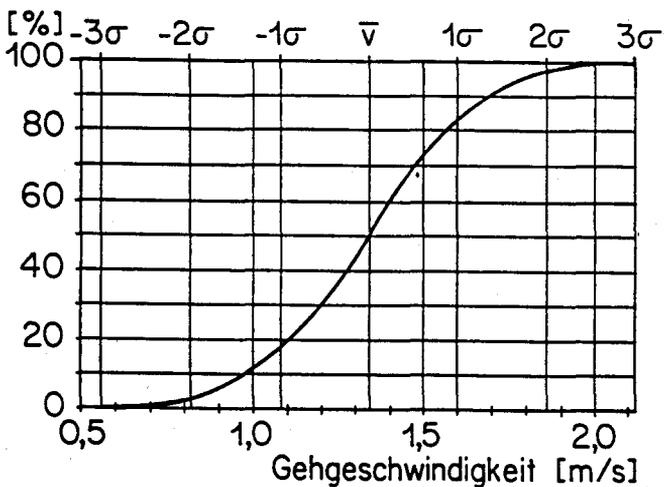


Abb. 51: Summenkurve der Fussgängergeschwindigkeiten. Ablesebeispiel: 30 % der Fussgänger sind langsamer als 1.2 m/s (Abbildung: IVT).

Einzelne Hinweise lassen erkennen, dass die Verteilung auch asymmetrisch mit einer positiven Schiefe (Konzentration im tieferen Geschwindigkeitsbereich) und vereinzelt sehr hohen Werten sein kann ([25], [125], [155], [193]). Die zugehörigen Messungen stammen aus der Umgebung öffentlicher Verkehrsmittel oder aus dem Berufsverkehr, was die Spitzenwerte hinreichend begründen dürfte. [155] hat zudem beobachtet, dass vor allem Kinder einen Fahrbahnübergang laufend überqueren, was ebenfalls zu Ausreißern im hohen Geschwindigkeitsbereich führt.

4. Dimensionierung von Fussgängeranlagen

4.1 Grundlagen der Dimensionierung

4.1.1 Grundbeziehung

Die Zahl der Fussgänger, welche während einer Zeit t einen Querschnitt durchströmt, errechnet sich in Analogie zur Hydraulik mittels folgender Grundbeziehung:

$$(11) \quad F = D \cdot B_N \cdot v_{F,h} \cdot t$$

wobei	F	Anzahl Fussgänger [P]
	D	Fussgängerdichte [P/m ²]
	$v_{F,h}$	Horizontale Fussgängergeschwindigkeit [m/s]
	B_N	Nutzbare Fusswegbreite [m]
	t	Beobachtungszeit [s]

Die nutzbare Fusswegbreite B_N ergibt sich aus der Bruttobreite B_B der Fussgängeranlage abzüglich des Verlustes B_H infolge von Hindernissen oder Wandeinflüssen:

$$(12) \quad B_N = B_B - B_H$$

wobei	B_B	Bruttobreite einer Fussgängeranlage [m]
	B_H	Verlust infolge von Hindernissen oder Wandeinflüssen [m]

Die Leistungsfähigkeit ist definiert als Anzahl der Fussgänger, welche pro Zeiteinheit einen gegebenen Querschnitt passieren können:

$$(13) \quad L = \frac{F}{t} = D \cdot B_N \cdot v_{F,h}$$

wobei	L	Leistungsfähigkeit einer Fussgängeranlage [P/s]
-------	-----	---

Oftmals arbeitet man mit der spezifischen Leistungsfähigkeit, indem man die Leistungsfähigkeit L auf die Einheitsbreite von 1 [m] bezieht. Diese spezifische Leistungsfähigkeit ist ein Standardmass, mittels welchem verschiedene Anlagentypen auf einfache und einheitliche Weise miteinander verglichen werden können und mit dessen Hilfe sich die Leistungsfähigkeit einer bestimmten Fussgängeranlage von bekannter Breite einfach ermitteln lässt:

$$(14) \quad L_s = D \cdot v_{F,h}$$

wobei	L_s	Spezifische Leistungsfähigkeit einer Fussgängeranlage [P/sm]
-------	-------	--

4.12 Genereller Verlauf der Leistungsfähigkeit

Im Unterschied zur Hydraulik ist $v_{F,h}$ eine Funktion von D , sodass das Maximum der Leistungsfähigkeit nicht bei höchster Geschwindigkeit erreicht wird. Höchste Fussgängergergeschwindigkeit und maximale Leistungsfähigkeit schliessen sich demnach aus. Bezüglich der Leistungsfähigkeit von Fussgängeranlagen interessieren die drei folgenden Zusammenhänge:

- Geschwindigkeit in Funktion der Fussgängerdichte
- Leistungsfähigkeit in Funktion der Fussgängerdichte
- Leistungsfähigkeit in Funktion der Geschwindigkeit

Diese Abhängigkeiten gleichen jenen des motorisierten Individualverkehrs und ergeben analoge Kurvenverläufe.

Loi d'écoulement des flots
d'automobiles de piétons

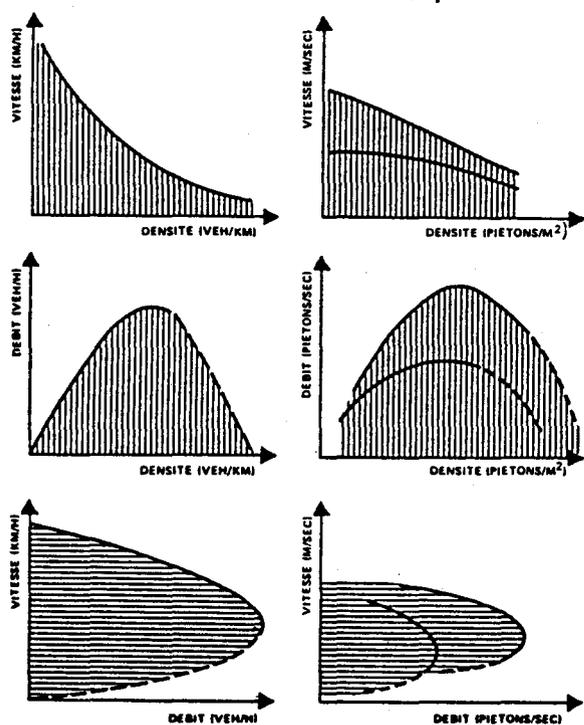


Abb. 52: Verkehrsstromgesetzmässigkeiten, links beim motorisierten Individualverkehr, rechts beim Fussgängerverkehr (Abbildung: [25]).

4.2 Platzbedarf und nutzbare Breite des Verkehrsraumes

4.2.1 Platzbedarf

4.2.1.1 Statischer Platzbedarf

Der geometrisch minimale Platzbedarf eines mitteleuropäischen Fussgängers in Ruhe lässt eine Fussgängerdichte von 6.6 P/m^2 zu. Für japanische Verhältnisse gibt [83] dafür sogar 8.0 P/m^2 an. Solche Fussgängerdichten werden nur in Extremfällen, namentlich in

überfüllten öffentlichen Verkehrsmitteln oder in Lifts, erreicht. Bereits bei einer Dichte von etwa 3.0 bis 3.5 P/m² lässt sich ein Körperkontakt nicht mehr vermeiden. In Wartesituationen mit beliebigem Platzangebot stellt sich daher eine tiefere Fussgängerdichte von etwa 2.0 bis 2.9 P/m² ein ([59], [85], [133], [140]). Bei Lichtsignalanlagen wurden beispielsweise 2.04 P/m² gefunden, in Warteschlangen 2.25 P/m², auf Busstationen 2.7 P/m² oder beim Warten auf den Lift 2.9 P/m². [94] und [125] haben zusätzlich gezeigt, dass die Fussgängerdichte bei Lichtsignalanlagen mit zunehmendem Abstand von der Bordsteinkante auf unter 2 P/m² fällt. Nach [152] sollen die Warteflächen von Haltestellen und Fahrbahnüberquerungen mit Lichtsignalanlagen sogar nur auf 1.5 P/m² bemessen werden.

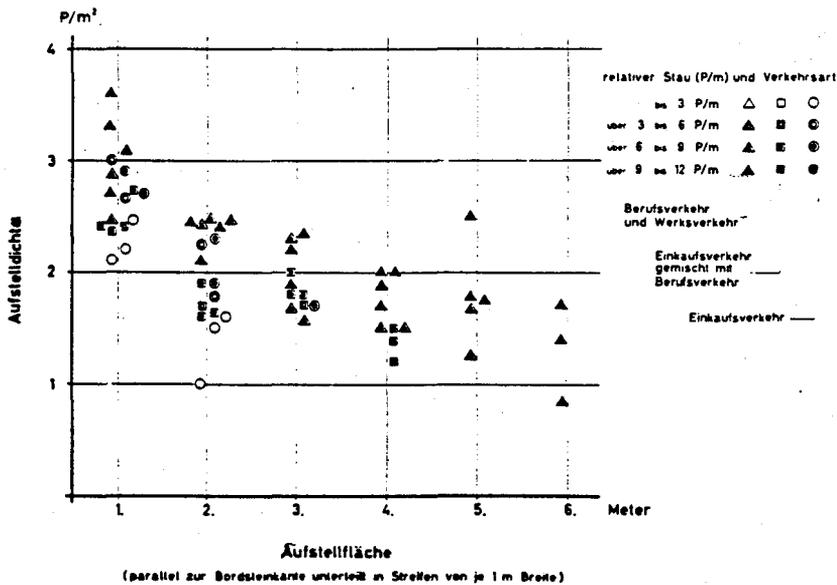


Abb. 53: Fussgängerdichte vor Lichtsignalanlage in Funktion der Distanz von der Bordsteinkante (Abbildung: [125]).

4.21.2 Dynamischer Platzbedarf

Der dynamische Platzbedarf für die Fortbewegung ist grösser als der statische. In seitlicher Richtung müssen die Breitenverteilung der Fussgänger inklusive mitgeführtem Gepäck, die Schwankungsbewegungen des Körpers bei Bewegung auf idealer Bahn und die Abweichungen davon berücksichtigt werden. In Bewegungsrichtung muss der Fussgänger seine Beine im gewünschten Mass auslenken und bei einem plötzlichen Stopp der vor ihm gehenden Person anhalten können (Sicherheitsabstand). Der dynamische Platzbedarf eines Fussgängers ist demnach das Produkt aus der Breite der Fussgängerspur und der Schrittlänge zuzüglich eines Sicherheitsabstandes.

Der Körperschwerpunkt schwankt seitlich selbst beim Gehen auf idealer Bahn infolge der Art der Gehbewegung innerhalb einer Bandbreite von rund 5 cm [118]. [158] hat gefunden, dass die Gesamtschwankung der Fussgänger für 85 % der Fussgänger in einer Bandbreite von 28.2 cm liegt, es treten aber Werte bis über 60 cm auf. Diese Bandbreite nimmt mit der Geschwindigkeit zu [125].

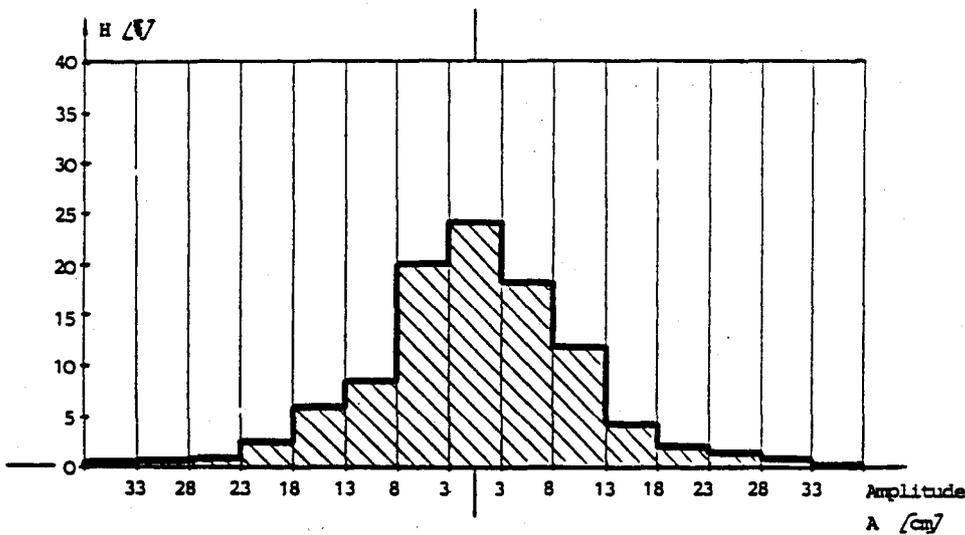


Abb. 54: Fussgängerschwan- gungen um eine Ideallinie, Gesamtschnitt (Abbildung: [158]).

Analog zur Schwankungsbreite der Bewegung ist auch bei der Breite der Fussgänger eine statistische Betrachtung erforderlich. Zum ersten spielt die Verteilung der Körperbreiten eine Rolle, zum zweiten aber auch die Wahrscheinlichkeit der Mitnahme von Gepäck oder der Begleitung durch Kinder und Hunde. Nach [158] hängt letzteres nur wenig vom Strassentyp ab und zeigt folgende durchschnittliche Verteilung:

		ERSTE HAND!		ERSTE HAND!		ERSTE HAND!		ERSTE HAND!		
		LEER	KLEIN	MITTEL	GROSS	KIND	KINDER- WAGEN	STOCK	HUND	
ZWEITE HAND!	LEER	25,8	37,1	20,8	1,6	0,7	1,2	0,6	0,6	
	KLEIN		2,8	3,3	0,2	0,5	0,2	0,7	0,3	
	MITTEL			1,5	0,2	0,4	0,1	0,4	0,2	
	GROSS				0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	
	KIND					0,2	0,2	0,0	0,0	
	KINDER- WAGEN	Angaben in [%]						0,0	0,0	0,0
	STOCK							0,0	0,1	
	HUND								0,0	

Abb. 55: Prozentuale Verteilung des Gepäcktransportes durch Fussgänger. Kleines Gepäckstück = Handtasche; mittleres Gepäckstück = Einkaufstasche; grosses Gepäckstück = Reisekoffer (Abbildung: [158]).

Für die einzelnen Konstellationen hat daraus [158] die folgenden 50 %- und 85 %-Fussgängerbreiten ermittelt:

		ERSTE HAND!		ERSTE HAND!		ERSTE HAND!		ERSTE HAND!		
		LEER	KLEIN	MITTEL	GROSS	KIND	KINDER- WAGEN	STOCK	HUND	
ZWEITE HAND!	LEER	64 73	73 81	73 80	89 100	107 120	63 70	69 74	108 122	
	KLEIN		75 83	72 80	78 84	107 120	68 76	69 74	108 122	
	MITTEL			74 81	85 95	107 120	68 76	69 74	108 122	
	GROSS				79 84	107 120	—	—	—	
ZWEITE HAND!	KIND					141 160	97 110	—	—	
	KINDER- WAGEN	50%-Wert in /cm/ 85%-Wert in /cm/						—	—	—
	STOCK							—	108 122	
	HUND								—	

Abb. 56: 50 %- und 85 %-Fussgängerbreiten in Abhängigkeit von der Gepäckbeförderung und der Streuung der Körperbreiten (Abbildung: [158]).

Aus den mittleren Schwankungen und der nach Auftretenshäufigkeit gewichteten Fussgängerbreite ergibt sich die Fussgängerspür. Diese ist für die Hälfte der Fussgänger schmäler als 0.82 m und für 85 % der Fussgänger schmäler als 1.01 m. Aus dem Begriff der Fussgängerspür darf allerdings nicht abgeleitet werden, dass sich die Fussgänger in eindeutig definierten Spuren bewegen. Die Auswertung von insgesamt 29 Angaben in der verkehrstechnischen Literatur ergibt dagegen einen Mittelwert von lediglich 0.71 m. Der niedrigste, selten genannte Wert liegt bei 0.56 m, der höchste bei 1.00 m. Noch bescheidenere Werte werden für Treppen und Rampen angeführt, wo mit einer Spurbreite von etwa 0.60 m gerechnet wird. Die Fussgänger verlangen hier infolge ihrer kleineren Geschwindigkeit offenbar geringere dynamische Zuschläge. Dies stimmt gut mit der früher dargestellten kleineren Abhängigkeit der Fussgängergeschwindigkeit von der Fussgängerdichte auf Treppen überein. Die in der verkehrstechnischen Literatur genannten Spurbreiten sind indessen für allgemeine Verhältnisse ungenügend und gelten höchstens, wenn keine Gepäckbeförderung angenommen werden muss.

In Längsrichtung muss mit wachsender Geschwindigkeit ein grösserer Abstand gegeben sein, um die längeren Schritte zu gestatten. Berechnet man den Platzbedarf für verschiedene Geschwindigkeiten mit der mittleren Breite von 0.71 m für Fussgänger ohne Gepäck sowie mit der Schrittlängenfunktion (1), so erhält man bei einer unbehinderten Geschwindigkeit von 1.34 m/s und einer Frequenz von 2.1 Hz eine Schrittlänge von 0.63 m sowie eine mögliche Fussgängerdichte von 2.2 P/m². Erhöht man die Fussgängerdichte bei konstanter Spurbreite, so reduziert sich die mögliche Schrittlänge und damit die Fussgängergeschwindigkeit. Die Gehbewegung kommt bei einer Dichte von etwa 5.4 P/m² zum Stillstand, was bereits früher auf andere Weise hergeleitet wurde.

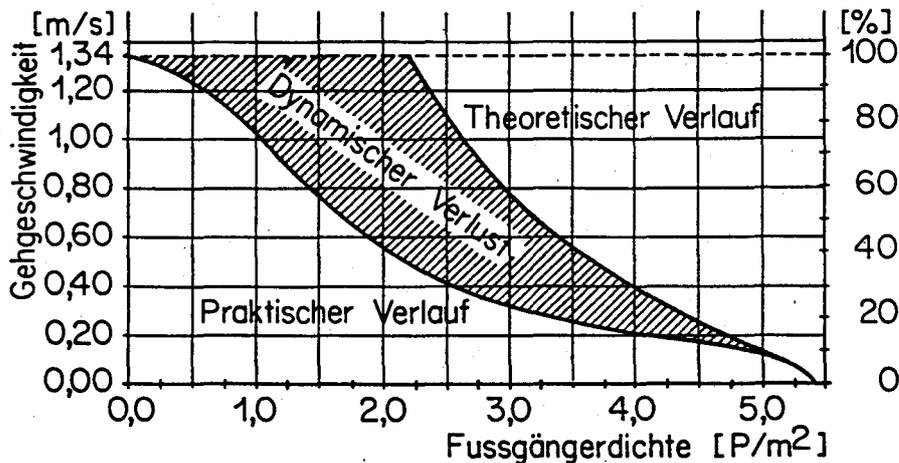


Abb. 57: Theoretische Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der Fussgängerdichte unter alleiniger Berücksichtigung des Platzbedarfes für die Schrittlänge; praktisch beobachtete Kurve und dynamischer Verlust (Abbildung: IVT).

Während die Angabe für die Dichte bei Bewegungsstillstand gut mit der höchstmöglichen Fussgängerdichte gemäss 3.25.1 übereinstimmt, trifft dies für die Fussgängerdichte bei grossen Geschwindigkeiten nicht zu. Der Vergleich der theoretischen mit der effektiven Kurve zeigt einen in der Realität mit der Geschwindigkeit rasch zunehmenden Platzbedarf, der als dynamischer Verlust für Sicherheitsabstände in Längs- und Querrichtung zu interpretieren ist.

In der Literatur wird meist eine Fussgängerdichte von rund $1.4 P/m^2$ postuliert (zum Beispiel [26], [110], [125], [156], [174]). Wie die vorstehenden Überlegungen aber zeigen, liegt die als wünschbar erachtete Fussgängerdichte darunter, was dadurch bekräftigt wird, dass hier bereits ein starker Geschwindigkeitsrückgang festzustellen ist ([26], [81], [85], [122], [140], [173], [186]). Sinnvoll wird die Angabe einer Fussgängerdichte ohnehin erst unter Bezugnahme auf das Qualitätsniveau (siehe Abschnitt 4.4).

4.22 Nutzbare Breite des Verkehrsraumes

4.22.1 Breitenverminderung durch Wandinflüsse

Fussgänger halten gegenüber Wänden einen Mindestabstand ein, der in der Leistungsberechnung als Verlustbreite B_H zu berücksichtigen ist. Auf Trottoirs hat [179] einen mittleren Abstand zu Hauswänden von 0.61 m, zu Zäunen und Gartenmauern von 0.46 m und zur Fahrbahn von ebenfalls 0.46 m beobachtet. Kleinere Werte von zwischen 0.46 m und 0.00 m (saubere, glatte Wände) nennt [55]. Den Einfluss von Wänden in Korridoren hat [71] untersucht und dabei einen Abstand von 0.20 m zu Betonwänden und 0.14 bis 0.17 m zu Metallwänden festgestellt. Einen Zuschlag von etwa 0.15 m bei Wänden macht [121], einen solchen von 0.31 m nennt [5].

Die Angaben sind uneinheitlich, zu erkennen ist aber immerhin der Einfluss der Wandbeschaffenheit sowie die in beengten Verhältnissen tolerierten kleineren Wandabstände (Korridore von Gebäuden). Es kann die Hypothese aufgestellt werden, dass in Korridoren etwa mit den Werten von [71] zu rechnen ist, was den erzwungenen Abständen von [158] entspräche, während auf Trottoirs höhere Werte eingesetzt werden müssen:

- Abstände in Korridoren
 - Betonwand 0.25 m
 - Metallwand 0.20 m
- Abstände auf Trottoirs
 - Hauswand 0.45 m
 - Gartenzaun 0.35 m
 - Fahrbahn 0.35 m

Bei diesen Angaben handelt es sich um Richtgrössen, die mit genaueren Untersuchungen bestätigt oder verworfen werden müssen. [122] weist schliesslich darauf hin, dass in Kurven mit einem zusätzlichen Platzbedarf von etwa 0.15 m zu rechnen ist. In Schaufensterbereichen von Einkaufsstrassen schliesslich sind Abzüge für stehende Fussgänger zu machen. Die nutzbare Breite eines Fussweges ist hier um zwischen 0.50 und 0.90 m, im Mittel um 0.75 m, abzumindern ([92], [126], [134], [179]).

4.22.2 Breitenverminderung durch Hindernisse

Hindernisse sind mit ihrer vollen Breite sowie einem Mindestabstand zu berücksichtigen. [158] hat ermittelt, dass der seitliche Abstand zu Hindernissen in 50 % der Fälle bis zu 0.30 m und in 85 % der Fälle bis zu 0.43 m beträgt, vorausgesetzt dass er frei gewählt werden kann. Selbst der minimal tolerierte Abstand liegt in 50 % der Fälle noch bei bis zu 0.23 m, in 85 % der Fälle bei bis zu 0.36 m. [71] nennt dafür unabhängig von den Abmessungen des Hindernisses 0.10 m, was eher wenig sein dürfte. Der Einfluss eines Hindernisses ist auch in seiner näheren Umgebung zu spüren. In einem Längsabstand von 3 m verursacht ein Hindernis in einem Korridor noch immer folgende Breitenverluste:

- Hindernistiefe 0.40 m: Breitenverlust 0.29 m
- Hindernistiefe 0.60 m: Breitenverlust 0.31 m
- Hindernistiefe 0.76 m: Breitenverlust 0.43 m

Für die reine Breite ausgewählter Objekte sind nach [157]/[179] folgende Werte einzusetzen (US-amerikanische Verhältnisse):

- Beleuchtungskandelaber 0.75 bis 1.05 m
- Schaltschränke von Lichtsignalanlagen 0.90 bis 1.20 m
- Feuermelder 0.80 bis 1.10 m
- Hydranten 0.75 bis 0.90 m
- Verkehrszeichen 0.60 bis 0.75 m
- Parkuhren 0.60 m
- Briefkästen 1.00 bis 1.15 m
- Papierkörbe 0.90 m
- Telephonzellen 1.20 m
- Bänke 1.50 m
- Zeitungsstände 1.20 bis 4.00 m
- Bäume 0.60 bis 1.22 m
- Pflanzenkübel 1.50 m

Bei Handläufen von Treppen müssen 0.31 m in Abzug gebracht werden [5].

4.3 Leistungsfähigkeit der Fussgängeranlagen

4.31 Leistungsfähigkeit in der Ebene

4.31.1 Richtungsverkehr

Die aus der Dimensionierung von Individualverkehrsanlagen stammende Funktion von Kladek (nach [156]) beschreibt den Zusammenhang zwischen Fussgängerdichte und Geschwindigkeit recht treffend:

$$(15) \quad v_{F,hi} = v_{F,hf} \cdot \left[1 - e^{\left(-\gamma \cdot \left(\frac{1}{D} - \frac{1}{D_{max}} \right) \right)} \right]$$

wobei	$v_{F,hi}$	Geschwindigkeit bei einer bestimmten Dichte [m/s]
	$v_{F,hf}$	Geschwindigkeit bei voller Freizügigkeit [m/s]
	γ	Eichkonstante [P/m^2]
	D	Fussgängerdichte [P/m^2]
	D_{max}	Fussgängerdichte, bei welcher eine Bewegung unmöglich wird [P/m^2]

Mit $v_{F,hf} = 1.34$ m/s und $D_{max} = 5.4$ P/m^2 sowie dem Kurvenverlauf gemäss Abschnitt 3.25 ergibt sich die Eichkonstante zu $\gamma = 1.913$ P/m^2 . Die Funktion lautet damit für Fussgänger:

$$(16) \quad v_{F,hi} = 1.34 \cdot \left[1 - e^{\left(-1.913 \cdot \left(\frac{1}{D} - \frac{1}{5.4} \right) \right)} \right]$$

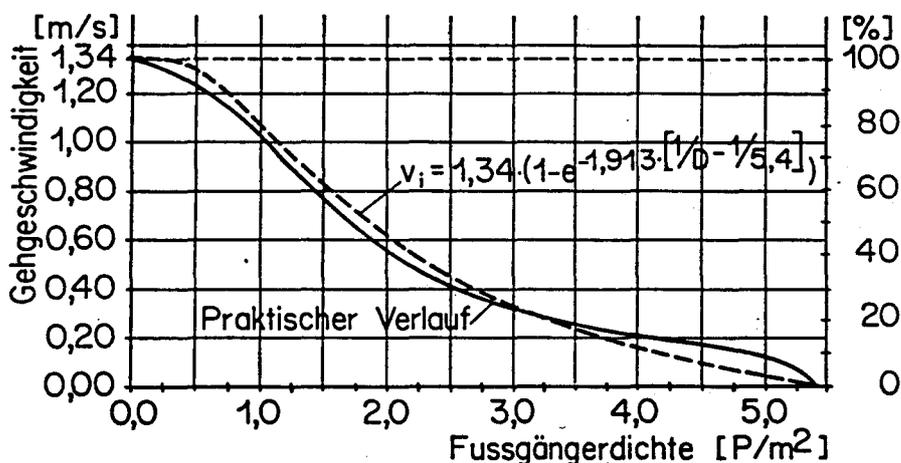


Abb. 58: Empirischer Zusammenhang zwischen Fussgängerdichte und Geschwindigkeit sowie Näherung mit Funktion von Kladek (Abbildung: IVT).

Die spezifische Leistungsfähigkeit ergibt sich nach (14) und (16) allgemein zu:

$$(17) \quad L_s = v_{F,f} \cdot D \cdot \left[1 - e^{\left(-\gamma \cdot \left(\frac{1}{D} - \frac{1}{D_{max}} \right) \right)} \right]$$

Mit den Kennwerten für die gerichtete Fussgängerbewegung in der Ebene erhält man für die spezifische Leistungsfähigkeit:

$$(18) \quad L_s = 1.34 \cdot D \cdot \left[1 - e^{(-1.913 \cdot (\frac{1}{D} - \frac{1}{5.4}))} \right]$$

Durch Umformung wird aus den Beziehungen (16) und (18) schliesslich der allgemeine Ausdruck für die Leistungsfähigkeit in Funktion der Geschwindigkeit:

$$(19) \quad L_s = \frac{v_{F,i}}{\frac{1}{D_{max}} - \frac{\ln\left(1 - \frac{v_{F,j}}{v_{F,i}}\right)}{\gamma}}$$

Die spezielle Form für die Leistungsfähigkeit von Fussgängeranlagen lautet:

$$(20) \quad L_s = \frac{v_{F,i}}{\frac{1}{5.4} - \frac{\ln\left(1 - \frac{v_{F,j}}{1.34}\right)}{1.913}}$$

Die drei Ausdrücke (16), (18) und (20) können im sogenannten Fundamentaldiagramm für den Fussgängerverkehr dargestellt werden:

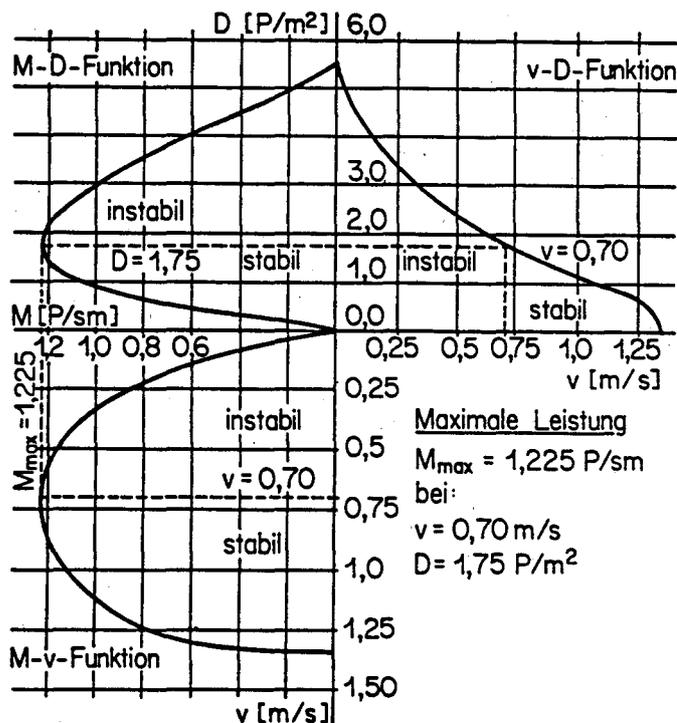


Abb. 59: Fundamentaldiagramm für Fussgängerverkehrsanlagen, Richtungsverkehr (Abbildung: IVT).

Die maximale Leistungsfähigkeit unter Normalbedingungen beziehungsweise der Arbeitspunkt liegt demnach bei etwa 1.23 P/sm. Sie wird bei einer Fussgängerdichte von 1.75 P/m² und bei einer Fussgängergeschwindigkeit von 0.70 m/s erreicht. Verglichen mit den Literaturangaben ist dies eher wenig. Mehrere Autoren ([8], [14], [52], [123], [125]) geben Werte zwischen 1.4 und 1.5 P/sm an. Es finden sich aber auch tiefere Zahlen ([50], [125]), wobei die meisten Autoren die Dichte bei höchster Leistungsfähigkeit ebenfalls bei etwa 1.8 bis 2.0 P/m² ansiedeln. Der Arbeitspunkt trennt den stabilen vom instabilen Bereich. Im stabilen Bereich führt eine Zunahme der Fussgängerdichte zu einer tieferen Geschwindigkeit, aber zu einer höheren Leistungsfähigkeit. Im instabilen Bereich sinken sowohl Geschwindigkeit als auch Leistungsfähigkeit, sodass hier Rückstaugefahr besteht.

Die genannten Abhängigkeiten gelten unter Normalbedingungen, in welchen die Fussgänger keinem äusseren Zwang unterliegen. Wesentlich höhere Leistungsfähigkeiten können zustandekommen, wenn den Fussgängern Verhältnisse aufgedrängt werden, die sie freiwillig nicht akzeptieren würden. [125] hat dies mittels Experimenten untersucht: Auf die Anweisung an die Versuchspersonen, zügig zu gehen und aufzuschliessen, sich gegenseitig aber nicht zu behindern, erhielt [125] eine Leistung von 2.25 P/sm. Das Verhältnis von Dichte $D = 1.5 \text{ P/m}^2$ zu Geschwindigkeit $v_{F,h} = 1.5 \text{ m/s}$ lässt den Schluss zu, dass sich diese Leistungsfähigkeit nur in Ausnahmefällen einstellen wird. Eine noch höhere Leistung von 3.1 P/sm wurde erzielt, wenn man zwei seitwärts zulaufende Fussgängerströme auf einem schmalen Weg vereinigte. Die Fussgängerdichte betrug dabei 2.2 bis 2.4 P/m² und die Geschwindigkeit rund 1.5 m/s. Dies entspricht weitgehend der theoretischen D-v-Kurve. Die Leistungsfähigkeit war mit 4.33 P/ms maximal, wenn der Fussgängergruppe eine hohe Geschwindigkeit und die höchstmögliche Dichte von aussen aufgezwungen wurde. Dazu mussten die Versuchspersonen ihre Arme auf die Schultern der Vorderleute legen und wurden zusätzlich in ihrem Voranschreiten gebremst [125].

4.31.2 Gegenverkehr

Bei entgegengesetzten Fussgängerströmen verursacht die Behinderung einen Leistungsabfall, dessen Ausmass bisher nur wenig untersucht worden ist. [8], [14], [52] und [123] nennen eine mittlere Einbusse von rund 8 %. [140] spricht von unter 6 % und [128] gibt an, dass kein grosser Einfluss des Gegenverkehrs zu erwarten sei, da sich die beiden Verkehrsströme separieren. Diese Aussage deckt sich mit jener von [179]. [122] hat zusätzlich das Verhältnis der beiden Fussgängerströme betrachtet und dabei festgestellt, dass der Verlust bei genau gleich grossen Fussgängerströmen mit 4 % am kleinsten ist. Bei einem Verhältnis von 90 % zu 10 % steigt die Verlustrate auf 14.5 % an. Der Leistungsabfall ist nicht noch grösser, weil sich die Fussgängerströme separieren und sich ein Rechtsverkehr herausbildet. Dadurch kommt der schwächere Fussgängerstrom selbst bei sehr grosser Fussgängerdichte nicht zum Erliegen [47].

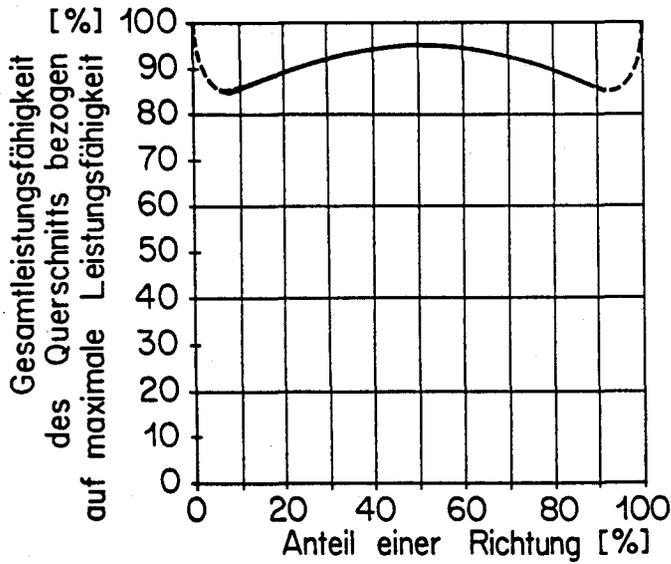


Abb. 60: Prozentuale Leistungsfähigkeit eines Querschnitts bei Gegenverkehr, bezogen auf die Leistungsfähigkeit bei einseitig gerichtetem Fussgängerstrom (Abbildung: IVT nach [122]).

Der jeweils schwächere Fussgängerstrom beansprucht überproportional viel Platz. Die folgende Abbildung von [122] zeigt, dass für einen Fussgängerstrom von 20 % rund 30 % der Querschnittsfläche vorgesehen werden müssen. Für die 80 % des Gegenstromes verbleiben damit noch 70 % des Querschnittes. Anders ausgedrückt gehen dadurch 10 % des Querschnittes verloren, was mit obigem Leistungsverlust übereinstimmt.

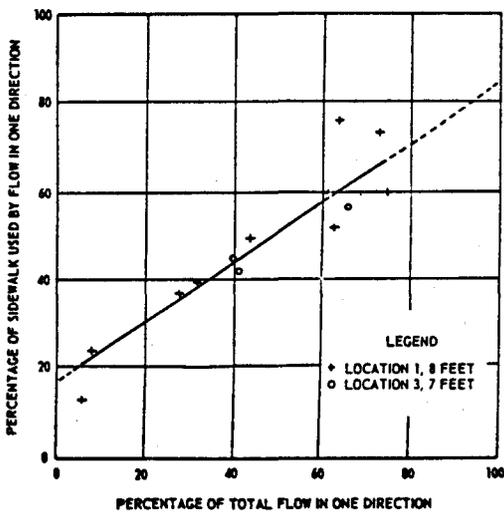


Abb. 61: Aufteilung eines Fussweges in Funktion der Richtungsanteile bei Gegenverkehr (Abbildung: [122]).

4.32 Leistungsfähigkeit von Treppen

Mit den Kennwerten der Bewegung auf Treppen kann der Zusammenhang zwischen der Fussgängerichte und der Geschwindigkeit durch die Funktion von Kladek approximiert und auch für diesen Anlagentyp ein Fundamentaldiagramm aufgestellt werden. Die Abweichungen zwischen den Beobachtungen und der Funktion sind etwas grösser als beim Gehen in der Ebene, namentlich im Bereich sehr hoher Fussgängerichten. Hingegen kommt die bei einigen Untersuchungen eindeutig ausgewiesene Unempfindlichkeit im tiefen Dichtebereich gut zum Ausdruck. Es ergibt sich für die Geschwindigkeit beim Aufwärtsgen:

$$(21) \quad v_{F,hauf} = 0.610 \cdot \left[1 - e^{(-3.722 \cdot \left\{ \frac{1}{D} - \frac{1}{5.4} \right\})} \right]$$

wobei $v_{F,hauf}$ Horizontalkomponente der Fussgängergeschwindigkeit beim Aufwärtsgen in Funktion von der Fussgängerichte [m/s]

Für das Abwärtsgen gilt:

$$(22) \quad v_{F,hab} = 0.694 \cdot \left[1 - e^{(-3.802 \cdot \left\{ \frac{1}{D} - \frac{1}{5.4} \right\})} \right]$$

wobei $v_{F,hab}$ Horizontalkomponente der Fussgängergeschwindigkeit beim Abwärtsgen in Funktion von der Fussgängerichte [m/s]

Für die spezifische Leistungsfähigkeit eines Querschnittes erhält man:

$$(23) \quad L_{s,auf} = 0.610 \cdot D \cdot \left[1 - e^{(-3.722 \cdot \left\{ \frac{1}{D} - \frac{1}{5.4} \right\})} \right]$$

$$(24) \quad L_{s,ab} = 0.694 \cdot D \cdot \left[1 - e^{(-3.802 \cdot \left\{ \frac{1}{D} - \frac{1}{5.4} \right\})} \right]$$

wobei $L_{s,auf}$ Spezifische Leistungsfähigkeit eines Treppenquerschnittes beim Aufwärtsgen [P/sm]
 $L_{s,ab}$ Spezifische Leistungsfähigkeit eines Treppenquerschnittes beim Abwärtsgen [P/sm]

Analog zu (20) wird schliesslich der Zusammenhang zwischen Leistungsfähigkeit und Geschwindigkeit zu:

$$(25) \quad L_{s,auf} = \frac{v_{F,hi}}{\frac{1}{5.4} - \frac{\ln \left(1 - \frac{v_{F,hi}}{0.610} \right)}{3.722}}$$

$$(26) \quad L_{s,ab} = \frac{v_{F,hi}}{\frac{1}{5.4} - \frac{\ln\left(1 - \frac{v_{F,hi}}{0.694}\right)}{3.802}}$$

Wie dem Fundamentaldiagramm zu entnehmen ist, liegt die optimale Fussgängerdichte für das Aufwärts- wie für das Abwärtsgehen mit 2.23 P/m² gleich hoch und um rund 0.5 P/m² höher als in der Ebene. Die maximale spezifische Leistungsfähigkeit beträgt beim Aufwärtsgehen 0.850 P/sm und beim Abwärtsgehen 0.979 P/sm mit Geschwindigkeiten von 0.38 m/s beziehungsweise 0.44 m/s. Treppen sind somit um etwa 25 % weniger leistungsfähig als ebene Fusswege.

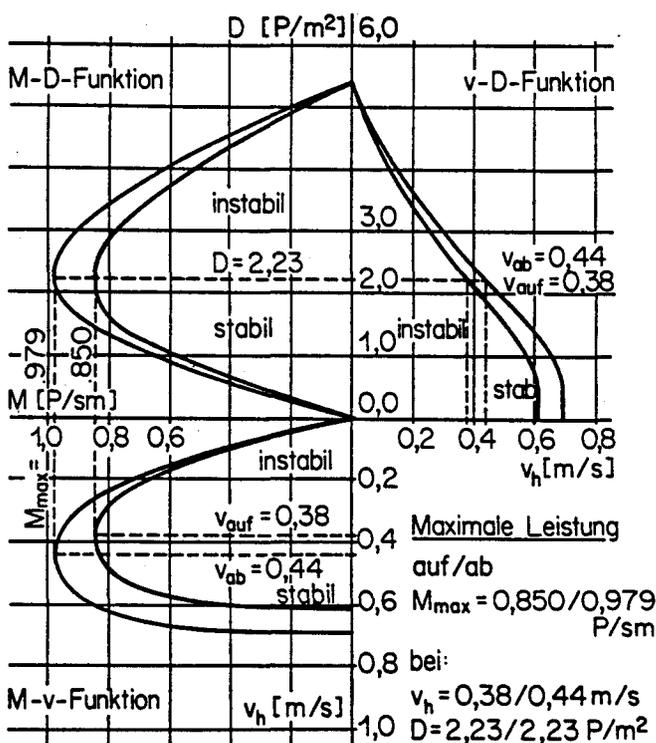


Abb. 62: Fundamentaldiagramm für Treppen, Richtungsverkehr (Abbildung: IVT).

Die mittlere Maximalleistung für das Auf- und Abwärtsgehen liegt mit 0.92 P/sm leicht unter den 46 Literaturangaben, aus welchen sich ein Mittelwert von 1.05 P/sm errechnet. Berücksichtigt man aber, dass die Literaturwerte häufig im Berufsverkehr mit seiner höheren Geschwindigkeit erhoben wurden, die Formeln (25) und (26) aber für eine mittlere Situation gelten, so ist die Differenz plausibel. Die Literaturangaben stimmen darin mit den hier erhaltenen Erkenntnissen überein, dass die Fussgängerdichte des Arbeitsplatzes höher liegt als in der Ebene. [121] gibt schliesslich an, dass bei Treppenneigungen von über 48 % die genannten Leistungsfähigkeiten auf 90 % bei abwärts- und auf 75 % bei aufwärtsbegangenen Treppen zu reduzieren sind. Diese Aussage muss vor ihrer Weiterverwendung verifiziert werden.

Eine gute Uebereinstimmung zwischen Literatur und Fundamentaldiagramm herrscht auch bezüglich des prozentualen Unterschiedes zwischen der Leistungsfähigkeit in Steigungs- und Gefällerrichtung. Die oben ermittelte Leistungsfähigkeit in Steigungsrichtung liegt um 13 % unter jener in Gefällerrichtung. Die 16 Wertepaare in der Literatur ergeben eine Abminderung um 17 %.

4.33 Leistungsfähigkeit mechanischer Fussgängeranlagen

4.33.1 Theoretische Leistungsfähigkeit

Rolltreppen und Rollbänder werden an vielbegangenen Fussgängeranlagen parallel zu festen Treppen und Fussgängerpassagen angeordnet, wenn dies die zu überwindende Höhendifferenz erfordert oder wenn der Benützungskomfort der Anlage verbessert werden soll. Realisiert werden Förderhöhen von zwischen 1.2 und über 33 m [119], [153]. Die Betrachtung der Leistungsfähigkeit von Rolltreppen und Rollbändern unterscheidet sich nicht grundsätzlich voneinander. Da erstere häufiger angewandt werden, werden sie im folgenden schwergewichtig behandelt.

Die theoretische Leistungsfähigkeit ist abhängig von der nutzbaren Breite, der Fussgängerdichte, der Geschwindigkeit der Anlage und der Eigenbewegung der Fussgänger. Lässt man letzteres zunächst ausser Betracht, so hängt die im Gegensatz zur festen Treppe nicht von der Fussgängerdichte ab. Es gilt dann:

$$(27) \quad L_R = v_{R,s} \cdot \cos\alpha \cdot B_N \cdot D$$

wobei	L_R	Leistungsfähigkeit der Rolltreppe [P/s]
	$v_{R,s}$	Schräggeschwindigkeit der Rolltreppe [m/s]
	B_N	Nutzbare Breite der Rolltreppe [m]
	α	Neigungswinkel der Rolltreppe [°]

Am verbreitetsten ist die Geschwindigkeit von $v_{R,s} = 0.50$ m/s, während 0.65 m/s und insbesondere 0.75 m/s erst bei mittleren bis grossen Förderhöhen angewandt werden [119]. Nur in vereinzelten Fällen wurden Geschwindigkeiten bis 0.9 m/s realisiert [23]. Bei steilen Rolltreppen mit Neigungswinkeln von über 30° soll dagegen die Geschwindigkeit tief gewählt werden, zum Beispiel zu 0.45 m/s [77], [134], [144], [189], [195]. Bei Rollbändern ist bis zu einer lichten Breite von 1.10 m eine Geschwindigkeit von 0.90 m/s möglich. Als Neigungswinkel α von Rolltreppen sind 30° und 35° allgemein üblich, wobei in selteneren Fällen auch 24.5° und 27.3° realisiert werden. Bei Rollbändern sind 10, 11 und 12° gebräuchlich [153].

Die nutzbare Breite entspricht der Breite der Stufen oder des Bandes. Rolltreppen werden ein-, anderhalb- oder zweispurig mit nutzbaren Breiten von etwa 0.60 m, 0.80 m beziehungsweise 1.00 m realisiert, wobei die zweispurigen Anlagen das beste Verhältnis von Kosten und Leistung aufweisen und deshalb in der Anwendung im Vordergrund stehen [153], [189]. Die folgenden Angaben gelten daher grundsätzlich für zweispurige Treppen. Bei anderen Nutzbreiten sind die Zahlenwerte sinngemäss anzupassen. Obwohl technisch möglich soll die lichte Breite von Rolltreppen den Wert von 1.10 m nicht überschreiten, damit jeder Benützer die Möglichkeit hat, sich am Handlauf festzuhalten [54], [134], [144]. Rollbänder können dagegen bis 3.00 m lichter Breite erreichen [51].

Die Stufentiefe a_R von Rolltreppen soll grösser als 0.38 m sein [54]. Da sich die Treppenstufen im Schrägbereich überlappen, verkürzt sich der effektive Kantenabstand aber auf $a_R \cdot \cos\alpha$. Die Benutzer der Rolltreppe verteilen sich schliesslich meist in diskreten Werten F_{St} auf die Treppenstufen. Die Fussgängerdichte beträgt somit:

$$(28) \quad D = \frac{F_{St}}{B_N \cdot a_R \cdot \cos\alpha}$$

wobei F_{St} Personen pro Treppenstufe [P]
 a_R Stufentiefe der Rolltreppe [m]

Die Leistungsfähigkeit einer Rolltreppe berechnet sich nunmehr folgendermassen [65], [189]:

$$(29) \quad L_R = \frac{F_{St} \cdot v_{R,s}}{a_R}$$

Bei einer Antriebsgeschwindigkeit von 0.50 m/s, bei vollständiger Besetzung aller Stufen mit zwei Personen und einer Stufentiefe von 0.38 m ergibt sich eine theoretische Leistungsfähigkeit von 2.6 P/s. Läuft die Rolltreppe mit einer Geschwindigkeit von 0.75 m/s, so vermag sie theoretisch sogar 4.0 P/s zu bewältigen. Zusätzlich kann eine Eigenbewegung eines Anteiles $q_{T,b}$ der Fussgänger angenommen werden. Anlass dazu ist der mögliche Zeitgewinn. Es gilt dann [134], [144]:

$$(30) \quad L_R = q_{T,b} \cdot F_{St} \cdot \left(\frac{v_{R,s}}{a_R} + \frac{v_{F,v}}{h_R} \right) + (1 - q_{T,b}) \cdot F_{St} \cdot \frac{v_{R,s}}{a_R}$$

wobei $q_{T,b}$ Anteil der Fussgänger, die sich zusätzlich aktiv auf der Rolltreppe hinauf- oder hinunterbewegen [-]
 h_R Höhe der Treppenstufen [m]
 $v_{F,v}$ Vertikalgeschwindigkeit der Fussgänger auf der Rolltreppe [m/s]

Die Treppenstufenhöhe h_R ist höchstens zu 0.24 m anzunehmen [54]. [134] berücksichtigt die Eigenleistung mit 1.0 bis 1.5 Stufen pro Sekunde. Damit erhält er eine maximale theoretische Leistung von 4.6 P/s. [144] nennt eine Eigenleistung von 1.3 Stufen pro Sekunde bei einer Rolltreppengeschwindigkeit von 0.5 m/s. Unter der Annahme, dass die Hälfte der Benutzer auf der Rolltreppe zusätzlich aufwärtsgeht, beträgt die theoretische Leistungsfähigkeit 4.1 P/s. Bewegen sich alle Benutzer selbst, so wächst sie auf 5.6 P/s [144].

Zur Ermittlung der spezifischen Leistungsfähigkeit muss die gesamte bauliche Breite berücksichtigt werden, da nur so ein realistischer Vergleich mit festen Fussgängeranlagen möglich ist:

$$(31) \quad L_{R,s} = \frac{L_R}{B_B}$$

wobei $L_{R,s}$ Spezifische Leistungsfähigkeit einer Rolltreppe [P/sm]
 B_B Bruttobreite, hier bauliche Breite der Rolltreppe [m]

Bei den üblichen Rolltreppen müssen zur nutzbaren Breite rund 0.60 m hinzugezählt werden. Bei einspurigen Treppen ergibt sich B_B damit zu 1.20 m, bei anderthalbspurigen Treppen zu 1.40 m und bei zweispurigen Treppen zu 1.60 m. Der Zuschlag bei Rollbändern beträgt etwa 0.66 m [153]. Die theoretische spezifische Leistungsfähigkeit einer mit 0.50 m/s laufenden Rolltreppe lautet somit:

•	stehende Fussgänger	Rolltreppenbreite 0.60 m	0.98 P/sm
•	stehende Fussgänger	Rolltreppenbreite 0.80 m	1.30 P/sm
•	stehende Fussgänger	Rolltreppenbreite 1.00 m	1.63 P/sm
•	gehende Fussgänger	Rolltreppenbreite 0.60 m	2.10 P/sm
•	gehende Fussgänger	Rolltreppenbreite 0.80 m	2.80 P/sm
•	gehende Fussgänger	Rolltreppenbreite 1.00 m	3.50 P/sm

Dies zeigt deutlich den Verlust an spezifischer Leistungsfähigkeit bei schmalen Treppen.

4.33.2 Praktische Leistungsfähigkeit

Bei der theoretischen Besetzung jeder Trittstufen mit 2 Personen beträgt die effektive Fussgängerdichte rund 5.9 P/m², was unrealistisch hoch und nicht erreichbar ist. Die praktische Leistungsfähigkeit wird zusätzlich eingeschränkt durch die Leistungsfähigkeit des Eintrittsquerschnittes sowie durch die Sicherheit der Fussgänger beim Betreten der Rolltreppe [144], [153], [189]. Beim Eintrittsquerschnitt kann für doppelspurige Rolltreppen nicht mit mehr als 1.75 P/s gerechnet werden [144]. Dies stimmt praktisch mit der Leistungsfähigkeit bei hoher Belastung gemäss [189] und der gemessenen praktischen Höchstleistung von Fussgängeranlagen bei Gedränge überein [125]. Die Leistungsfähigkeit kann deshalb durch eine höhere Rolltreppengeschwindigkeit kaum weiter gesteigert werden und sie wächst auch nicht an, wenn ein Teil der Benutzer zusätzlich aktiv vorwärtsschreitet [125], [189]. Hinzu kommt, dass jeder sich aktiv bewegende Fussgänger mindestens zwei Stufen und einen dynamischen Abstand zum vorangehenden Fussgänger analog zur festen Treppe beansprucht und damit die Fussgängerdichte weiter abnimmt [99].

Mit der Anlagengeschwindigkeit nehmen die Unsicherheitsgefühle der Benutzer zu. Dadurch verzögert sich ihre Geschwindigkeit beim Betreten der Rolltreppe und die Leistungsfähigkeit des Eintrittsquerschnittes sinkt ab. [7] hat Stockungen bei aufwärtslaufenden Rolltreppen mit $v_{R,s}$ von über 0.68 m/s und bei abwärtslaufenden Rolltreppen mit über 0.58 m/s beobachtet. Hinzu kommt, dass meist nur jene Personen zu zweit eine Stufe benutzen, welche bereits zusammen zur Treppe gelangt sind, insbesondere jüngere Menschen, Paare und Schüler [125]. Dies alles äussert sich im Besetzungsgrad der Stufen, welcher sich kaum den theoretischen 2 P/Stufe annähert. [99] nennt stattdessen lediglich 1.06 P/Stufe. Nach [65] ist der Ausnutzungsfaktor bei einer Geschwindigkeit von 0.50 m/s grösser als bei 0.65 m/s und bei aufwärtsgerichteter Bewegung grösser als im

Abwärtsbetrieb. [189] zeigt, dass der Besetzungsgrad der Stufen in Funktion von der Antriebsgeschwindigkeit der Rolltreppe rasch abnimmt. Während er bei $v_{R,s} = 0.5 \text{ m/s}$ nahezu 2 P/Stufe beträgt, sinkt er bei $v_{R,s} = 0.90 \text{ m/s}$ auf etwa die Hälfte ab:

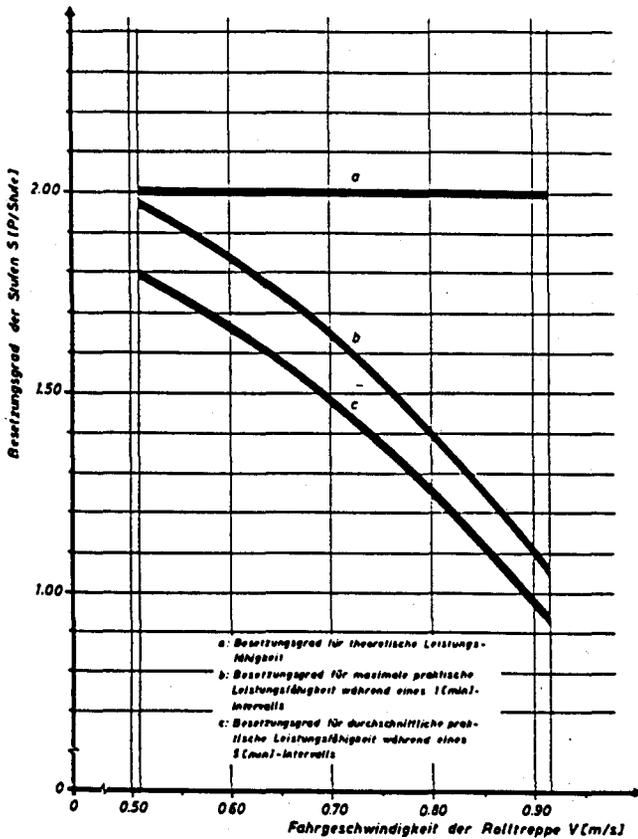


Abb. 63: Abhängigkeit des Besetzungsgrades der Rolltreppenstufen bei aufwärtsbegangenen weispurigen Rolltreppen. Die Kurve (b) für eine einminütige Belastung kann als die oberste erreichbare Besetzung betrachtet werden ([189] nach Turner).

Die Folge davon ist, dass die Leistungsfähigkeit der Rolltreppe bei Erhöhung der Geschwindigkeit von 0.50 auf 0.65 m/s kaum ansteigt. Deren Erhöhung auf über etwa 0.75 m/s verursacht statt einer Leistungssteigerung sogar einen Leistungsabfall [144], [189]. Auf diese Weise entsteht eine Abhängigkeit zwischen Geschwindigkeit und Leistungsfähigkeit, sodass die praktische Leistungsfähigkeit im Gegensatz zur theoretischen nicht linear von der Antriebsgeschwindigkeit abhängt. Die leistungsoptimale Geschwindigkeit liegt bei etwa 0.70 m/s und ist damit praktisch gleich gross wie die Schrägeschwindigkeit der Fussgänger auf festen Treppen im unbehinderten Fall [153].

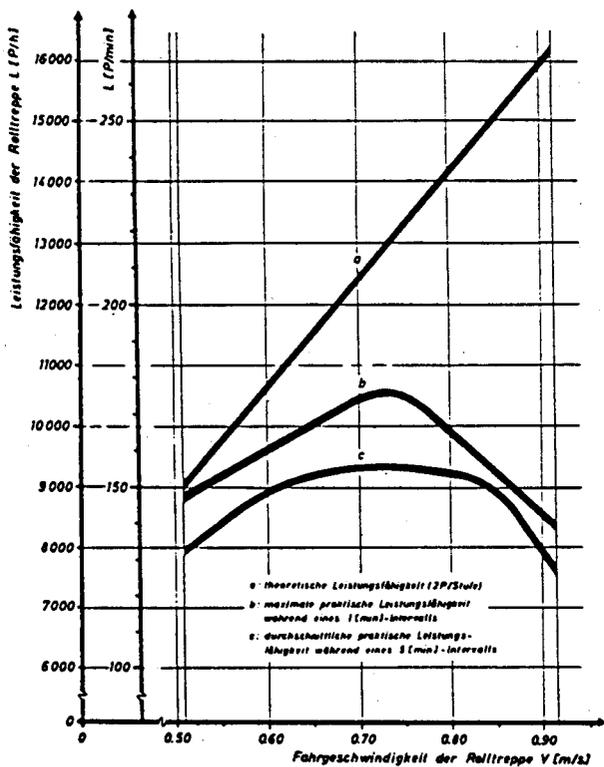


Abb. 64: Abhängigkeit der Leistungsfähigkeit von der Fahrgeschwindigkeit bei aufwärts begangenen zweispurigen Rolltreppen, das dargestellte absolute Leistungsniveau ist allerdings zu gross ([189] nach Turner).

Die Literaturangaben zur praktischen Leistungsfähigkeit schwanken sehr stark, weshalb eine Abschätzung unumgänglich ist. Bei maximaler statischer Fussgängerdichte von etwa 3 P/m^2 beträgt der Besetzungsgrad 1.02 P/Stufe , was dem allgemeinen Wert von [99] entspricht. Mit 0.75 m/s Rolltreppengeschwindigkeit lässt sich damit die praktische Leistungsfähigkeit zu rund 2 P/s errechnen. Bei $v_{R,s} = 0.65 \text{ m/s}$ wird L_R zu 1.73 P/s , was sich mit dem von [144] und [189] genannten Wert deckt. Die 1.75 P/s liegen deutlich höher als die Leistungsfähigkeit einer festen Fussgängeranlage unter Normalbedingungen und setzen ein äusserst starkes Gedränge beim Eintrittsquerschnitt voraus. Eine höhere praktische Leistungsfähigkeit kann kaum erwartet werden.

Die Angaben der verschiedenen Autoren liegen zum Teil über, zum Teil unter dieser Abschätzung. Die bei [189] zitierte Angabe von Turner gemäss Abbildung 64 ergibt eine maximale Leistungsfähigkeit von 2.97 P/s . [41] nennt als Leistungsfähigkeit von einspurigen Rolltreppen einen Wert von 1.4 P/s und für zweispurige Rolltreppen von 2.8 P/s , [7] eine solche von 1.38 beziehungsweise 2.22 P/s . Selbst bei hoher Belastung hat hingegen [189] nur 1.77 P/s oder 67% des theoretischen Maximalwertes beobachtet. Bei äusserst hoher Belastung steigt nach derselben Quelle die Ausnützung auf etwa 73% an. Eine Leistungsfähigkeit von 1.67 P/s erwähnen [5] und [67]. Verschiedene Autoren empfehlen noch tiefere praktische Bemessungswerte von 41 bis 53% der theoretischen Leistungsfähigkeit oder etwa 1.08 bis 1.39 P/s [55], [65], [99], [121], [189]. Weitere Auslastungsfaktoren wurden in Paris mit 0.53 und in London mit 0.61 gemessen [65]. Ebenfalls lediglich etwa 1.42 P/s hat [125] erhalten. Bei einer Stufentiefe von 0.40 m ergibt sich bei [195] eine praktische Leistungsfähigkeit von 0.95 P/s , ähnlich wie bei [152] mit lediglich 1 P/s .

80 % der theoretischen Leistungsfähigkeit oder etwa 2.10 P/s werden gemäss [54] bei ungeordnetem Zulauf nicht erreicht. Eine Obergrenze der ausgeschöpften Leistungsfähigkeit bei Rolltreppen und Rollbändern von 80 % nennt auch [153]. Zudem unterscheidet sich gemäss derselben Quellen die theoretische und die praktische Leistungsfähigkeit von Rolltreppen und Rollbändern nicht. Diese Angabe wird durch [51] gestützt, welcher eine praktische Leistungsfähigkeit von etwa 1.3 bis 1.7 P/sm nennt, wobei der tiefere Wert für ein Band von 3.00 m Breite gilt und der höhere für ein solches von 0.60 m Breite. Insgesamt kann die eingangs erwähnte Abschätzung von 1.75 P/s somit als realistisch betrachtet werden. Kaum ein Unterschied besteht schliesslich in der Leistungsfähigkeit von aufwärts- beziehungsweise abwärtslaufenden Rolltreppen, wobei die Abwärtsrichtung tendenziell leicht schlechtere Werte aufweist [99].

Bei ausgesprochenen Stossbelastungen wurden auf Rolltreppen kurzzeitig höhere Leistungsfähigkeiten erzielt. [189] hat dafür folgende Prozentsätze gefunden, welche auf der Basis einer maximalen praktischen Durchschnittsleistungsfähigkeit von 1.75 P/s in konkrete Spitzenleistungsfähigkeiten umgerechnet wurden:

- Intervall von 60 s + 9 % = 1.91 P/s
- Intervall von 30 s + 16 % = 2.03 P/s
- Intervall von 15 s + 23 % = 2.15 P/s

Selbst der 15s-Wert ergibt somit erst etwa 84 % der theoretischen Leistungsfähigkeit. Verwendet werden dürfen diese Leistungswerte nur bei der Bedienung von Fussgängerpuls und nicht zur Dimensionierung für eine längere Zeitspanne.

4.33.3 Vertellung der Fussgänger auf Rolltreppen und feste Treppen

In der Regel sind Rolltreppen und Rollbänder parallel zu festen Fussgängeranlagen angeordnet. Die Aufteilung des Fussgängerstromes hängt vom Auslastungsgrad der Rolltreppe ab. Die Beobachtung von [189] am Beispiel von Perronabgängen mit stossweiser Belastung zeigt beispielsweise, dass bei kleiner Auslastung praktisch alle Fussgänger die Rolltreppe benützen, während dieser Anteil bei sehr hoher Fussgänger Menge auf etwa 30 bis 45 % absinkt. Dieser Anteil benützt selbst bei sehr hohen Verkehrsmengen und grossem Rückstau die Rolltreppe. Höhere Werte nennen diesbezüglich [65], wonach beim Abwärtsgehen 48 % und beim Aufwärtsgehen 65 % der Fussgänger die Rolltreppe in jedem Fall beanspruchen. Letztere Erscheinung drückt sich auch in den grösseren Staulängen vor aufwärtsführenden Rolltreppen von etwa 4 bis 5 m gegenüber 2 bis 3 m bei abwärtslaufenden Treppen aus [65]. [54] hat beobachtet, dass die auf das Treppensystem zuströmenden Fussgänger bereits bei einer Auslastung der Rolltreppe von 50 % ohne sich anzustellen die feste Treppe benützen. Dieser Auslastungswert entspricht einer Fussgängerdichte von 3.0 P/m² auf der Rolltreppe oder gerade der genannten Obergrenze der statischen Fussgängerdichte sowie einer Leistungsfähigkeit von etwa 1.75 P/s. [54] liefert damit einen weiteren Hinweis für die Richtigkeit der Leistungsabschätzung.

[125] erwähnt schliesslich, dass umgekehrt auch bei schwacher Auslastung immer rund 7 bis 8 % der Fussgänger die Rolltreppe auf alle Fälle meiden, insbesondere Gehbehinderte, ältere unsichere Menschen, Personen mit Hunden oder sperrigem Gepäck sowie junge und besonders eilige Menschen. [7] hat dafür sogar 12 % ermittelt, allerdings bei einer Anlage, mit welcher viele Benützer noch nicht vertraut waren.

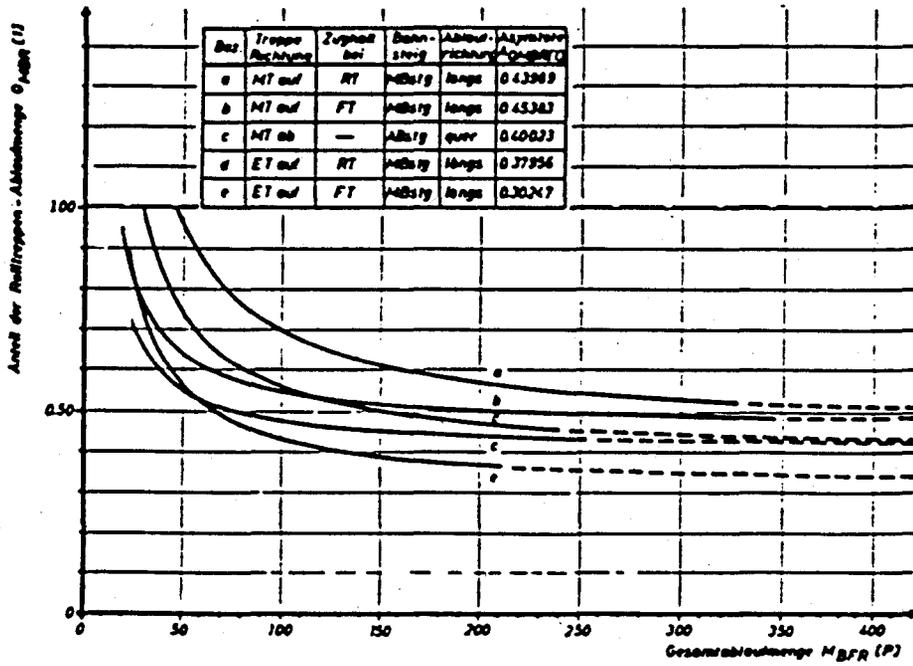


Abb. 65: Anteil der Rolltreppen-Ablaufmenge in Abhängigkeit von der Gesamtablaufmenge bei kombinierten Anlagen [189].

Die praktische Leistungsfähigkeit der Rolltreppe wird somit grundsätzlich voll ausgeschöpft und die parallelen festen Treppen wirken als Ueberläufe. [55] hat basierend auf dieser Feststellung das System von festen Treppen und Rolltreppen als Bedienungssystem modelliert. Im weiteren wurde ein Warteraum mit einer bestimmten Kapazität berücksichtigt. Daraus wurde die auf die feste Treppe ausweichende Fussgängerzahl, die mittlere Wartezeit und die Verteilung auf die zur Verfügung stehenden Spuren simuliert:

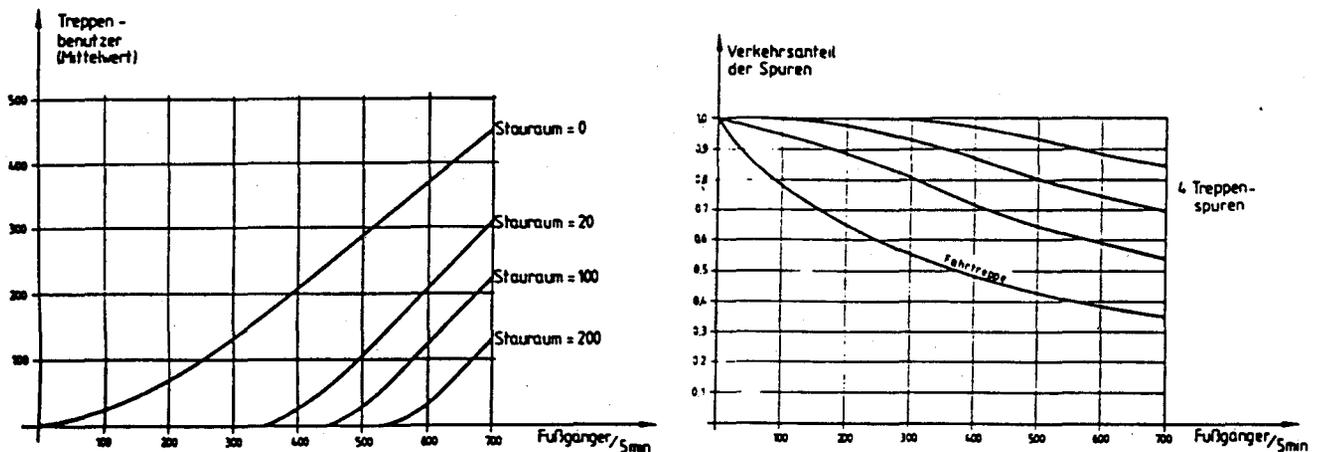


Abb. 66: Simulation der Aufteilung eines Fussgängerstromes auf die Rolltreppe ($L_R = 1.25$ P/s) und eine feste Treppe von 2.40 m nutzbarer Breite ($L_S = 1.1$ P/sm). Links: Fussgängerzahl auf fester Treppe; rechts: Verteilung auf die Spuren (Abbildung: [55]).

4.4 Zulässige Belastung der Verkehrsanlagen

4.41 Das Level-of-Service-Konzept

4.41.1 Grundlagen

Bei der Bemessung einer Fussgängeranlage ist die Verwendung der maximalen Leistungsfähigkeit gemäss 4.3 nicht zulässig, da diese erst bei unangenehm hohen Fussgängerdichten auftritt. Mittels Komfortbetrachtungen muss die Häufigkeit des Auftretens von Belastungsspitzen berücksichtigt werden, indem bei seltenen Belastungsspitzen eine tiefere Qualitätsstufe zugelassen wird als bei Normalbelastung.

Diese Ueberlegungen stehen in Analogie zur Unterscheidung von Leistungsfähigkeit und zulässiger Belastung beim motorisierten Individualverkehr. Unter Leistungsfähigkeit wird die grösste Anzahl Fahrzeuge verstanden, die in einer Stunde in geschlossener Kolonne einen Querschnitt durchfahren können. Die Zulässige Belastung ist jene Verkehrsmenge, die pro Stunde einen Querschnitt passieren kann, ohne dass für Fahrer, Bauwerke und Anlieger Gefahren und unzumutbare Verhältnisse entstehen (nach SN 641 145). Eine detailliertere Unterscheidung ist im angelsächsischen Raum unter dem Namen "Level-of-Service-Konzept" (LOS) gebräuchlich und wurde erstmals 1971 von Fruin für den Fussgängerverkehr adaptiert. Ueberlegungen in ähnlicher Richtung machte allerdings Oeding bereits 1963. Als Kriterien werden allgemein verwendet (nach [140], [179]):

K1	Möglichkeit zur freien Geschwindigkeitswahl
K2	Häufigkeit eines erzwungenen Geschwindigkeitswechsels
K3	Zwang zur Beachtung anderer Fussgänger
K4	Häufigkeit eines erzwungenen Richtungswechsels
K5	Behinderung bei Querung eines Fussgängerstromes
K6	Behinderung bei entgegengesetzter Bewegungsrichtung
K7	Behinderung beim Ueberholen
K8	Häufigkeit unbeabsichtigter Berührungen

Mit diesen Kriterien lässt sich die Benützungsqualität einer Fussgängeranlage messen. Durch die Unterscheidung von Erfüllung beziehungsweise Nichterfüllung der einzelnen Massstäbe bei einer bestimmten Fussgängerdichte lassen sich nun verschiedene Qualitätsstufen definieren. In einem weiteren Schritt kann schliesslich aufgrund der dargestellten Grundabhängigkeiten jedem LOS eine typische Geschwindigkeit und eine Leistungsfähigkeit zugeordnet werden. Die Leistungsfähigkeit der Fussgängeranlage ist dann nicht mehr nur in Funktion von Geschwindigkeit und Dichte, sondern auch der Benützungsqualität bestimmbar.

4.41.2 LOS beim Gehen in der Ebene

Aus der untersuchten Literatur lässt sich unter Zuhilfenahme der oben genannten Qualitätskriterien die folgende detaillierte Unterteilung in die Levels-of-Service A bis I ableiten ([29], [70], [110], [125], [135], [140], [156], [158], [179], [186]):

Tab. 6: Abgrenzung der LOS A bis I gemäss Kriterien K1 bis K8.

<p>LOS A 0.00 bis 0.10 P/m²</p>	<p>K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8</p>	<p>Freie Geschwindigkeitswahl Keine erzwungenen Geschwindigkeitswechsel Beachtung anderer Fussgänger nicht erforderlich Kein erzwungener Richtungswechsel Keine Behinderung bei Querung eines Fussgängerstromes Keine Behinderung bei entgegengesetzter Bewegungsrichtung Keine Behinderung beim Ueberholen Keine unbeabsichtigte Berührung</p>
<p>LOS B 0.10 bis 0.30 P/m²</p>	<p>K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8</p>	<p>Freie Geschwindigkeitswahl Keine erzwungenen Geschwindigkeitswechsel Beachtung anderer Fussgänger erforderlich Kein erzwungener Richtungswechsel Keine Behinderung bei Querung eines Fussgängerstromes Keine Behinderung bei entgegengesetzter Bewegungsrichtung Keine Behinderung beim Ueberholen, aber Richtungswechsel nötig Keine unbeabsichtigte Berührung</p>
<p>LOS C 0.30 bis 0.45 P/m²</p>	<p>K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8</p>	<p>Geschwindigkeitswahl bei Gegenverkehr leicht eingeschränkt Keine erzwungenen Geschwindigkeitswechsel Beachtung anderer Fussgänger erforderlich Gelegentliche Richtungswechsel nötig, vor allem bei Gegenverkehr Bis zur Hälfte der Querungen eines Fussgängerstromes werden behindert Gelegentliche Behinderungen bei entgegengesetzter Bewegungsrichtung Leichte Behinderung beim Ueberholen, Richtungswechsel nötig Keine unbeabsichtigte Berührung</p>
<p>LOS D 0.45 bis 0.60 P/m²</p>	<p>K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8</p>	<p>Geschwindigkeit nicht mehr frei wählbar Vermehrt erzwungene Geschwindigkeitswechsel Beachtung anderer Fussgänger erforderlich Richtungswechsel nötig Ueber die Hälfte der Querungen eines Fussgängerstromes werden behindert Starke Behinderungen bei entgegengesetzter Bewegungsrichtung Starke Behinderung beim Ueberholen, Richtungswechsel nötig Keine unbeabsichtigte Berührung</p>
<p>LOS E 0.60 bis 0.75 P/m²</p>	<p>K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8</p>	<p>Geschwindigkeit deutlich eingeschränkt Häufige erzwungene Geschwindigkeitswechsel Beachtung anderer Fussgänger erforderlich Richtungswechsel nötig Nahezu alle Querungen eines Fussgängerstromes werden behindert Starke Behinderungen bei entgegengesetzter Bewegungsrichtung Ueberholen schwierig Keine unbeabsichtigte Berührung</p>

<p>LOS F 0.75 bis 1.00 P/m²</p>	<p>K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8</p>	<p>Massiv eingeschränkte Geschwindigkeitswahl Häufige erzwungene Geschwindigkeitswechsel Beachtung anderer Fussgänger erforderlich Häufige erzwungene Richtungswechsel Alle Querungen eines Fussgängerstromes behindert Massive Behinderungen bei entgegengesetzter Bewegungsrichtung, Gegenverkehr nahezu unmöglich Ueberholen nur bei gegenseitiger Berührung möglich Keine unbeabsichtigte Berührung</p>
<p>LOS G 1.00 bis 1.50 P/m²</p>	<p>K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8</p>	<p>Keine freie Geschwindigkeitswahl Häufige erzwungene Geschwindigkeitswechsel Beachtung anderer Fussgänger erforderlich Häufige erzwungene Richtungswechsel Alle Querungen eines Fussgängerstromes behindert, mit gegenseitiger Berührung verbunden Massive Behinderungen bei entgegengesetzter Bewegungsrichtung, Gegenverkehr nahezu unmöglich, mit gegenseitiger Berührung verbunden Ueberholen unmöglich Unbeabsichtigte Berührungen</p>
<p>LOS H 1.50 bis 2.00 P/m²</p>	<p>K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8</p>	<p>Keine freie Geschwindigkeitswahl, Gedränge Häufige erzwungene Geschwindigkeitswechsel Beachtung anderer Fussgänger erforderlich Häufige erzwungene Richtungswechsel Alle Querungen eines Fussgängerstromes behindert, mit gegenseitiger Berührung verbunden Massive Behinderungen bei entgegengesetzter Bewegungsrichtung, Gegenverkehr nahezu unmöglich, mit gegenseitiger Berührung verbunden Ueberholen unmöglich Unbeabsichtigte Berührungen häufig</p>
<p>LOS I 2.00 bis 5.00 P/m²</p>	<p>K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8</p>	<p>Keine freie Geschwindigkeitswahl, Stillstand bei etwa 5 P/m² Häufige erzwungene Geschwindigkeitswechsel, stossweise Fortbewegung Beachtung anderer Fussgänger erforderlich, Verhalten wie in Kolonne Häufige erzwungene Richtungswechsel Querungen unmöglich Gegenverkehr unmöglich Ueberholen unmöglich Unbeabsichtigte Berührungen unvermeidbar</p>

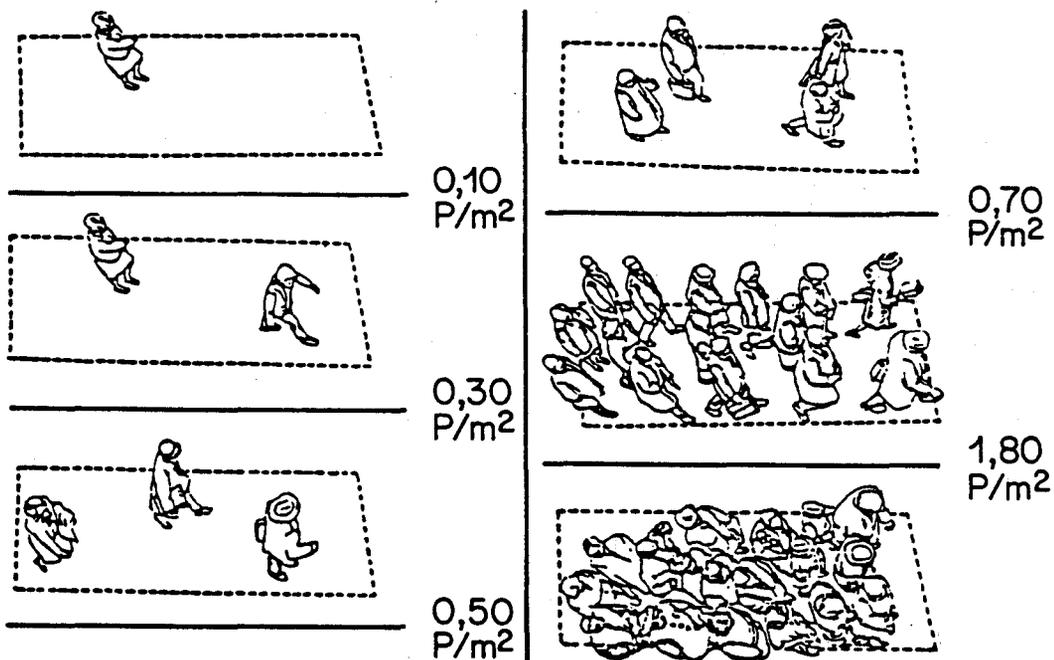


Abb. 67: Darstellung verschiedener Fussgängerdichten (Abgrenzung nicht identisch mit der hier verwendeten Definition; Abbildung: [179]).

Der Befund kann in folgende Kurzform gebracht werden:

Tab. 7: Definition und Charakterisierung der verschiedenen Levels-of-Service beim Gehen in der Ebene.

LOS	Dichte P/m ²	Kriterium								Gesamtcharakterisierung
		K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	
A	0.00-0.10	+	+	+	+	+	+	+	+	absolut freie Bewegung
B	0.10-0.30	+	+	=	+	+	+	+	+	freie Bewegung
C	0.30-0.45	=	+	=	=	=	=	=	+	schwache Behinderung
D	0.45-0.60	=	=	=	=	-	-	-	+	mässige Behinderung
E	0.60-0.75	-	-	-	=	-	-	-	+	starke Behinderung
F	0.75-1.00	-	-	-	-	-	-	-	+	dichter Verkehr
G	1.00-1.50	-	-	-	-	-	-	-	=	mässiges Gedränge
H	1.50-2.00	-	-	-	-	-	-	-	-	starkes Gedränge
I	2.00-5.40	-	-	-	-	-	-	-	-	massives Gedränge

Legende: + gut
= mittelmässig
- schlecht

Die Benützungsqualität verschlechtert sich bis zu einer Fussgängerdichte von 1.0 P/m^2 rapide und reagiert somit gerade im tiefen Dichtebereich äusserst empfindlich auf kleine Belastungsänderungen. Gleichzeitig tritt ein starker Geschwindigkeitsverlust ein. In [110] wird darauf hingewiesen, dass unter städtischen Verhältnissen keine Dichten von über 2.6 P/m^2 beobachtet wurden. Für die Dimensionierung werden Verkehrsdichten bis 0.6 P/m^2 als akzeptabel betrachtet. Eine Dichte von über 1.0 P/m^2 darf nur in den seltensten Fällen in Rechnung gestellt werden. Der Zwischenbereich von 0.6 bis etwa 1.0 P/m^2 lässt sich für kurzzeitige Stossbelastungen akzeptieren.

4.41.3 LOS beim Gehen auf Treppen

Die Benützungsqualität von Treppen ist noch unzureichend dokumentiert. Die einzige umfassende Auskunft enthält [85] sowie daraus abgeleitet und vereinfacht [140]. Die Zuordnung der Verkehrsdichten zu den einzelnen Qualitätsklassen bleibt daher eine Abschätzung. Erkennbar ist in [85] wie auch in der Dichte/Geschwindigkeitskurve, dass Fussgänger auf Treppen für denselben Grad des Wohlbefindens eine höhere Verkehrsdichte in Kauf nehmen als in der Ebene. Parallel dazu ist die Geschwindigkeitsabnahme bei kleiner Fussgängerdichte geringer. Die Qualitätsgrenzen verschieben sich daher etwas gegen den höheren Dichtebereich. Die folgende Festlegung der Klassengrenzen berücksichtigt zusätzlich, dass der prozentuale Geschwindigkeitsverlust von Klassengrenze zu Klassengrenze ähnlich wie in der Ebene sein soll.

Tab. 8: Definition und Charakterisierung der verschiedenen Levels-of-Service beim Gehen auf Treppen.

LOS	Dichte P/m^2	Kriterium								Gesamtcharakterisierung
		K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	
A	0.00-0.20	+	+	+	+	+	+	+	+	absolut freie Bewegung
B	0.20-0.60	+	+	=	+	+	+	+	+	freie Bewegung
C	0.60-0.75	=	+	=	=	=	=	=	+	schwach Behinderung
D	0.75-0.90	=	=	=	=	-	-	-	+	mässige Behinderung
E	0.90-1.15	-	-	-	=	-	-	-	+	starke Behinderung
F	1.15-1.65	-	-	-	-	-	-	-	+	dichter Verkehr
G	1.65-2.15	-	-	-	-	-	-	-	=	mässiges Gedränge
H	2.15-2.60	-	-	-	-	-	-	-	-	starkes Gedränge
I	2.60-5.40	-	-	-	-	-	-	-	-	massives Gedränge

Legende: + gut
= mittelmässig
- schlecht

4.42 Bemessung mit zulässiger Belastung

4.42.1 Belastungen in Abhängigkeit von der Auftretenswahrscheinlichkeit

Ein maximaler LOS kann nicht für jeden Lastfall einer Anlage angeboten werden, namentlich nicht bei Fussgängeranlagen mit stossweiser Belastungscharakteristik (Treppen in U-Bahn- oder S-Bahn-Stationen). Die zu wählende Qualitätsstufe hängt vielmehr mit der Auftretenshäufigkeit zusammen, denn je seltener eine bestimmte Belastung überschritten wird, desto tiefer darf der jeweilige Dimensionierungs-LOS sein. Die Belastungsspitzen entstehen durch ein pulkartiges Auftreten der Fussgänger. Im Normalfall ist die Grösse dieser Pulks nicht bekannt, weshalb man sich mit einer Dauercurve der Anlagenbelastung behelfen muss. Die Dauercurve gibt an, wie häufig ein bestimmter Belastungswert unterschritten wird. Nach Angaben von [47] werden die Belastungsspitzen bei einer Mittelwertbildung über mehr als zwei Minuten praktisch vollständig ausgeglichen, weshalb ein über diese Zeitspanne ausgemittelter Wert für die Dimensionierung ungeeignet ist. Als Auflösungsschärfe bietet sich deshalb etwa eine Minute an. Die LOS-Stufen müssen nun mit der Dauercurve der Anlagenbelastungen in Verbindung gebracht werden. Aus den zugehörigen Leistungsfähigkeiten und Geschwindigkeiten der Anlage lässt sich der massgebende Fall ermitteln.

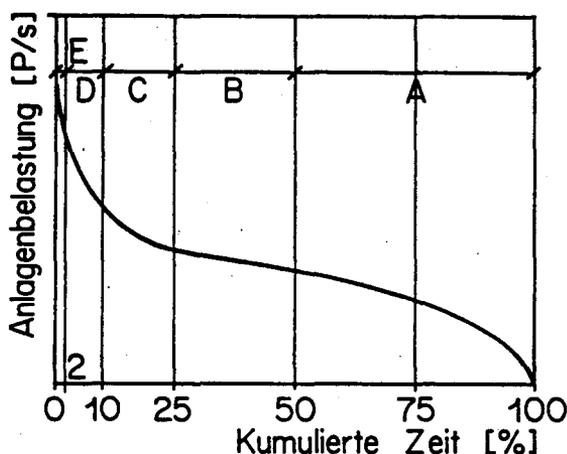


Abb. 68: Prinzip einer detaillierten Dimensionierung mit der Dauercurve einer Anlagenbelastung und den zugeordneten LOS (Abbildung: IVT).

Leider fehlen derzeit noch standardisierte Dauercurven für Fussgängeranlagen. Beispielhaft dargestellt hat aber [47] die im Zeitverlauf schwankende Beanspruchung der Treppenanlagen, namentlich in der Nähe öffentlicher Verkehrsmittel.

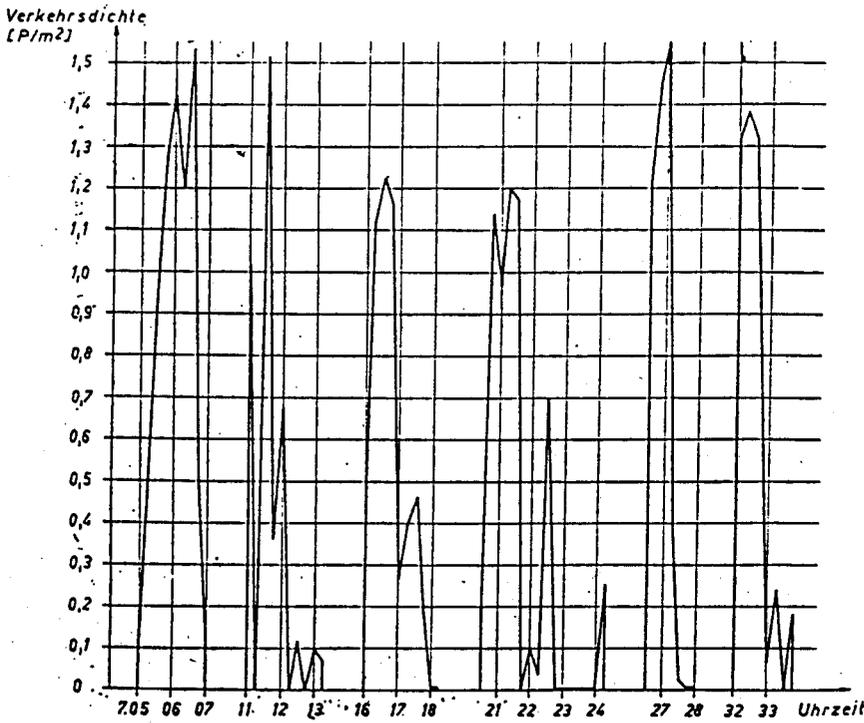


Abb. 69: Verkehrsdichte auf einer Treppe während der Verkehrsspitze [47].

Auch die Leistungsfähigkeit von Rolltreppen wird im Tagesverlauf nur unvollständig ausgenutzt. Es ist davon auszugehen, dass sie während der halben Betriebszeit ohne Last laufen und nur etwa während 2 % der Betriebszeit voll ausgelastet sind [77]. Daraus lassen sich Anhaltspunkte für die Anlagenbelastung im Tagesverlauf gewinnen.

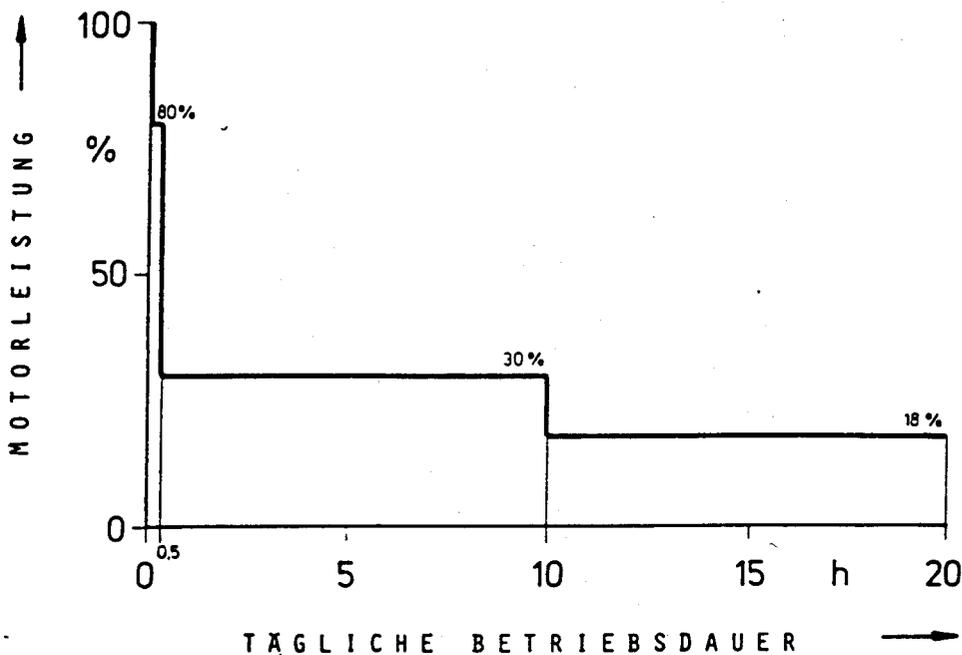


Abb. 70: Belastungsprofil einer aufwärtslaufenden Rolltreppe (Abbildung: [77]).

4.42.2 Belastung durch definierte Pulks

Sind die Belastungsspitzen üblicherweise nur als Häufigkeitswerte bekannt, so lässt sich eine pulkweise Belastung, welche vor allem durch öffentliche Verkehrsmittel entsteht, in ihrer Grösse und ihrem Verlauf recht gut abschätzen. Bei gegebener Zugs- und Perronlänge, definierter Lage der Abgänge, bekannter Zahl der Aussteiger an jeder Stelle des Zuges und ebenfalls bekannter Türleistungsfähigkeit lässt sich mit Hilfe der Fussgängergeschwindigkeit eine Zuströmfunktion ermitteln. Kann die Zahl der Aussteiger als konstant über die gesamte Zuglänge angenommen werden, so bildet die Zuströmfunktion ein Rechteck. Für die Geschwindigkeit auf dem Perron, welche die Zuströmfunktion mitbestimmt, hat [121] im Fernverkehr die sehr tiefen Werte von 0.6 bis 1.0 m/s gefunden. Dieser Zuströmfunktion steht die Leistungsfähigkeit der Treppenanlage gegenüber. Liegt die Grösse des Zustromes über deren Leistungsfähigkeit, so bildet sich ein Rückstau der Fussgänger.

Zur Dimensionierung kann nun eine maximale Ablaufzeit t_A vorgegeben werden, innerhalb derer alle Fahrgäste das Perron verlassen haben müssen. Daraus errechnet sich die notwendige nutzbare Breite:

$$(32) \quad B_N = \frac{F}{L_s \cdot t_A}$$

wobei F Gesamtzahl der abfliessenden Fussgänger beziehungsweise Pulkgrösse [P]
 t_A Zulässige Ablaufzeit [s]

Muss mit Gegenverkehr gerechnet werden, so ist die nutzbare Breite B_N um mindestens eine Spurbreite B_S zu vergrössern. Wie bereits früher dargestellt kommt im weiteren ein Betrag B_H für die Verlustbreite hinzu, woraus sich schliesslich die Bruttobreite bei schwachem Gegenverkehr ergibt:

$$(33) \quad B_B = \frac{F}{L_s \cdot t_A} + B_S + n_H \cdot B_H$$

wobei B_S Breite einer Gehspur [m]
 n_H Zahl der Begrenzungen der Fussgängerfläche, meist 2 [-]

Die Grösse der maximal zulässigen Ablaufzeit kann sich aus Komfortüberlegungen ergeben oder aber aus der Notwendigkeit, bestimmte Umsteigezeiten einzuhalten.

4.42.3 Generelle Dimensionierungswerte

Den in 4.41.2 und 4.41.3 abgegrenzten Qualitätsstufen lassen sich die in der folgenden Tabelle zusammengestellten charakteristischen Geschwindigkeiten und Leistungsfähigkeiten zuordnen:

Tab. 9: Geschwindigkeiten und Leistungsfähigkeiten beim Gehen in der Ebene und auf Treppen in Abhängigkeit von der Qualitätsklasse.

LOS	Dichte [P/m ²]			Geschwindigkeit [m/s]			Leistungsfähigkeit [P/sm]		
	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]
A	0.05	0.10	0.10	1.34	0.61	0.69	0.07	0.06	0.07
B	0.20	0.40	0.40	1.34	0.61	0.69	0.27	0.24	0.28
C	0.38	0.68	0.68	1.33	0.60	0.68	0.50	0.41	0.47
D	0.53	0.83	0.83	1.29	0.60	0.68	0.68	0.49	0.56
E	0.68	1.03	1.03	1.23	0.58	0.66	0.83	0.59	0.68
F	0.88	1.40	1.40	1.12	0.52	0.60	0.99	0.73	0.84
G	1.25	1.90	1.90	0.93	0.44	0.50	1.16	0.83	0.96
H	1.75	2.38	2.38	0.70	0.36	0.41	0.94	0.85	0.98
I	3.95	4.00	4.00	0.16	0.13	0.15	0.65	0.52	0.61

- [1] Gehen in der Ebene
 [2] Gehen auf Treppen, aufwärts
 [3] Gehen auf Treppen, abwärts

In den meisten Fällen dürfte es genügen, einen mittleren Qualitätsstandard bei Bemessungsbelastung zu definieren und für die Spitzenfrequenzen gewisse Qualitäts- und Leistungsreserven vorzusehen. Die Richtwerte müssen sicherstellen, dass in vergleichbaren Fällen sowohl bei Treppen als auch bei ebenen Fussgängeranlagen ein homogenes Qualitätsniveau angewandt wird. Zudem ist ein genügender Abstand vom instabilen Bereich des Fundamentaldiagramms zu gewährleisten, damit kein Rückstau auftritt.

Die wenigen Hinweise in der Literatur nennen bei ebene Fussgängeranlagen für den Normalfall eine Bemessungsdichte von etwa 0.3 P/m², für den Stossverkehr etwa 0.6 P/m² und für Spitzenbelastungen an Engpässen maximal 1.0 P/m² ([14], [110], [125], [156]). Bei einer Dichte von 1.0 P/m² liegt insofern eine weitere Grenze, als dass die Fussgänger oberhalb von ihr auf die Fahrbahn auszuweichen beginnen [152]. Nach [133] sollen Unterführungen aus psychologischen Gründen nicht für Fussgängerdichten von über 0.3 P/m² bemessen werden. Bei Treppen gilt gemäss [156] ein Wert von etwa 1.3 P/m² und gemäss [14] ein solcher von rund 1.7 P/m². Letzterer erscheint als eher zu hoch. Basierend auf Tabelle 9 ergeben sich nämlich folgende Richtwerte:

Tab. 10: Bemessungsrichtwerte für Fussgängeranlagen.

Fall	LOS	Dichte [P/m ²]	Geschwindigkeit [m/s] auf / ab	Leistung [P/ms] auf / ab
Ebene				
• Normalverkehr	B	0.2	1.34	0.27
• Stossverkehr	D	0.5	1.30	0.65
• Engpässe	F	0.9	0.81	0.73
Treppe				
• Normalverkehr	B	0.4	0.61 / 0.69	0.24 / 0.28
• Stossverkehr	D	0.8	0.60 / 0.68	0.48 / 0.55
• Engpässe	F	1.5	0.51 / 0.58	0.76 / 0.87

Für Fussgängerunterführungen mit reinem Tunnelcharakter erwähnt [66] einen Bemessungswert von 0.28 P/sm und eine Obergrenze der Belastung von 0.42 P/sm. Hat die Unterführung Passagencharakter mit Schaufenstern und Ladengeschäften, so sinken die Werte auf etwa 0.19 P/sm beziehungsweise 0.29 P/sm. Die obere der beiden Angaben ist jeweils als Grenze für kurzzeitige Stossbelastungen zu betrachten, oberhalb derer ein Gedränge entsteht [66]. Die tieferen Werte von Passagen kommen durch Fussgänger zustande, welche vor Schaufenstern stehen und durch solche, welche den Hauptstrom queren [67].

5. Zusammenfassung und Folgerungen

5.1 Zusammenfassung der wichtigsten Fakten

5.11 Eigenschaften der Fussgänger

5.11.1 Geschlechts- und Altersverteilung

Das verkehrstechnische Verhalten einer Fussgängergruppe wird bestimmt durch das Geschlechterverhältnis, die Altersverteilung, die Grössenverteilung sowie durch biomechanische und physiologische Eigenschaften. Das natürliche Geschlechterverhältnis beträgt bei Neugeborenen 51.2 % Knaben zu 48.8 % Mädchen. Die höhere Sterblichkeit der Männer verschiebt dieses Verhältnis allmählich zugunsten der Frauen, sofern keine Wanderungsbewegungen vorliegen. Die Lebenserwartung nimmt seit Jahren konstant zu und liegt für Frauen bei 81 und für Männer bei 74 Jahren. Zurückzuführen ist diese Entwicklung auf die kleinere Sterblichkeit in jüngeren Jahren.

5.11.2 Grösse und Körperproportionen

Die Grösse des menschlichen Körpers ist eine Funktion des Alters, des Geschlechts, des Jahrgangs und der Rasse. Sie wächst um 1.1 cm pro Jahrzehnt und beträgt in Mitteleuropa derzeit für Männer 178.5 cm und für Frauen 166.0 cm. Die Körpergrösse von erwachsenen Frauen liegt um etwa 7 % unter jener von Männern. Die Bevölkerung von Frankreich ist um etwa 3 %, jene von Italien um etwa 4 % kleiner. Mädchen erreichen ihre endgültige Körpergrösse mit 17 Jahren, Knaben mit 18 Jahren.

Die Beinlänge eines Mannes entspricht 53 % der Körpergrösse oder 94.6 cm, jene einer Frau etwa 52 % oder 86.3 cm. Die Körperbreite liegt im Mittel bei 0.46 m und die Körpertiefe bei 0.23 m. Daraus ergibt sich ein Mindestplatzbedarf von 0.85 m²/P und eine Fussgängerdichte von 11.8 P/m². Unter praktischen Bedingungen sind 0.15 m²/P oder 6.6 P/m² erforderlich.

5.11.3 Bewegungsablauf

Die Bewegung des Beines lässt sich als Pendelbewegung idealisieren, weshalb die Gehgeschwindigkeit mit der Bein-Eigenfrequenz von etwa 2 Hz zusammenhängt. Zu unterscheiden ist zwischen den Fortbewegungsarten Gehen und Laufen. Beim Gehen ist immer mindestens ein Fuss in Berührung mit dem Boden, während beim Laufen eine Flugphase auftritt. Die Gehgeschwindigkeit kann erhöht werden durch die Verlängerung der Schritte, die Vergrösserung der Frequenz oder beides gleichzeitig. Im tiefen Geschwindigkeitsbereich ist letzteres der Fall. Ueber einer Gehgeschwindigkeit von 2.5 m/s und einer Laufgeschwindigkeit von 6.0 m/s wächst nur noch die Frequenz. Die kleinstmögliche Geschwindigkeit beträgt 0.5 m/s.

5.11.4 Energieverbrauch

Grundumsatz und Arbeitsumsatz bilden den Gesamtenergieverbrauch eines Menschen. Der Grundumsatz ist der Energiebedarf bei absoluter Ruhe. Er beträgt bei Männern etwa 300 kJ/h und bei Frauen 250 kJ/h. Der Arbeitsumsatz ist definiert als der Gesamtumsatz abzüglich des Grundumsatzes. Der Wirkungsgrad von Muskeln liegt zwischen 20 und 30 %. Beim Gehen wird die Energie weitgehend zum Heben und Senken des Körpers sowie zur Beschleunigung und Verzögerung bei jedem Schritt aufgewendet. Die Geschwindigkeit hat daher einen kleinen Einfluss auf den Energieaufwand für eine bestimmte Strecke. Intuitiv wird die Schrittfrequenz mit dem kleinsten Energieverbrauch gewählt. Das Energieminimum des Gehens liegt bei etwa 5 km/h und beträgt 274 kJ/km, jenes des Laufens bei 14 km/h und 250 kJ/km. Zwischen 7 und 9 km/h sind Gehen und Laufen energetisch gleichwertig, weshalb hier der Uebergangsbereich der beiden Bewegungsformen liegt. Bei Steigungen von 10 bis 12 Prozent verdoppelt sich der Energieverbrauch, bei Gefällen gleicher Grösse halbiert er sich. Bei einem Gefälle von 25 % liegt der Energieverbrauch wieder über dem Wert auf ebener Strecke. Der Energiemehrverbrauch beim Aufwärtsgehen auf Treppen beträgt bei mittleren Geschwindigkeiten etwa 350 %, während beim Abwärtsgehen ein Minderverbrauch von etwa 25 % eintritt.

5.11.5 Leistungsfähigkeit

Die Leistungsfähigkeit eines Menschen ist seine Fähigkeit, mit den Muskeln Leistungen zu erbringen. Frauen sind demnach um etwa einen Drittel weniger leistungsfähig als Männer. Das Maximum seiner körperlichen Leistungsfähigkeit erreicht der Mensch mit 18 bis 20 Jahren. Bis zum 25. Altersjahr bildet sich die Muskelkraft bereits spürbar zurück. Im Alter von 80 Jahren wird der Stand eines zehnjährigen Kindes erreicht. Besonders von der Rückentwicklung betroffen ist die Bein- und Rumpfmuskulatur. Die Leistungsfähigkeit unterteilt man mit abnehmender Zugriffsmöglichkeit des menschlichen Willens in automatisierte Leistungen, physiologische Leistungsbereitschaft, Einsatzreserven und autonom geschützte Reserven. Leistungsmaxima treten auf am frühen Vormittag und frühen Abend, Leistungsminima am Nachmittag und in der Nacht. Am leistungsfähigsten ist der Mensch zwischen April und Juni sowie zwischen Mitte August und Ende September, während sich der Juli und die Zeit zwischen November und Februar ungünstig auswirken.

Der menschliche Organismus muss seine Körpertemperatur in einem engen Regelbereich halten. Die mit der Umgebung ausgetauschten Wärmeströme müssen daher mittelfristig im Gleichgewicht sein. Dazu stehen die Konvektion, die Strahlung und die Schweissverdunstung zur Verfügung. An ein gegebenes Aussenklima kann sich der Mensch nur durch Veränderung seiner Kleidung und seiner Aktivität anpassen. Mit zunehmender Aussentemperatur sinkt daher seine Leistungsfähigkeit.

Die Einflüsse der Höhenlage bestehen in der unterschiedlichen Strahlungsintensität, geringerer Luftdichte sowie tieferem Wasserdampf- und Sauerstoffpartialdruck. Die Dauerleistungsfähigkeit nimmt bereits bei 1000 m.ü.M. spürbar ab, während die Muskelkraft bis etwa 3000 m.ü.M. nicht geschmälert wird. Soll die Dauerleistung in einer anderen als der gewohnten Höhenlage etwa erhalten bleiben, so ist eine Akklimatisationszeit von zwei Wochen pro 1000 m Höhendifferenz nötig. Trotzdem verbleibt bei Meereshöhen um 2000 m ein Leistungsabfall von rund 6 %.

5.11.6 Behinderungen

Ein Mensch gilt bezüglich seiner Bewegungsmöglichkeiten im Verkehr als behindert, wenn eine oder mehrere der dabei erforderlichen Fähigkeiten reduziert ist. Die Behinderten lassen sich einteilen in Körperbehinderte, Sehbehinderte, Hörbehinderte und geistig Behinderte. Bei den Körperbehinderten unterscheidet man weiter Gehbehinderte, Rollstuhlfahrer und Armbehinderte. Schwierigkeiten bei der Benützung von Verkehrsanlagen haben nicht nur Behinderte im engeren Sinn, sondern auch ältere Menschen, werdende Mütter, Fussgänger mit Kinderwagen, Personen mit sperrigem Gepäck und Reisende mit Gepäckkarren oder Einkaufswagen. Verkehrsbehindert im weitesten Sinn sind 25 bis 30 % der Bevölkerung, behindert im engeren Sinn etwa 8 %. Den öffentlichen Verkehr nicht benützen können 2 %. 0.8 % sind gänzlich von der Verkehrsteilnahme ausgeschlossen und 0.3 bis 0.5 % sind Rollstuhlfahrer. Häufigkeit und Grad der Behinderungen wächst mit steigendem Alter exponentiell an. Zwischen dem fünfzigsten und dem achtzigsten Altersjahr verzehnfacht sich beispielsweise der Anteil, welcher eine Treppe nicht mehr zu bewältigen vermag. Künftig ist durch steigendes Durchschnittsalter, vermehrte Verkehrsunfälle, zunehmende gesundheitliche Schäden, sitzende Tätigkeit sowie die grössere Mobilität der Senioren mit mehr Behinderten im Verkehr zu rechnen.

Die Geschwindigkeit von Rollstuhlfahrern beträgt etwa 0.5 m/s. Gehbehinderte Personen vermögen über 3 m eine Neigung von 11 % zu überwinden. Bei längeren Rampen muss die Neigung unter 8 % betragen. Rollstuhlfahrer bewältigen aus eigener Kraft 5 %; grössere Neigungen sind nur über kürzeste Distanzen zulässig. Spaltbreiten und Höhenunterschiede von 30 bis 50 mm sind für Rollstuhlfahrer ohne fremde Hilfe zulässig. Gehbehinderte an einem Stock benötigen eine Spurbreite von 0.70 m, Gehbehinderte an zwei Stöcken eine solche von 0.90 m. Sehbehinderte mit Taststock brauchen eine Gehwegbreite von mindestens 0.80 m. Die minimale Durchfahrtsbreite für einen Rollstuhl beläuft sich auf 0.80 m. Für eine Drehung des Rollstuhles um 90 Grad steigt der Platzbedarf auf ein Quadrat von 1.40 m Kantenlänge, während für eine Drehung um 180 Grad eine Spurbreite von 1.40 m und eine freie Länge von 1.70 m erforderlich ist.

5.12 Geschwindigkeitsverhalten der Fussgänger

5.12.1 Mittelwerte

Der Durchschnitt der in der verkehrstechnischen Literatur angegebenen Fussgängergeschwindigkeiten liegt bei 1.34 m/s (4.83 km/h) und stimmt mit dem Energieminimum der Gehbewegung überein. Bei der Ueberquerung von Strassen beträgt die mittlere Geschwindigkeit 1.28 m/s (4.60 km/h).

5.12.2 Einfluss der Fussgängereigenschaften

Die Gehgeschwindigkeit von Männern ist im Mittel um 10.9 % höher als jene von Frauen. Dies ergibt für Männer eine mittlere Geschwindigkeit von 1.41 m/s und für Frauen eine solche von 1.27 m/s. Die höchste Gehgeschwindigkeit erreicht der Mensch mit etwa 20 Jahren. Sie bildet sich oberhalb von etwa 50 Jahren deutlich zurück und entspricht mit 80 Jahren jener eines fünfjährigen Kindes. Die Abhängigkeit vom Alter verläuft gleich wie bei der körperlichen Leistungsfähigkeit.

5.12.3 Einfluss der Begleitumstände

Verkehrsplanerisch unterteilt man die Ortsveränderungen in die vier Kategorien Pendlerverkehr, Einkaufsverkehr, Nutz- und Werkverkehr und Freizeitverkehr. Mit 1.61 m/s ist der Nutzverkehr am schnellsten, gefolgt vom Pendlerverkehr mit 1.49 m/s, dem Einkaufsverkehr mit 1.16 m/s und dem Freizeitverkehr mit 1.10 m/s. Zwischen der Tageszeit und der Fussgängergeschwindigkeit besteht eine Abhängigkeit, indem die Fussgängergeschwindigkeit während der Morgenspitze am höchsten ist, gefolgt von der Mittagszeit und der Abendspitze. Während des Vormittags und am frühen Nachmittag dagegen sind deutliche Einbrüche zu erkennen.

Die Temperatur übt einen massgeblichen Einfluss auf die Fussgängergeschwindigkeit aus. Bei 25 Grad C beträgt letztere nur noch etwa 92 % des Mittelwertes, während sie bei 0 Grad C auf etwa 109 % ansteigt. Ein Einfluss der Fussweglänge ist im relevanten Längenbereich nicht zu erkennen, wohl aber auf Treppen.

5.12.4 Charakteristiken der Anlage

Die Horizontalgeschwindigkeit auf Rampen ist stark neigungsabhängig und fällt bei 10 % Steigung auf 1.19 m/s und bei 15 % Steigung auf 1.07 m/s. In einem Gefälle von 10 bis 15 % steigt die Geschwindigkeit leicht auf 1.40 m/s. Die Horizontalgeschwindigkeit von Treppen liegt aufwärts bei 0.610 m/s und abwärts bei 0.694 m/s, was im Mittel etwa 2.1 Schritten pro Sekunde entspricht.

5.12.5 Einfluss der Fussgängerdichte

Die Abhängigkeit zwischen der Fussgängerdichte und der Geschwindigkeit geht in die Berechnung der Leistungsfähigkeit von Fussgängeranlagen ein und ist besonders dort zu beachten, wo der Zeitbedarf eines Fussgängers von Belang ist. Die Geschwindigkeit folgt der Verkehrsdichte mit einem doppel-S-förmigen Verlauf. Der entscheidende Geschwindigkeitsabfall in der Ebene erfolgt zwischen etwa 0.5 und 2.0 P/m². Bei 1.5 P/m² sinkt die Fussgängergeschwindigkeit bereits auf die Hälfte. Ueber etwa 5.4 P/m² kommt jegliche Fussgängerbewegung zum Erliegen. Die Geschwindigkeit auf Treppen reagiert im tiefen Dichtebereich bis etwa 1.0 P/m² toleranter. Die obere Grenze der Fussgängerbewegung wird ebenfalls mit 5.4 P/m² angegeben.

5.12.6 Streuung der Fussgängergeschwindigkeiten

Die Geschwindigkeiten der einzelnen Fussgänger zeigen eine Normalverteilung um den Mittelwert. Die Standardabweichung beträgt 19.3 % des Mittelwertes oder 0.26 m/s. In Einzelfällen kann die Verteilung eine positive Schiefe aufweisen.

5.13 Leistungsfähigkeit von Fussgängeranlagen

5.13.1 Grundlagen der Dimensionierung

Die Leistungsfähigkeit ist definiert als Anzahl der Fussgänger, welche pro Zeiteinheit einen gegebenen Querschnitt passieren können. Als Parameter spielen die Fussgängerdichte, die Geschwindigkeit und die nutzbare Breite eine Rolle. Da die Geschwindigkeit der Fussgänger von der Fussgängerdichte abhängig ist, wird das Maximum der Leistungsfähigkeit nicht bei höchster Geschwindigkeit erreicht, sondern höchste Geschwindigkeit und höchste Leistungsfähigkeit schliessen sich aus. Die Abhängigkeiten von Geschwindigkeit, Verkehrsdichte und Verkehrsmenge sind ähnlich wie beim motorisierten Individualverkehr.

5.13.2 Platzbedarf und nutzbare Breite

Der geometrisch minimale Platzbedarf unter praktischen Verhältnissen lässt eine Fussgängerdichte von 6.6 P/m^2 zu. Natürlicherweise stellt sich eine Fussgängerdichte von etwa 2.0 bis 2.9 P/m^2 ein. Der dynamische Platzbedarf für die Fortbewegung ist grösser als der statische. In Richtung der Bewegung muss der Fussgänger seine Beine auslenken können und einen Sicherheitsabstand wahren. In seitlicher Richtung müssen die Schwankbewegungen des Körpers und seine Breitenverteilung berücksichtigt werden. Als Mittelwert für eine Fussgängerspür ohne Zuschlag für Gepäck werden in der Ebene 0.71 m und auf Treppen 0.60 m gefordert. Mit Berücksichtigung des Gepäcks steigt der Wert für die Ebene auf 0.82 m . Als Längsabstand wird meist ein Wert von 1 m postuliert.

Fussgänger halten gegenüber Wänden einen Mindestabstand ein, der von der Wandbeschaffenheit und der Bewegungsfreiheit des Fussgängers abhängt. In Korridoren sind es 0.25 m zu Betonwänden und 0.20 m zu Metallwänden. Auf Trottoirs halten Fussgänger zu Hauswänden einen Abstand von 0.45 m und zu einem Gartenzaun von 0.35 m ein. Hindernisse sind mit ihrer vollen Breite zuzüglich eines Mindestabstandes von 0.10 m zu berücksichtigen. In Schaufensterbereichen ist die nutzbare Breite um etwa 0.75 m abzumindern.

5.13.3 Leistungsfähigkeit

Der Zusammenhang zwischen der Dichte und der Fussgängergeschwindigkeit lässt sich mit der aus dem Individualverkehr stammenden Formel von Kladek beschreiben. Die maximale Leistungsfähigkeit in der Ebene beträgt unter Normalbedingungen 1.23 P/sm . Sie wird erreicht bei einer Fussgängerdichte von 1.75 P/m^2 und einer Geschwindigkeit von 0.70 m/s . Experimentell wurde Leistungsfähigkeitsgrenze mit 4.33 P/sm bestimmt. Entgegengesetzte Fussgängerströme verursachen einen Leistungsabfall von zwischen 4% bei einem Richtungsverhältnis $50 \%/50 \%$ und 14.5% bei $90 \%/10 \%$. Der jeweils kleinere Verkehrsstrom beansprucht dabei überproportional viel Platz.

Auf Treppen liegt die optimale Fussgängerdichte für das Aufwärts- wie für das Abwärtsgehen bei 2.23 P/m^2 . Die maximale spezifische Leistungsfähigkeit beträgt beim Aufwärtsgehen 0.850 P/sm und beim Abwärtsgehen 0.979 P/sm mit Geschwindigkeiten von 0.38 m/s beziehungsweise 0.44 m/s . Die Leistungsfähigkeit in Steigungsrichtung ist somit um 13% kleiner als jene in Gefällrichtung.

Die theoretische Leistungsfähigkeit von Rolltreppen und Rollbändern ist abhängig von der nutzbaren Breite, der Fussgängerdichte, der Geschwindigkeit der Anlage und der Eigenbewegung der Fussgänger. Eine zweispurige Rolltreppe mit einer Geschwindigkeit von 0.75 m/s vermag theoretisch ohne Eigenbewegung 4.0 P/s zu befördern, mit Eigenbewegung sind es 5.6 P/s. Die praktische Leistungsfähigkeit wird eingeschränkt durch die akzeptierte Maximaldichte von etwa 3 P/m², die Leistungsfähigkeit des Eintrittsquerschnittes sowie die Sicherheit beim Betreten der Rolltreppe. Da die Benutzer beim Betreten einer zu raschen Rolltreppe zögern, erreicht die praktische Leistungsfähigkeit pro m nutzbarer Breite bei etwa 0.70 m/s ihr Maximum mit rund 1.75 P/s. Nur rund 10 % der Fussgänger benutzen unter keinen Umständen die Rolltreppe. Bei einer Rolltreppenauslastung von 50 % weichen die meisten zuströmenden Fussgänger auf die festen Treppen aus.

5.13.4 Zulässige Belastung der Fussgängeranlagen

Bei der Anlagendimensionierung muss der Komfort unter Beachtung der Häufigkeit von Belastungswerten berücksichtigt werden. Eine detaillierte Unterteilung ist im angelsächsischen Raum unter dem Namen "Level-of-Service-Konzept" gebräuchlich. Beurteilungskriterien sind die Freiheit der Geschwindigkeitswahl, die Häufigkeit eines erzwungenen Geschwindigkeitswechsels, der Zwang zur Beachtung anderer Fussgänger, die Häufigkeit eines erzwungenen Richtungswechsels, die Behinderung bei der Querung eines Fussgängerstromes, bei entgegengesetzter Bewegungsrichtung und beim Ueberholen sowie die Häufigkeit unbeabsichtigter Berührungen. Die Benützungsgüte verschlechtert sich bis zu einer Dichte von 1.0 P/m² rapide. Im Normalfall darf daher nur mit einer Dichte von 0.2 P/m², einer Geschwindigkeit von 1.34 m/s und einer Leistung von 0.27 P/sm gerechnet werden. Bei Treppen betragen die analogen Werte (auf/ab) 0.4 P/m², 0.61/0.69 m/s und 0.24/0.28 P/sm. Im Extremfall können auf der Ebene 0.9 P/m² zugelassen werden, was die Geschwindigkeit auf 0.81 m/s senkt und die Leistung auf 0.73 P/sm anhebt. Für Treppen gilt entsprechend eine Maximaldichte von 1.5 P/m² bei einer Geschwindigkeit von 0.51/0.58 m/s und einer Leistungsfähigkeit von 0.76/0.87 P/ms. Der Grenzwert stellt sicher, dass sich die Anlage noch im stabilen Betriebsbereich befindet.

Die schliesslich zu wählende Qualitätsstufe ist für die Dimensionierung wesentlich und hängt mit der Belastungshäufigkeit zusammen. Sind die Belastungswerte in ihrer Grösse nicht genau bekannt, so muss der die LOS mit der Belastungsdauerkurve in Verbindung gebracht werden. Sind dagegen die Pulks von definierter Grösse, so kann eine Anlage auf maximale Abflusszeiten dimensioniert werden.

5.2 Folgerungen und Schwerpunkte weiterer Forschungsarbeiten

Das Fussgängerverhalten ist gesamthaft gut aufgearbeitet. Weitere Forschungsarbeiten sind bei folgenden Fragen zu erwägen:

- Charakteristiken von Gedrängesituationen und Einfluss auf die Leistungsfähigkeit: Es wurde verschiedentlich darauf hingewiesen, dass sich in der Literatur höhere Leistungsfähigkeiten finden als hier dargestellt. Es han-

delt sich meist um Beobachtungen, welche in Gedrängesituationen gemacht wurden und bei welchen sich die Fussgänger im Zeitdruck befanden. Zu prüfen wäre beispielsweise, in welchem Ausmass sich dabei der Platzbedarf pro Fussgänger verändert.

- **Abhängigkeit der Fussgängergeschwindigkeit vom Umgebungsklima:** Die wenigen vorliegenden Angaben, welche sich nur auf die Temperatur beziehen, gestatten keine allgemeingültigen Aussagen zum Zusammenhang von Umgebungsklima und Fussgängergeschwindigkeit. Von Interesse wäre diese Erkenntnis vor allem, um die Richtwerte auf klimatisch unterschiedliche Gebiete übertragen zu können. Sie könnten zudem die Basis zur Erklärung zeitweise auftretender gehemmter Betriebsabläufe im Nahverkehr bilden.
- **Qualitätsstufen beim Begehen von Treppen:** Im Gegensatz zum Gehen in der Ebene wurden die Qualitätsaspekte der Fussgängerdichte auf Treppen erst wenig untersucht. Es wäre angezeigt, diese auf das gleiche Niveau zu heben. Ziel muss es sein, alle Elemente einer Fussgängeranlage auf ein homogenes Qualitätsniveau zu bringen.
- **Verfeinerung der mathematischen Zusammenhänge zwischen den Grössen Fussgängerdichte, Fussgängergeschwindigkeit und Leistungsfähigkeit:** Der mutmassliche Verlauf wird durch die hier verwendete Formel von Kladek noch nicht ganz befriedigend dargestellt, namentlich bei Treppen. Die Aufstellung neuer mathematischer Beziehungen erfordert indessen zusätzliche Beobachtungen.
- **Bewertung verschiedener Anlagentypen durch die Benützer:** In der vorliegenden Arbeit wurde lediglich der Energieverbrauch als Hilfsgrösse zur Erfassung der Akzeptanz von Treppen durch die Fussgänger beigezogen. Es ist denkbar, dass eine Bewertung durch die Fussgänger nochmals andere Resultate erbringt. Von Belang wäre diese Kenntnis namentlich in der Beurteilung verschiedener Varianten von Fussgängerführungen bezüglich der Routenwahl und in der Abschätzung des Einzugsbereiches von Haltestellen.
- **Gesetzmässigkeiten flächenhafter Fussgängeranlagen mit dispersen Benutzerströmen:** Die bisherigen Fussgängeruntersuchungen behandeln lineare Fussgängeranlagen mit mehr oder weniger gerichteten Fussgängerströmen (Trottoirs, Gänge, Rampen, Treppen, Fusswege). Es finden sich aber keine quantitative Hinweise zu flächenhaften Anlagen mit ungerichteten Strömen wie etwa Bahnhofshallen, Verteilgeschosse in Unterführungen oder Bahnhofvorplätze.
- **Rolltreppen und Rollbänder:** Die Verhältnisse bei Rolltreppen und Rollbändern sind präziser aufzuarbeiten. Insbesondere bedarf die dargestellte maximale Leistungsfähigkeit einer Präzisierung. Genauer zu untersuchen ist weiter das Zusammenspiel von Eintrittskapazität und Rolltreppenkapazität.

Eine Schliessung dieser Lücken wäre wünschbar und könnte dem projektierenden Ingenieur einige noch verbleibende Fragen beantworten.

A. Anhang

A.1 Literatur

- [1] Arbeits- und Forschungsgemeinschaft für Strassenverkehr und Verkehrssicherheit: Die Sicherung des Fussgängerverkehrs, Buchreihe Band XXIX, Köln 1976
 - [2] Arbeitsgruppe Optimierung der Einstiegsverhältnisse CH: Provisorische Fassung von Teilbericht 1: Einstieg in Reisezugwagen - zu beachtende Maße. Bern, Juni 1985.
 - [3] Allos, A.E./Mohamad, A.R.: Usage of Pedestrian Footbridges, in: Traffic Engineering & Control May 1983, S. 269-273
 - [4] Allouche, Jean Francois: Approach to Probability Distribution of Value of Walking Time and Pedestrian Circulation Models, in: Highway Research Record 392, S. 121 - 133, Washington D.C. 1972
 - [5] Annesley, T./Dix, M./Bewick, A./Buchanan, P.: Development and Application of Pedestrian Assignment Models in London Railway Station Studies, in: Traffic Engineering + Control, July/August 1989, S. 345 - 352
 - [6] Antoniou, James: Planning for Pedestrians, in: Traffic Quarterly, January 1971, S. 55-71
 - [7] Aufzüge- und Elektromotorenfabrik Schindler & Cie. AG: Erfahrungen mit Rolltreppen in Unterführungen, in: Strasse und Verkehr, 5/1961, S. 276 - 279
 - [8] Australian Road Research Board: DoT Pedestrian Conference - Program and Papers, Sydney 1978
 - [9] Ashford, Norman/Holloway, Frank M.: The Effect of Age on Urban Travel Behaviour, in: Traffic Engineering, April 1971, S. 46-49, 67
 - [10] Asmussen, Dr. Gerhard: Physiologische Grundlagen von Haltung und Bewegung, Verlag Chemie, Weinheim/New York 1979
 - [11] Astrand, Irma: Arbeitsphysiologie, Schattauer Verlag, Stuttgart/New York 1987
 - [12] Association pour le développement des techniques de transport, d'environnement et de circulation: Usage et aménagement des rues, compte rendue, Paris 7./8. Dezember 1983
 - [13] Baerwald, John E.: Traffic Engineering Handbook, Third Edition, Institute of Traffic Engineers, Washington DC 1965
 - [14] Barrette, R.: Moving Pedestrians in a Traffic-fress Environment, in: Traffic Engineering & Control September 1972, S. 235-238
 - [15] Berg, Dr. Walter: Gestaltung von Zugängen zu den Haltestellen und Bahnhöfen - Verkehrstechnisch-betriebliche Belange, Arbeitsgemeinschaft Recht für Fussgänger, Zürich 1988
 - [16] Berger, Dr. Wiltrud u.a.: Haltung und Bewegung beim Menschen - Physiologie, Pathophysiologie, Gangentwicklung und Sporttraining, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York/Tokyo 1984
 - [17] Blennemann/Brandenburg: Komfortfragen bei der Benutzung öffentlicher Verkehrsmittel und deren Beurteilung durch die Fahrgäste, in: Verkehr und Technik 2/1979, S. 39-44 und 3/1979, S. 106-108
-

-
- [18] Blennemann, Dr. Friedhelm: Behinderte und alte Personen im öffentlichen Nahverkehr - Beispiele für Massnahmen und Erfahrungen im Ausland, in: Verkehr und Technik 4/1981, S. 134 - 139
- [19] Blennemann/Brandenburg/Grossmann: Fahrgastfreundliche und behindertengerechte Linienbusse - Erarbeitung von Empfehlungen für die Entwicklung von fahrgastfreundlichen und behindertengerechten Linienbussen auf der Grundlage von Erhebungen nach einheitlichen und vergleichbaren Bewertungskriterien, STUVA, Köln September 1991
- [20] Biermann, Jean-Louis: La capacité des divers moyens de transports routiers, in: Strasse und Verkehr 7/1967, S. 368-370
- [21] Boesch, Hans/Dietrich, Karl: Verkehrsprobleme körperlich Behinderter - Bauliche Massnahmen im Strassenbau, Bericht zu den Vorschlägen der Schweizerischen Kommission für Rehabilitation, ETH Zürich, Lehrstuhl für Verkehrsingenieurwesen, Zürich 1971
- [22] Bölkow, Dr. Ludwig: Ein Jahrhundert Flugzeuge - Geschichte und Technik des Fliegens, VDI-Verlag, Düsseldorf 1990
- [23] Bollhöfer, Klaus-Dieter: Betriebliche Hinweise zum Einsatz von Fahrtreppen, in: Verkehr und Technik 8/1977, S. 312 - 316
- [24] City of Boulder: Fifth Annual Pedestrian Conference September 20 and 21, 1984, The City on its Feet, Transportation Division, City of Boulder 1984
- [25] Bovy, Prof. Philippe H./Vuille, J.: Réseaux et espaces piétonniers, EPF Lausanne, Institut de technique des transports, Lausanne 1973
- [26] Bovy, Prof. Philippe H.: Le rôle du piéton dans les transports urbains, Sonderdruck aus Bulletin technique de la Suisse romande, Nr. 6, 14. März 1974, Lausanne 1974
- [27] Bovy, Prof. Philippe H.: Pedestrian Planning and Design 1965-1975 - Bibliography, University of California, Institut of Transportation and Traffic Engineering, Berkeley 1975
- [28] Braaksma, Prof. John P.: Surveying Pedestrian Traffic - Results of the 'Time-Stamping' Method used at Winnipeg Airport, in: Traffic Engineering & Control, June 1978, S. 274-276
- [29] Brändli, Prof. Heinrich/Berg, Walter: Einfluss von neuen Bahnhofszugängen auf das Fahrgastverhalten - Eine Vorher/Nachher-Untersuchung an der neuen Unterführung West im HB Zürich, IVT-ETHZ, Zürich 1979
- [30] Brändli, Prof. Heinrich/Berg, Walter: Einfluss von neuen Bahnhofszugängen auf das Fahrgastverhalten, in: Verkehr und Technik 11/1979, S. 480 - 482
- [31] Bundesminister für Verkehr: Niederflur-Verkehrssysteme - Gestaltung von Haltestellen in den alten und neuen Bundesländern, in: direkt - Verbesserung der Verkehrsverhältnisse in den Gemeinden 46/1992, Bonn-Bad Godesberg 1992
- [32] Cameron, Ronald M.: Pedestrian Volume Characteristics, in: Compendium of Technical Papers, Institute of Traffic Engineers, 45th annual Meeting, Seattle/Washington, August 17-21, 1975, S. 110 - 125
- [33] Cameron, Ronald M.: Pedestrian Volume Characteristics, in: Compendium of Technical Papers, Institute of Transportation Engineers, 46th annual Meeting, Baltimore/Maryland, August 15-19, 1976, S. 11 - 27
- [34] Cameron, Ronald M.: Pedestrian Volume Characteristics, in: Traffic Engineering, January 1977, S. 36-37
- [35] Carstens, R.L./Ring, S.L.: Pedestrian Capacities of Shelter Entrances, in: Traffic Engineering, December 1970, S. 38-43
-

-
- [36] Collis, R.E.: A possible Design Criterion for Pavement Width, in: Traffic Engineering & Control, March 1975, S. 124-125
- [37] Cunagin, Wiley/Abrahamson, Tony: Driver Eye Height: A Field Study, in: ITE Journal, May 1979, S. 34-36
- [38] Dandy, Graeme Clyde/McBean, Edward Arthur: Variability of Individual Travel Time Components, in: Journal of Transportation Engineering, Vol. 110 No 3, May 1984, S. 340 - 356
- [39] Davis, Dennis G./Braaksma, John P.: Level-of-Service Standards for Platooning Pedestrians in Transportation Terminals, in ITE-Journal April 1987, S. 31-35
- [40] Dieckmann, Prof. Dr. D.: Anmerkungen zur Gestaltung von ergonomischen Fahrerplätzen, in: Unfall- und Sicherheitsforschung Strassenverkehr, Heft 45/1983, Arbeitsplatz des Berufskraftfahrers, S. 54 - 59
- [41] Dietrich, Prof. Karl/Spacek, Peter: Vorlesung Transporttechnik, Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau, ETH Zürich, Zürich 1983
- [42] Van Dijk, Johannis: Befragung Regionalverkehr Zürich, ausgeführt im Auftrag der Behördendelegation für den Regionalverkehr Zürich und des Stadtrates der Stadt Zürich, Zürich 1972
- [43] Donskoi, D.D.: Grundlagen der Biomechanik, Deutscher Sportbund, Schriftenreihe des Bundesausschusses zur Förderung des Leistungssports, Trainerbibliothek Band 16, Verlag Bartels & Wernitz KG, Berlin 1975
- [44] Dreyfuss, Henry: The Measure of Man - Human Factors in Design, Whitney Library of Design, New York 1967
- [45] Duncan, N.C.: A further Look at Speed/Flow/Concentration, in: Traffic Engineering & Control, October 1979, S. 482-483
- [46] Dupuis, Prof. Dr. H.: Ergonomische Gestaltung von Fahrersitzen, in: Unfall- und Sicherheitsforschung Strassenverkehr, Heft 45/1983, Arbeitsplatz des Berufskraftfahrers, S. 60 - 63
- [47] Eilmes, Horst: Untersuchungen über die Durchlassfähigkeit von Treppen im Bereich schienegebundener Nahverkehrsmittel, in: Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Verkehrswesen "Friedrich List" Dresden, 4/1972, S. 1037 - 1044
- [48] Elkington, John/McGlynn, Roger/Roberts, John: The Pedestrian: Planning & Research - a Literature Review and annotated Bibliography, Transport & Environment Studies, London 1976
- [49] Elkouby, J.: Pedestrian Areas in Town Centres and their Connection with main Transport Facilities, in: International Road Safety and Traffic Review, Spring 1967, Vol. XV, No 2, S. 8-17
- [50] Evans, Henry K.: Traffic Engineering Handbook, Second Edition, Institute of Traffic Engineers, New Haven/Connecticut 1950
- [51] Fackelmeyer, Dr. Arno: Rollende Strassen - Utopie damals und Wirklichkeit heute des Förderbandes für Passagierverkehr, in: Fördern und Heben 6/1957, S. 252 - 258
- [52] Fruin, John J.: Designing For Pedestrians: A Level-Of-Service Concept, in: Highway Research Record, Nr. 355, S. 1 - 15, Highway Research Board, Washington D.C. 1971
- [53] Fruin, John J./Benz, Gregory P.: Pedestrian Time-Space Concept for Analyzing Corners and Crosswalks, in: Transportation Research Record, Nr. 959, S. 18 - 24, Washington D.C. 1984
-

-
- [54] Fürmetz, Prof.Dr. Reinhard: Anlagen zur Ueberwindung von Höhenunterschieden im städtischen Verkehrsraum, in: Fachhochschule Aachen, FH-Texte 38, S. 33 - 85, Aachen 1983
- [55] Fürmetz, Prof.Dr. Reinhard/Bernecker, Manfred: Fussgängerbewegungen auf Treppenanlagen im städtischen Verkehrsraum, in: Der Nahverkehr 4/1984, S. 56 - 59
- [56] Gantvoort, Johan Th.: Pedestrian Traffic in Town Centres, in: Traffic Engineering & Control January 1971, S. 454-456
- [57] Garbrecht, Dietrich: Gehen - Ein Plädoyer für das Leben in der Stadt, Beltz-Verlag, Weinheim und Basel 1981
- [58] Gebhard, K.: Berechnungsmethoden der Durchlassfähigkeit von Fussgängerüberwegen, in: Die Strasse 4/1965, S. 158 - 164
- [59] Gerland, Horst/Meetz, Michael: Fahrgastbedienung im öffentlichen Personennahverkehr - Wünsche, Probleme, Möglichkeiten, SNV Studiengesellschaft Nahverkehr mbH, Hamburg/Berlin, Verband öffentlicher Verkehrsbetriebe, Köln, Alba-Verlag, Düsseldorf 1980
- [60] Gimau, Dr. Günter/Blennemann, Friedhelm: Verknüpfung von Nahverkehrssystemen, Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e.V. (STUVA), Alba Buchverlag, Düsseldorf 1970
- [61] Gimau, Prof. Dr. Günter: Massnahmen für Behinderte im öffentlichen Personennahverkehr aus der Sicht der öffentlichen Verkehrsunternehmen, in: Verkehr und Technik 12/1981, S. 492 - 496
- [62] Gimau, Dr. Günther/Müller-Hellmann, Dr. Adolf: OePNV auch für Aeltere und Behinderte; in: Der Nahverkehr 4/1989, S. 10 - 18
- [63] Glaser, Prof.Dr. Roland: Grundriss der Biomechanik, WTB Band 286, Akademie-Verlag, Berlin 1983
- [64] Glissmeyer, Prof.Dr. Hans u.a.: Handbuch Städtischer Verkehr, Verlag transpress, Berlin 1974
- [65] Grabe, W./Meyer, L.: Ergebnisse einer Verkehrsstudie über den Einsatz zweispuriger Fahrtreppen in U-Bahn-Haltestellen, in: Verkehr und Technik 1/1970, S. 17 - 19
- [66] Grahl, W./Hahn, S./Sandner, R.: Breitenbemessung und Durchlassfähigkeit von Fussgängerunterführungen, in: Die Strasse 4/1966, S. 192 - 197
- [67] Grahl, Dr. Wolfgang: Durchlassfähigkeit von Anlagen des Fussgängerverkehrs, in: Die Strasse 12/1978, S. 407 - 409
- [68] Gray, B. Everett: Slips, Stumbles and Falls: Pedestrian Footwear and Surfaces, American Society for Testing and Materials, Philadelphia 1990
- [69] Grayson, G.B.: Observations of Pedestrian Behaviour at four Sites, Transportation and Road Research Laboratory, TRRL Laboratory Report 670, Crowthorne/Berkshire 1975
- [70] Grigoriadou, Maria/Braaksma, Prof. John P.: Application of the Time-Space Concept in Analyzing Metro Station Platforms, in: ITE Journal, May 1986, S. 33-37
- [71] Habicht, Tom A./Braaksma, John P.: Effective Width of Pedestrian Corridors, in: Journal of Transportation Engineering, Vol. 110 No 1. January 1984, S. 80 - 93
- [72] Hall, Edward T.: Die Sprache des Raumes, Pädagogischer Verlag Schwann, Düsseldorf 1976
-

-
- [73] Hankin, B.D./Wright, R.A: Passenger Flow in Subways, in: Operational Research Quarterly, volume 9. number 2, june 1958, S. 81 - 88
- [74] Harlánd, D.G./Jacoby, R.G./Pickering, D.: Footways used by Cyclists and Pedestrians, in: Traffic Engineering & Control, May 1986, S. 283-287
- [75] Heidemann, Dr. Claus: Ueber Gesetzmässigkeiten des Fussgängerverkehrs einer Einkaufsstrasse, in: Strassenverkehrstechnik 5-6/1967, S. 55-60
- [76] Heidemann, Dr. Claus: Gesetzmässigkeiten städtischen Fussgängerverkehrs, Forschungsarbeiten aus dem Strassenwesen, Neue Folge Heft 68, Kirschbaum-Verlag, Bad Godesberg o.J.
- [77] Herrmann, Dr. Dietrich: Verbesserung der Betriebseigenschaften von Fahrtreppen durch Geschwindigkeitssteuerung, in: Verkehr und Technik 1/1986, S. 16 - 19
- [78] Hill, Michael R.: Pedestrian Behaviour and Facilities Design, Selected Bibliography 1970-1975, Council of Planning Librarians, Exchange Bibliography, Monticello/Illinois, 1976
- [79] Hoel, Dr. Lester A.: Pedestrian Travel Rates In Central Business Districts, in: Traffic Engineering, january 1968, S. 10 - 13
- [80] Hollmann, Prof. Dr. W./Hettinger, Prof. Dr. Th.: Sportmedizin - Arbeits- und Trainingsgrundlagen, F.K.Schattauer Verlag, Stuttgart/New York 1980
- [81] Homburger, Wolfgang S./Keefer, Louis E./McGrath, William R.: Transportation and Traffic Engineering Handbook, second edition, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs (New Jersey, USA) 1982
- [82] Hondius, Harry: Servicebus-Konzept jetzt auch in Dänemark und Norwegen, in: Stadtverkehr 11-12/1992, S. 20 - 25
- [83] Ibaragi, Yoshio/Uehara, Takao/Todoriki, Masahumi: Simulation of Passenger Flow in a Station, in: Quarterly Reports, Japanese National Railway, Railway Technical Research Institute, Volume 13, Number 4, 1972, S. 202 - 207
- [84] ITE-Technical Council Committee 6Y-1: Levels of Service Provided by Urban Transportation Systems, in: Traffic Engineering, January 1976, S. 30-35
- [85] ITE-Technical Council Committee 5-R: Characteristics and Service Requirements of Pedestrians and Pedestrian Facilities, Traffic Engineering, May 1976, S. 34-45
- [86] ITE-Technical Council Committee 6Y-28: Pedestrian Planning Activities, in: ITE Journal, June 1986, S. 17-20
- [87] Jabez, Alan: Simulating Passenger Flows, in: UTI, March/April 1991, S. 24 - 25
- [88] Jackson, Ronald I./Simmons, John B./Louw, Theodor J.: Guidelines for the Design of Bus Terminals and Bus Stations, in: Compendium of Technical Papers, Institute of Transportation Engineers, 54th annual Meeting, September 23-27, 1984, S. 20-11 - 20-16
- [89] Jäger, Matthias: Biomechanisches Modell des Menschen zur Analyse und Beurteilung der Belastung der Wirbelsäule bei der Handhabung von Lasten, Fortschrittberichte VDI, Reihe 17: Biotechnik, Nr. 33, VDI Verlag, Düsseldorf 1987
- [90] Janetzki, Dr. Georg/Riedel, Rudolf: Analyse des Verkehrsverhaltens von Rollstuhlfahrern in der Stadt Leipzig, in: Die Strasse 5/1989, S. 133 - 139
- [91] Joss, E.: Wachstum und Entwicklung gesunder Kinder, in: Bachmann u.a.: Pädiatrie in Praxis und Klinik, Band III, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart/New York 1980
-

-
- [92] Kelly, J.J.: Piccadilly Circus Pedestrian Study, Greater London Council, Department of Planning and Transportation, Transportation Branch, London 1974
- [93] King, R.H./Eagland, R.M.: Gloucester's Traffic and Transport Plan - Fair Treatment for the Pedestrians, in: Traffic Engineering & Control January 1971, S. 456-459
- [94] Kirsch, Dr. Helmut: Leistungsfähigkeit und Dimensionierung von Fussgängerüberwegen, in: Strassenbau und Strassenverkehrstechnik 33, Bonn 1964
- [95] Kjellin, Bror: The Bicycle in the Urban Traffic Network, in: Compendium of Technical Papers, Institute of Transportation Engineers, 46th annual Meeting, Baltimore/Maryland, August 15-19, 1976, S. 88 - 93
- [96] Knoblauch, Richard L./Tobey, Henry N./Shunaman, Evelyn M.: Pedestrian Characteristics and Exposure Measures, in: Transportation Research Record, Nr. 959, S. 35 - 41, Washington D.C. 1984
- [97] Kochevar, Robert A./Lalani, Nazir: How long should a safe Pedestrian Clearance Intervall be? in: ITE Journal, May 1985, S. 30-32, 49
- [98] Köröndi, Dr. Geza: Lösungsansätze zur Rollstuhlfahrerbeförderung im OePNV, in: Verkehr und Technik 2/1988, S. 39 - 48
- [99] Krämer, Helmut: Untersuchung der Leistungsfähigkeit von Fahrtreppen, in: Strassenverkehrstechnik 5/1969, S. 151 - 152
- [100] Krug, Stephan: Ein interaktives Programmsystem zur Angebotsplanung für den liniengebundenen öffentlichen Personennahverkehr, Dissertation an der Technischen Universität Carolus Wilhelmina Braunschweig, Braunschweig 1987
- [101] Lachmann, Peter: Fussgängerorientierte Dimensionierung von Mischverkehrsflächen, in: Die Strasse 2/1987, S. 40 - 42
- [102] Lane, R.: Introduction to Traffic Engineering, part 4: Road Capacity, in: Traffic Engineering & Control January 1968, S. 440-443
- [103] Lautso, Kari/Pentti, Murole: A Study of Pedestrian Traffic in Helsinki: Methodes and Results, in: Traffic Engineering & Control January 1974, S. 446-449
- [104] Leibbrand, Dr. Kurt: Verkehrsingenieurwesen - Städtische Verkehrsplanungen für Schiene und Strasse, Birkhäuser-Verlag, Basel 1957
- [105] Leibbrand, Dr. Kurt: Stadt und Verkehr - Theorie und Praxis der städtischen Verkehrsplanung, Birkhäuser Verlag, Basel/Boston/Stuttgart 1980
- [106] Lenk, Leopold/Proksch, Franz: Neue Fahrwerke zur Niveauabsenkung des Fahrgastfussbodens bei schienengeführten Stadtverkehrsmitteln, in: ZEV+DET - Glasers Annalen 8-9/1992, S. 333 - 342
- [107] Lenke, Peter: Fussgängerbereiche als Planungselement für den öffentlichen Nahverkehr, in: Verkehr und Technik 2/1971, S. 67-70, 3/1971, S. 96-102
- [108] Leung, W.S./Lau, C.C.: A new Study of the Traffic Flow/Concentration Relationship, in: Traffic Engineering & Control, September 1975, S. 386-387
- [109] Lewis, P.A.: The Interpretation and Use of Speed/Flow Relationships for Transport Planners, in: Traffic Engineering & Control June 1980, S. 304-309
- [110] Machtemes, Prof. A.: Raum für Fussgänger - Ein Beitrag zur Stadtplanung, Materialbände I und II, Institut für Landes- und Stadtentwicklungsforschung des Landes Nordrhein-Westfalen, Essen 1976
-

-
- [111] Margaria, Rodolfo: Biomechanics and energetics of muscular exercise, Oxford University Press, Oxford 1976
- [112] Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners: Pedestrian Planning and Design Seminar Proceedings, New York February 28-29, 1972
- [113] Maurer, Dr. W.: Statistik und Wahrscheinlichkeitsrechnung, Vorlesung an der ETH Zürich, Zürich 1984
- [114] Meyer, Dr. L. u.a.: In Bremen: Beschleunigung des Strassenbahn-Betriebs - Verkehrsabhängige Steuerung mit Strassenbahnbeeinflussung an Lichtsignalanlagen, in: Der Nahverkehr 5/1989, S. 26-34
- [115] Menzel, Jürgen: Betrieb und Vorhaltung von Verkehrsfahrtreppen bei der Deutschen Bundesbahn sowie technische Neuerungen, in: Eisenbahningenieur 8/1982, S. 343 - 353
- [116] Monheim, Rolf: Fussgängerbereiche und Fussgängerverkehr in Stadtzentren in der Bundesrepublik Deutschland, Bonner Geographische Abhandlungen, Heft 64, Ferd. Dümmers Verlag, Bonn 1980
- [117] Monheim, Prof.Dr.Rolf: Analyse von Tätigkeiten und Wegen in der Stadt - Neue Möglichkeiten für den modal-split, in: Verkehr und Technik 8/1985, S. 267 - 270, 9/1985, S. 324 - 330
- [118] Morecki, A. (Herausgeber): Biomechanics of Motion, International Centre for Mechanical Sciences, Courses and Lectures No 263, Springer-Verlag, Wien/New York 1980
- [119] Müller, Manfred: Fahrtreppen und Fahrsteige in Stadtbahn- und U-Bahn-Haltestellen - Eine Erhebung des VOeV-Ausschusses für Bahnbau, in: Der Nahverkehr 6/1987, S. 26 - 32
- [120] Müller, Roland: Pedestrian Volume and Speed Characteristics - A Thesis presented to the Faculty of the Bureau of Highway Traffic, Yale University, Yale 1968
- [121] Müller, Dr. Siegfried/Uhlig, Dr. Walter-Reinhold: Dimensionierung von Personenverkehrswegen in Reiseverkehrsanlagen, in: Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Verkehrswesen "Friedrich List" Dresden, 5/1985, S. 873 - 885
- [122] Navin, Francis P.D./Wheeler, Dr. Robert J.: Pedestrian Flow Characteristics, in: Traffic Engineering, June 1969, S. 30 - 36
- [123] Ness, M.P./Morrall, J.F./Hutchinson, B.G.: An Analysis of Central Business District Pedestrian Circulation Patterns, in: Highway Research Record 283, S. 11 - 18, Washington D.C. 1969
- [124] Newland, R.M.: Driver Eye Level and Road Safety, in: International Road Safety and Traffic Review, Summer 1966, Vol. XIV, No 3, S. 26-35
- [125] Oeding, Detlef: Verkehrsbelastung und Dimensionierung von Gehwegen und anderen Anlagen des Fussgängerverkehrs, Dissertation an der Technischen Hochschule Carolowilhelmina Braunschweig, Braunschweig 1963
- [126] O'Flaherty, C.A./Parkinson, M.H.: Movement on a City Centre Footway, in: Traffic Engineering & Control, February 1972, S. 434-438
- [127] Offner, Jean-Marc: Les Déplacements Piétonniers, analyse bibliographique, Institut de Recherche des Transports, note d'information No 20, Arcueil/F 1981
- [128] Older, S.J.: Movement of Pedestrians on Footways in Shopping Streets, in: Traffic Engineering & Control August 1968, S. 160-163
-

-
- [129] Oswald, Guy: Behinderte im Strassenverkehr - Arbeitsbericht des Instituts für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau an der ETH Zürich, Dezember 1986
- [130] Otto, Dieter: Verkehrserzeugungsmodell zur Quantifizierung des Fussgängerverkehrsaufkommens, in: Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 279, Bonn 1980
- [131] Pasricha, P.S.: Pedestrian Planning in Greater Bombay, in: Traffic Engineering & Control February 1983, S. 62-67
- [132] Petersen, Stephen G./Braswell, Robert H.: Planning and Design Guidelines for Mode Transfer Facilities, in: Traffic Quarterly, July 1972, S. 405-423
- [133] Pfeifer, Herbert: Fussgängerverkehr in Städten, in: Die Strasse 8(1968) Nr. 7, Juli 1968, S. 321 - 327
- [134] Plag, Peter: Entwicklung und Ausbildung der Fahrtreppe, in: Eisenbahningenieur 11/1969, S. 315 - 320
- [135] Polus, Abishai/Schofer, Joseph L./Ushpiz, Ariel: Pedestrian Flow and Level of Service, in: Journal of Transportation Engineering, Vol. 109 No 1, January 1983, S. 46 - 56
- [136] Pretty, Robert Lindsay: The Delay to Vehicles and Pedestrians at signalized Intersections, in: ITE Journal, May 1979, S. 20-23
- [137] Prinzing, Roland: Lebensalter und physiologische Zeit - Messung der Lebensdauer in biologischen Systemen, Neue Zürcher Zeitung Nr. 30/1991, 6. Februar 1991
- [138] Prokop, Prof. Dr. Ludwig: Einführung in die Sportmedizin für Aerzte, Sportler und Übungsleiter, 3. bearbeitete Auflage, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart/New York 1983
- [139] Prusa, Wilfried: Die Gestaltung der Kraftomnibus-Innenräume - Verkehrsphysiologische und verkehrspsychologische Kriterien, in: Die Bundesbahn 9/1987, S. 799 - 801
- [140] Pushkarev, Boris/Zupan, Jeffrey M.: Urban Space for Pedestrians - A Report of the Regional Plan Association, The MIT Press Cambridge/Massachusetts and London/England, 1975
- [141] Rabe, Dr. Ulrich/Wegener, Dr. Borwin: Fusswege zu den Zugangsstellen des öffentlichen Personennahverkehrs - Näherungsverfahren zur Gewinnung von Eingabedaten für Netzberechnungen mit EDVA, in: Die Strasse 10/1973, S. 407 - 411, 426
- [142] Reimer, Kurt: Die Bewegung der Menschenmassen in Verkehrsräumen, in: Glasers Annalen 7/1947, S. 121 - 131
- [143] Reimer, Kurt: Das Problem des raschen Fahrgastwechsels bei städtischen Verkehrsmitteln, in: Glasers Annalen 11/1949, S. 198-202, 12/1949, S. 217-219
- [144] Reimer, Kurt: Beförderungsleistung von Rolltreppen, in: Internationales Archiv für Verkehrswesen, Nr. 23/1950, S. 533 - 538
- [145] Reimer, Kurt: Bewegungsvorgänge auf Bahnsteigen des grossstädtischen Schnellverkehrs, in: Glasers Annalen 11/1953, S. 338 - 341
- [146] Reiss, Martin L.: Young Pedestrian Behavior, in: Transportation Engineering, October 1977, S. 40-44
- [147] Reitmayer, Ulrich: Holztreppen in handwerklicher Konstruktion, 3. Auflage, Julius Hoffmann Verlag, Stuttgart 1986
- [148] Retzko, Prof. Dr. Hans-Georg/Androsch, Wolfgang: Pedestrian Behaviour at signalised Intersections, in: Traffic Engineering & Control August/September 1974, S. 735-738
-

-
- [149] Rohmert, Walter/Rutenfranz, Joseph: **Praktische Arbeitsphysiologie**, 3. neubearbeitete Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart/New York 1983
- [150] Rüger, Siegfried: **Betriebstechnologie städtischer öffentlicher Personenverkehr**, transpress-Verlag, Berlin 1974
- [151] Sandahl, Janne/Percivall, Martin: **A Pedestrian Traffic Model for Town Centers**, in: *Traffic Quarterly*, July 1972, S. 359-372
- [152] Schaufelberger, E.: **Les Piétons: Réseaux et Aménagements**, Institut des Transports et de Planification, ITEP-EPFL, cahier TEA No 5, Lausanne 1992
- [153] Schindler Aufzüge AG: **Diverse Produktdokumentationen zu Rolltreppen und Rollbändern**, 1992
- [154] Schmitz, Andreas: **Der Weg zur Strassenbahn - Die Lage der Haltestelle im Raum**, in: *Verkehr und Technik*, 4/1991, S. 139 - 144; 6/1991, S. 235 - 240
- [155] Schnabel, Dr. Werner: **Gehgeschwindigkeiten von Fussgängern auf lichtsignalgeregelten Ueberwegen**, in: *Die Strasse* 6/1969, S. 269 - 270
- [156] Schnabel/Lohse: **Strassenverkehrstechnik und -planung, Grundlagen**, VEB transpress, Berlin, 1980
- [157] Schnabel, Prof. Dr. Werner: **Erkenntnisse und Methoden der Strassenverkehrstechnik im neuen "Highway Capacity Manual"**, Kapitel 13: Fussgänger, Hochschule für Verkehrswesen "Friedrich List" Dresden, ohne Jahrgang
- [158] Schopf, Josef Michael: **Bewegungsabläufe, Dimensionierung und Qualitätsstandards für Fussgänger, Radfahrer und Kraftfahrzeugverkehr**, Dissertation Technische Universität Wien, Wien 1985
- [159] Schoppert, David W./Herald, William S.: **Pedestrian Range as Related to Transit Stations and their immediate Surroundings**, in: *Transportation Engineering*, March 1978, S. 13-15
- [160] Schümborg, Prof.Dr.Günter: **Gleisplangestaltung (Kapitel Personenverkehrsbereich)**, Verlag transpress, Berlin 1987
- [161] Schürch, A.: **Fussgänger im Verkehr - Eine Literaturoberwertung**, ETH Zürich, Lehrstuhl für Verkehrsingenieurwesen, LS-Studienunterlage Nr. 73/2, Zürich 1973
- [162] Schütz, Prof. Dr. Erich/Rothschuh, Prof. Dr. Karl E.: **Bau und Funktionen des menschlichen Körpers - Anatomie und Physiologie des Menschen für Hörer aller Fakultäten und für medizinische Assistenzberufe**, Urban & Schwarzenberg, München/Berlin/Wien 1976
- [163] Schütz, Prof.Dr.Erich/Caspers, Prof.Dr.Heinz/Speckmann, Prof.Dr.Erwin-Josef: **Physiologie - Lehrbuch für Studierende**, 16. Auflage, Urban&Schwarzenberg, München/Wien/Baltimore 1982
- [164] Schwanke-Gernig, Karin: **Behindertengerechte Fahrzeuge und ihre Einsatzmöglichkeiten aus betrieblicher Sicht**, in: *Verkehr und Technik* 5/1985, S. 174 - 176
- [165] Schweizerische Bundesbahnen, **Direktion Marketing Personenverkehr: Behindertenkonzept SBB, Teilberichte I und II**, Bern 1989
- [166] Schweizerischer Invalidenverband: **Behindertengerechtes Bauen, Norm SN 521 500 mit Leitfaden**, Olten 1989
- [167] Bundesamt für Statistik: **Statistisches Jahrbuch der Schweiz 1991**, Verlag Neue Zürcher Zeitung, Zürich 1990
-

-
- [168] Stadt Zürich: Statistisches Jahrbuch der Stadt Zürich 1991, 86. Jahrgang, Statistisches Amt der Stadt Zürich, Zürich 1991
- [169] Stadtrat von Zürich: Einrichtung eines gesamtstädtischen Behindertentransportsystems, Weisung 539 an den Gemeinderat vom 17. Januar 1990
- [170] Stegemann, Prof.Dr. Jürgen: Leistungsphysiologie - Physiologische Grundlagen der Arbeit und des Sports, 3. Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart/New York 1984
- [171] Stengel, Wolfgang: Aspekte der Verkehrssicherheit bei Führung von Bussen und Strassenbahnen in Fussgängerzonen, in: Verkehr und Technik 3/1980, S. 110 - 116
- [172] Verknüpfung von Nahverkehrssystemen, Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e.V., Düsseldorf, 1970
- [173] Surti, Vasant H./Burke, Thomas J.: Investigation of the capacity of the White House sidewalk for orderly demonstrations, in: Highway Research Record, Nr. 355, S. 16 - 25, Highway Research Board, Washington D.C. 1971
- [174] Vereinigung Schweizerischer Verkehrsingenieure: Leistungsfähigkeit bei verschiedenen Transportarten, Forschungsauftrag 5/67, Zürich 1971
- [175] Thews, Prof.Dr. Gerhard/Mutschler, Prof.Dr. Ernst/Vaupel, Prof.Dr. Peter: Anatomie, Physiologie, Pathophysiologie des Menschen - Ein Lehrbuch für Pharmazeuten und Biologen, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH, Stuttgart 1980
- [176] Thillainayagam, R.: Economic Study for Providing Grade separated Pedestrian Crossings in Madras City, Highway Research Station, Madras ca. 1969
- [177] Tichauer, Erwin R.: The biomechanical Basis of Ergonomics - Anatomy Applied to the Design of Work Situations, John Wiley & Sons Inc., New York/Chichester/Brisbane/Toronto 1978
- [178] Tolley, Rodney: The greening of urban transport: planning for walking and cycling in Western cities, Belhaven Press, London 1990
- [179] Transportation Research Board: Highway Capacity Manual, Special Report 209, Washington DC 1985
- [180] Untermann, Richard K.: Accomodating the Pedestrian - Adapting Towns and Neighborhoods for Walking and Bicycling, Van Nostrand Reinhold Company, New York 1984
- [181] Urbanik, Thomas: Understanding Forced Flow, in: ITE Journal, October 1986, S. 23-26
- [182] Vance, Mary: Pedestrian Facilities Design, 1970-1987, Architecture Series: Bibliographie A 2030, Monticello/Illinois 1988
- [183] Verband öffentlicher Verkehrsbetriebe: Massnahmen zur leichteren Benutzung öffentlicher Verkehrsmittel durch Behinderte, VOeV-Schriften, Reihe Technik, VOeV 09.91.1, Ausgabe September 1981, BEKA-Verlag, Köln 1981
- [184] Virkler, Mark R./Guell, David L.: Pedestrian Crossing-Time Requirements at Intersections, in: Transportation Research Record, Nr. 959, S. 47 - 51, Washington D.C. 1984
- [185] Voigt, Prof. Dr. Werner: Planung und rationelle Gestaltung von Fussgängerkehrsanlagen in Wohngebieten, in: Die Strasse 9/1982, S. 292 - 296; 10/1982, S. 334 - 337
- [186] Weber, Wolfgang: Fahrwege und Fahrdynamik der Schienenbahnen, Skript zur gleichnamigen Vorlesung an der Universität Stuttgart/Institut für Eisenbahn- und Verkehrswesen
- [187] Weeber, Dr. Hannes u.a.: Verkehrsanlagen aus der Sicht des Fussgängers, in: Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 279, Bonn 1980
-

-
- [188] Weidmann, Ulrich: Niederflurfahrzeuge - ein Beitrag zum attraktiven Nahverkehr, in: Schweizer Ingenieur und Architekt 13/1992, S. 269 - 275
- [189] Westphal, Dr. Joachim: Ein Beitrag zur Leistungsfähigkeit von Rolltreppen im U-Bahn-Berufsverkehr, in: Verkehr und Technik 5/1972, S. 185 - 196
- [190] Wiebusch-Wothge, Dr. Rainer: Beurteilung von Verkehrsabläufen an konventionellen und alternativen Fussgängerüberwegen, Schriftenreihe Lehrstuhl für Verkehrswesen I, Ruhr-Universität Bochum, Heft 6, 1987
- [191] Wirbitzky, Dr.G.: Rollsteige sind die Grundlage künftiger Fussgängerverkehre, in: Strassenverkehrstechnik 2/1969, S. 37 - 41
- [192] Wirsching, Dr.A./Burmeister, G.: Massstab für den Einbau von Fahrtreppen in U-Bahn-Haltestellen, in: Verkehr und Technik 6/1982, S. 203 - 206
- [193] Wolf, Johannes: Ermittlung des hinsichtlich der Reisezeit zweckmäßigsten Haltestellenabstandes im städtischen Nahverkehr, Dissertation an der Hochschule für Verkehrswesen "Friedrich List", Dresden, 1970
- [194] Wolff, Hans/Bierschenk, Hartmut/Scholz, Dr. Gerhard: Berücksichtigung des Fussgängerverkehrs bei Verkehrserhebungen, in: Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 279, Bonn 1980
- [195] Zweigert, Dr. Manfred: Bahnanlagen des Nahverkehrs, transpress Verlag, Berlin 1982
- [196] anonym: Behinderte im OePNV: Grundlagen, Technik, Möglichkeiten, in: stadtverkehr 10/1991, S. 6 - 9
- [197] anonym: Niederflur-Verkehrssystem - Gestaltung von Haltestellen in den alten und neuen Bundesländern, ca. 1992
-

A.2 Abkürzungsverzeichnis

a	Wärmeübergangszahl
a _R	Stufentiefe einer Rolltreppe [m]
a _T	Stufentiefe einer festen Treppe [m]
B _B	Bruttobreite der Fussgängeranlage [m]
B _H	Verlustbreite infolge Hindernis oder Wand [m]
B _L	Lichte Breite einer Fussgängeranlage [m]
B _N	Nutzbare Breite einer Fussgängeranlage [m]
B _S	Breite einer Gehspur [m]
b	Verdunstungszahl
D	Fussgängerdichte [P/m ²]
D _{max}	Fussgängerdichte, bei welcher eine Bewegung unmöglich wird [P/m ²]
D _{WS}	Wärmemenge, die vom Körper ausgetauscht wird
EE	Gesamtenergieverbrauch beim Gehen in der Ebene [kJ/h]
ET	Gesamtenergieverbrauch beim Gehen auf Treppen [kJ/h]
F	Anzahl Fussgänger [P]
F _{St}	Anzahl Fussgänger auf einer Treppenstufe [P]
G	Grundenergieumsatz [kJ/h]
g	Proportionalitätsfaktor, abhängig von Emissions- und Absorptionseigenschaften der beteiligten Körper
h _R	Höhe der Treppenstufen [m]
h _T	Stufenhöhe einer festen Treppe [m]
L	Leistungsfähigkeit einer Fussgängeranlage [P/s]
L _R	Leistungsfähigkeit einer Rolltreppe [P/s]
L _{R,s}	Spezifische Leistungsfähigkeit einer Rolltreppe [P/sm]
L _s	Spezifische Leistungsfähigkeit einer Fussgängeranlage [P/sm]
L _{s,ab}	Spezifische Leistungsfähigkeit eines Treppenquerschnitts beim Abwärtsgehen [P/sm]
L _{s,auf}	Spezifische Leistungsfähigkeit eines Treppenquerschnitts beim Aufwärtsgehen [P/sm]
l _s	Schrittlänge [m]
n _H	Zahl der Begrenzungen der Fussgängerfläche [-]
P _H	Wasserdampfdruck der Haut
P _L	Wasserdampfdruck der Luft
q _{T,b}	Anteil der Fussgänger, die sich zusätzlich aktiv auf einer Rolltreppe hinauf- oder hinunterbewegen [-]
R _F	Spezifischer Raumbedarf [m ² /P]
T	Zeit [h]
T _H	Hauttemperatur
T _L	Temperatur an der Luftgrenzschicht
T _W	Temperatur der strahlenden Fläche
t	Zeit [s]
t _A	Zulässige Abflusszeit [s]
v _{F,h}	Horizontalgeschwindigkeit [m/s]
v _{F,hab}	Horizontalkomponente der Fussgängergeschwindigkeit auf Treppen beim Abwärtsgehen [m/s]
v _{F,hauf}	Horizontalkomponente der Fussgängergeschwindigkeit auf Treppen beim Aufwärtsgehen [m/s]
v _{F,hf}	Fussgängergeschwindigkeit bei voller Freizügigkeit [m/s]
v _{F,hi}	Geschwindigkeit bei einer bestimmten Fussgängerdichte [m/s]

$V_{F,hm}$	Mittlere horizontale Fussgängergeschwindigkeit [m/s]
$V_{F,v}$	Vertikalgeschwindigkeit [m/s]
$V_{R,s}$	Schräggeschwindigkeit einer Rolltreppe [M/s]
W_C	Wärmetausch durch Konvektion
W_E	Wärmetausch durch Schweissverdunstung
W_M	Wärmeproduktion des Organismus
W_R	Wärmetausch durch Strahlung
w_C	Wärmestrom pro Flächeneinheit infolge Konvektion
w_E	Wärmeabgabe durch Verdunstung pro Flächeneinheit
w_R	Wärmestrom pro Flächeneinheit infolge Strahlung
α	Neigungswinkel der Rolltreppe [°]
γ	Eichkonstante der Formel von Kladek [P/m ²]

A.3 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Passantenstruktur nach Geschlecht in der Sternstrasse in Bonn	10
Abb. 2	Alterspyramide der Stadt Zürich, Stand 1990	11
Abb. 3	Sterbewahrscheinlichkeit und Lebenserwartung der Schweizer Bevölkerung nach Alter und Geschlecht	11
Abb. 4	Ueberlebensrate von jeweils 100'000 US-Amerikanern in aufeinanderfolgenden Zeiträumen	12
Abb. 5	Lebenserwartung auf Endalter in der Stadt Zürich	12
Abb. 6	Wachstumsverlauf von Kindern in Prozenten der erreichten Endgrösse	13
Abb. 7	Grössenverteilung erwachsener Menschen in Mitteleuropa	14
Abb. 8	Verschiebung der Körperproportionen im Laufe des Wachstums	15
Abb. 9	Anthropometrische Daten eines stehenden Mannes und einer stehenden Frau	15
Abb. 10	Chronogramm von Gehen und Laufen	16
Abb. 11	Verlauf der Schwerpunktlage des Körpers während des Bewegungsvorganges beim Gehen beziehungsweise beim Laufen	17
Abb. 12	Phasenverlauf der Bewegung eines Beines, Bewegung des Körperschwerpunktes und auf ihn einwirkende Beschleunigungen und Verzögerungen	17
Abb. 13	Gelenkkräfte beim Gehen in der Ebene	18
Abb. 14	Schrittlänge in Funktion der Geschwindigkeit beim Gehen und Laufen	19
Abb. 15	Abhängigkeit des Grundumsatzes von Alter und Geschlecht	20
Abb. 16	Unterteilung des täglichen Energieumsatzes nach leichter, mittelschwerer, schwerer und schwerster Arbeit	21
Abb. 17	Energieumsatz beim Gehen in der Ebene in Abhängigkeit von Schrittlänge und Schrittzahl	22
Abb. 18	Gesamtenergieverbrauch für eine Strecke von 1000 m Länge in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit	22
Abb. 19	Energieverbrauch beim Gehen und Laufen	23
Abb. 20	Energieverbrauch beim Gehen auf geneigten Strecken	24
Abb. 21	Effizienz beim Gehen auf verschiedenen Neigungen	24
Abb. 22	Energieumsatz für eine Hubarbeit von 1 mkg für Rampe, Treppe und Leiter	25
Abb. 23	Energieverbrauch auf energieoptimaler Treppe und Vergleich mit Energieverbrauch in der Ebene	27
Abb. 24	Körperliche Leistungsfähigkeit in Funktion des Alters	28
Abb. 25	Körperliche Leistungsfähigkeit in Funktion des Alters	28
Abb. 26	Tagesperiodik der Leistungsbereitschaft	29
Abb. 27	Uebereinstimmung der Zeitpunkte gehäuften Einschlafens bei Autofahrern mit gehäuften Fehlanschreibungen von Gasarbeitern, Tagesganglinie der Leistungsdisposition von Gasarbeitern	30
Abb. 28	Mittlerer tagesrhythmischer Verlauf der akustischen Reaktionszeiten und der ergonomisch bestimmten Arbeitskapazität	30
Abb. 29	Energieumsatz nach einstündigem Sitzen in unterschiedlicher Umgebungstemperatur	32
Abb. 30	Wärmetausch einer nackten Versuchsperson während der Arbeit	33
Abb. 31	Beispiele für den thermischen Widerstand gebräuchlicher Bekleidungen	34

Abb. 32	Körpertemperatur und Wärmebildung des Menschen in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur	34
Abb. 33	Individuelle Unterschiede in der Beurteilung verschiedener Umgebungstemperaturen	35
Abb. 34	Abnahme der Dauerleistungsgrenze in Abhängigkeit von der Effektivtemperatur	35
Abb. 35	Veränderung von Luftdichte, Sauerstoff-Partialdruck und Dampfdruck bei verschiedener Höhe über Meeresspiegel	36
Abb. 36	Einteilung der verkehrsbehinderten Personen	38
Abb. 37	Prozentsatz der älteren Personen, welche verschiedene Stufen mit beziehungsweise ohne Griffstangen bewältigen können	39
Abb. 38	Mobilitätsbehinderungen bei verschiedenen Alterskategorien	40
Abb. 39	Platzbedarf von Rollstuhlfahrern	41
Abb. 40	Verlauf der Fussgängergeschwindigkeiten in Funktion des Lebensalters	44
Abb. 41	Verlauf der Fussgängergeschwindigkeiten in Funktion des Lebensalters	45
Abb. 42	Fussgängergeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Tageszeit	47
Abb. 43	Fussgängergeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Tageszeit und der Verkehrsdichte	47
Abb. 44	Hypothese zum Geschwindigkeitsverlauf im Tagesgang	48
Abb. 45	Geschwindigkeit in Funktion der Umgebungstemperatur	48
Abb. 46	Geschwindigkeit in Funktion der Umgebungstemperatur	49
Abb. 47	Abnahme der Fussgängergeschwindigkeit auf Treppen in Funktion der Stufenzahl	50
Abb. 48	Geschwindigkeit der Fussgänger in Funktion der Gehwegneigung	51
Abb. 49	Abhängigkeit der Fussgängergeschwindigkeit von der Fussgängerdichte in der Ebene	52
Abb. 50	Abhängigkeit der Fussgängergeschwindigkeit von der Fussgängerdichte auf Treppen	53
Abb. 51	Summenkurve der Fussgängergeschwindigkeiten	54
Abb. 52	Verkehrsstromgesetzmässigkeiten beim motorisierten Individualverkehr und beim Fussgängerverkehr	56
Abb. 53	Fussgängerdichte vor Lichtsignalanlage in Funktion der Distanz von der Bordsteinkante	57
Abb. 54	Fussgängerschwankungen um eine Ideallinie	58
Abb. 55	Prozentuale Verteilung des Gepäcktransportes durch Fussgänger	58
Abb. 56	50 %- und 85 %-Fussgängerbreiten in Abhängigkeit von der Gepäckbeförderung	59
Abb. 57	Theoretische Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der Fussgängerdichte, dynamischer Verlust	60
Abb. 58	Empirischer Zusammenhang zwischen Fussgängerdichte und Geschwindigkeit sowie Näherung mit Funktion von Kladek	62
Abb. 59	Fundamentaldiagramm für Fussgängerverkehrsanlagen	63
Abb. 60	Prozentuale Leistungsfähigkeit eines Querschnittes bei Gegenverkehr	65
Abb. 61	Aufteilung eines Fussweges in Funktion der Richtungsanteile bei Gegenverkehr	65
Abb. 62	Fundamentaldiagramm für Treppen	67

Abb. 63	Abhängigkeit des Besetzungsgrades der Rolltreppenstufen bei aufwärtsbegangenen zweispurigen Rolltreppen	71
Abb. 64	Abhängigkeit der Leistungsfähigkeit von der Fahrgeschwindigkeit bei aufwärts begangenen zweispurigen Rolltreppen	72
Abb. 65	Anteil der Rolltreppen-Ablaufmenge in Abhängigkeit von der Gesamt-ablaufmenge bei kombinierten Anlagen	74
Abb. 66	Simulation der Aufteilung eines Fussgängerstromes auf die Rolltreppe und eine feste Treppe	74
Abb. 67	Darstellung verschiedener Fussgängerdichten	78
Abb. 68	Prinzip einer detaillierten Dimensionierung mit der Dauerkurve einer Anlage und den zugeordneten LOS	80
Abb. 69	Verkehrsdichte auf einer Treppe während der Verkehrsspitze	81
Abb. 70	Belastungsprofil einer aufwärtslaufenden Rolltreppe	81

A.4 Verzeichnis der Tabellen

Tab. 1	Energieverbräuche bei verschiedenen Tätigkeiten	20
Tab. 2	Energiemehrverbrauch durch Rückenlasten und verschiedene Zustände des Weges	23
Tab. 3	Anteile der Körperbehinderten und Rollstuhlfahrer	38
Tab. 4	Einflüsse auf die Fussgängergeschwindigkeit	43
Tab. 5	Mittlere horizontale und vertikale Geschwindigkeiten auf typischen Neigungen	51
Tab. 6	Abgrenzung der LOS A bis I gemäss Kriterien K1 bis K8	76
Tab. 7	Definition und Charakterisierung der verschiedenen Levels-of-Service beim Gehen in der Ebene	78
Tab. 8	Definition und Charakterisierung der verschiedenen Levels-of-Service beim Gehen auf Treppen	79
Tab. 9	Geschwindigkeiten und Leistungsfähigkeiten beim Gehen in der Ebene und auf Treppen in Abhängigkeit von der Qualitätsklasse	83
Tab. 10	Bemessungsrichtwerte für Fussgängeranlagen	84

Schriftenreihe des IVT

Herausgegeben vom und zu beziehen beim Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau IVT an der ETH Zürich, ETH-Hönggerberg, CH-8093 Zürich.

Mit dieser Schriftenreihe werden die bis anhin separaten Reihen «Mitteilungen aus dem Institut für Strassen-Eisenbahn- und Felsbau» und «Lehrstuhl-Berichte» bzw. «IVT-Berichte» weitergeführt. Die bisher erschienen Schriften sind nachstehend aufgeführt.

Mitteilungen aus dem Institut für Strassen-, Eisenbahn- und Felsbau an der ETH Zürich

Nr.		Nr.	
1	1943 Die Lüftung der Alpenstrassen-Tunnel (W. Wirz)	21	1972 Erfahrungen mit der Ebenheitsmessung nach der Winkelmessmethode (S. Huschek)
2	1944 Die Reibungskennziffer als Kriterium zur Beurteilung von Strassenbelägen (Dr. E. Zipkes)	22	1970 Die Prüfung der mechanischen Eigenschaften von Gesteinen im dreiachsigen Spannungszustand (Dr. K. Kovari, A. Tisa, E. Hasler)
3	1945 Beurteilung der Konstruktion, Rauigkeit und Verkehrssicherheit von Strassenbelägen unter Verwendung der Reibungskennziffer (Prof. E. Thomann und Dr. E. Zipkes)	23	1972 Abnützung von Strassenbelägen durch den Verkehr, unter besonderer Berücksichtigung von Spikesreifen (S. Sulger Büel)
4	1947 Beanspruchung von Strassenbelägen durch metallische Systeme (Dr. E. Zipkes)	24	1973 Schäden durch den Gebrauch von Spikesreifen (Dr. E. Zipkes und S. Sulger Büel)
5	1954 Die Leistungsfähigkeit von ungesteuerten Verkehrsknotenpunkten (Dr. H. Rapp)	25	1973 Der Rundlauf als Mittel der Oberbaudimensionierung — Vorstudien zu einem Forschungsprojekt (I. Scazziga)
6	1957 Untersuchungen über die Leistungsfähigkeit von Überlandstrassen (M. Rotach)	26	1974 Höchstfestigkeit und Restfestigkeit von Gesteinen im Triaxialversuch (Dr. K. Kovari, A. Tisa)
7	1958 Das Motorrad im Überlandverkehr (M. Rotach)	27	1974 Haftvermögen von Spikesreifen auf eis- und schneefreier Strasse (S. Sulger Büel)
8	1960 Geschwindigkeiten auf zweispurigen Überlandstrassen (M. Rotach)	28	1974 Befahrbarkeitsmessungen auf Strassen nach der Winkelmessmethode — Neue Untersuchungen (S. Huschek)
9	1960 Lastwagen auf Steigungen (M. Rotach)	29	1974 Strassenbau-Forschung in der Schweiz (Dr. E. Zipkes)
10	1960 Die Lüftung der Autotunnel (Prof. J. Ackeret, Dr. A. Haerter, Prof. M. Stahel)	30	1975 Der Einfluss der Rillierung von Strassenoberflächen auf die Unfallhäufigkeit (Dr. E. Zipkes)
11	1960 Fahrräder auf Zweispurstrassen (M. Rotach)	31	1975 Griffigkeit und Verkehrssicherheit auf nasser Strasse (S. Huschek)
12	1960 Untersuchungen über die Ventilation von Stollen (Prof. H. Gessner, Prof. M. Stahel, H. Bühler, P. Schärer, F. Rutishauser)	32	1976 Erhebungen über die Beanspruchung der Strasse durch schwere Motorwagen (I. Scazziga)
13	1961 Griffigkeitsmessungen mit dem Rugosimètre (S. Bonomo)	33	1976 Geschichtliche Entwicklung der bituminösen Strassenbeläge (Dr. E. Zipkes)
14	1961 Das Äquivalent von Motorrädern (M. Rotach)	34	1976 Vergleich von Seilzaun und Doppelplanke anhand von Unfällen an Mittelschranken (M. Klingler, U. Seiler)
15	1961 Beschleunigungen von Personenwagen (C. Zuberbühler)	35	1977 Rollgeräusch und Strassenbelag — Fahrgeräusch, quantitative und qualitative Analyse — Kausalität (E. Eichenberger)
16	1967 Kenngrössen von Personenwagen (S. Sulger Büel)	36	1977 Flugbetriebsflächen — Grundlagen für die Dimensionierung und die Oberflächengestaltung (W. Busenhardt, I. Scazziga)
17	1968 Richtlinien für die Anordnung und Konstruktion von Leiteinrichtungen (P. Pingoud)		
18	1970 Neuere Leitschranken — Stand 1969 (P. Pingoud)		
19	1970 N1: Bern — Lenzburg — Unfälle an Mittelschranken, Seilzaun — Doppelplanke (P. Pingoud)		
20	1970 Die Lüftung der Tunnel während dem Ausbruch (Arbeitsgruppe für Lüftung im Tunnelbau)		

- | | | | |
|-----|---|-----|---|
| Nr. | | Nr. | |
| 37 | 1977 | 48 | 1982 |
| | Internationales Kolloquium über die plastische Verformbarkeit von Asphaltmischungen | | Verhalten des Strassenoberbaus unter wiederholter Belastung — Versuch Nr. 1 auf der ISETH-Rundlaufanlage (H. P. Rossner, I. Scazziga) |
| 38 | 1977 | 49 | 1982 |
| | Ebenheitsmessungen auf Strassen (S. Huschek, G. Bachner) | | ISETH-Strassenbau colloquien, Wintersemester 1981/82 |
| 39 | 1978 | 50 | 1982 |
| | Lüftung im Untertagbau (Dr. A. Haerter, R. Burger) | | International Colloquium - Full Scale Pavement Tests, Colloque International - Essais routiers en vraie grandeur |
| 40 | 1978 | 51 | 1982 |
| | Beleuchtung und Unfallhäufigkeit in Strassentunneln (U. Graf und M. Ghielmetti) | | Morphologische Beurteilung verdichteter bituminöser Mischungen (Ch. Angst) |
| 41 | 1979 | 52 | 1983 |
| | Griffigkeitsmessungen mit dem Skiddometer — weitere Ergebnisse (R. Pelloli) | | Simulation von Eisenbahnsystemen mit RWS-1 (P. Giger) |
| 42 | 1979 | 53 | 1983 |
| | Die Beurteilung des Verformungswiderstandes bituminöser Mischungen durch den Kriechversuch (S. Huschek, P. Staub) | | Beurteilung der Griffigkeit auf Fahrbahnen (F. Bühlmann) |
| 43 | 1979 | 54 | 1983 |
| | Anfahrversuche an Varianten der Seilleit-schranke System British Ropes (M. Klingler) | | Zum Verformungsverhalten von Asphaltbeton unter Druck (S. Huschek) |
| 44 | 1980 | 55 | 1985 |
| | Mechanische Eigenschaften von Filler-Bitumen-Gemischen/Einfluss der Verdichtungsart auf die mechanischen Eigenschaften von Asphaltprüfkörpern (S. Huschek, Ch. Angst) | | Einfluss der Witterung auf die Griffigkeit von Fahrbahnen, ein Beitrag zur Verkehrssicherheit auf überdeckten Strecken (F. Bühlmann) |
| 45 | 1980 | 56 | 1984 |
| | Beläge mit diskontinuierlichem Kornaufbau (Dr. E. Zipkes) | | Griffigkeit - Bremsspur - Kraftübertragung (Dr. E. Zipkes) |
| 46 | 1981 | 57 | 1984 |
| | Der Einfluss der Verdichtung auf die mechanischen Eigenschaften bituminöser Schichten (Ch. Angst) | | Reifengeräusch und Strassenbau, Internationales Seminar, Zürich, 9./10. Februar 1984 |
| 47 | 1981 | 58 | 1985 |
| | Numerische Erfassung rheologischer Probleme in der Felsmechanik (P. Fritz) | | Verhalten des Strassenoberbaues unter dynamischer Radlast (S. Huschek) |

Reihe abgeschlossen

Schriftenreihe «Lehrstuhl-Berichte» und «IVT-Berichte»

- | | | | |
|----------|--|----------|--|
| LSB 72/1 | Modelluntersuchungen an regionalen Güterverkehrspotentialen (M. Eggenschwiler) | IVT 81/1 | Beispiele von Wohnschutz-Massnahmen (Prof. M. Rotach, P. Bachmann, M. Stöcklin) |
| LSB 73/1 | Motorisierungsprognosen (F. Gerber, B. Ranft) | IVT 81/2 | Untersuchung der Gesetzmässigkeiten des Wochenendverkehrs mit verhaltensorientierten, disaggregierten Modellansätzen (G. Gottardi) |
| LSB 73/2 | Gesetzmässigkeiten im Verkehrsablauf von Grossparkierungsanlagen
1. Teilbericht VSS FA 8/67 | IVT 81/3 | Forschungen zum Wohnschutz (Prof. M. Rotach, P. Bachmann, J. M. Groh, K. Infanger) |
| LSB 74/1 | Landesplanerische Datenbank der Schweiz, Liniendatei (F. Karli, Prof. C. Hidber) | IVT 81/4 | Ausbaugrad und Verkehrssicherheit von Hochleistungsstrassen (Prof. K. Dietrich) |
| LSB 74/2 | Wurde als LS-Notiz 74/1 publiziert, «Aggregatzustände des Verkehrssystems» (R. Meyer, Prof. C. Hidber) | IVT 81/5 | Fahrplanabhängigkeit des Fahrgastzuflusses zu Haltestellen (H. Müller) |
| LSB 74/3 | Wurde als LS-Notiz 74/2 publiziert «Über demografische Determination des städt. Personenverkehrs» (F. Gerber) | IVT 82/1 | Auswirkungen der N6 mit Rawiltunnel auf 1800m ü.M. auf den Autoverlad am Lötschberg (Prof. C. Hidber, M. Stöcklin, G. Abay) |
| LSB 74/4 | Regionale Potentiale des Güterbinnenverkehrs der Schweiz (F. Gerber, Prof. C. Hidber) | IVT 82/2 | Innerbetriebliche Gesetzmässigkeiten des öffentlichen Linienbetriebs (W. Berg) |
| LSB 74/5 | Regionale Verteilungsmodelle für den Güterbinnenverkehr der Schweiz, gegliedert nach Warengruppen | IVT 82/3 | Versuche mit Wohnschutz-Massnahmen (Prof. M. Rotach, J. M. Groh, K. Infanger, P. Bachmann) |
| IVT 76/1 | Radfahrer im Verkehr
Eine Literaturlauswertung (H. Werdin) | IVT 82/4 | Das Werk mit dieser Nummer wurde zurückgezogen |
| IVT 77/1 | Potential- und Verteilungsmodelle des schweiz. Binnengüterverkehrs nach Warengruppen und Regionen (F. Gerber, Prof. C. Hidber) | IVT 82/5 | Gesamtschweizerisches Modell des Wochenendverkehrs im Winter (Prof. C. Hidber, G. Gottardi, M. Stöcklin, H. Schwegler) |
| IVT 77/2 | Potential- und Verteilungsmodelle für den schweiz. Stückgutverkehr nach Regionen (F. Gerber, Prof. C. Hidber) | IVT 82/6 | Funktionale Gliederung und Optimierung von Strassennetzen (Prof. C. Hidber, Ruth Schmidiger) |
| IVT 78/1 | Zukunftsaussichten des Huckepackverkehrs in der Schweiz (Prof. H. Brändli, F. Reutimann) | IVT 83/1 | Projektierungsempfehlung zur Verkehrsberuhigung (Prof. M. Rotach, J. M. Groh, P. Bachmann) |
| IVT 78/2 | Landesplanerische Datenbank der Schweiz, Liniendatei — Schlussbericht (F. Karli, Prof. C. Hidber) | IVT 83/2 | Zwischentypen. Eine Untersuchung über mögliche Betriebsformen für Hochleistungsstrassen (Prof. K. Dietrich, E. Boppart, H. P. Lindemann, P. Spacek) |
| IVT 78/3 | Einfluss des Anmarschweges auf die Benützung öffentlicher Verkehrsmittel (Prof. H. Brändli, R. Siegrist, R. Enz, W. Altherr) | IVT 84/1 | Theorie und Praxis der Kosten-Nutzen-Analyse im Verkehrswesen (Prof. C. Hidber, Prof. G. Hauser, E. Meier) |
| IVT 78/4 | Regionalisierung im öffentlichen Personenverkehr (Prof. H. Brändli, F. Kobi) | IVT 84/2 | Kosten-Nutzen-Analyse für Verkehrsinvestitionen (G. Abay) |
| IVT 78/5 | Definition und Typisierung von Wohngebieten (Prof. M. Rotach, P. Bachmann, C. Hächler) | IVT 84/3 | Kosten-Nutzen-Analyse der SBB-Flughafenlinie Zürich HB — Zürich Flughafen (Prof. C. Hidber, G. Abay, E. Meier) |
| IVT 78/6 | Verkehrskosten im Stadtverkehr bei unterschiedlicher Verkehrsteilung (B. Porro) | IVT 84/4 | Bewertung der geplanten S-Bahn-Station Universität aus vorhandenen Unterlagen (Prof. H. Brändli, Prof. K. Dietrich, Prof. C. Hidber, Prof. M. Rotach, E. Boppart, P. Schirato) |
| IVT 79/1 | Wohnschutz-Massnahmen (Prof. M. Rotach, B. Bachmann, C. Hächler) | IVT 84/5 | Geschwindigkeiten von Lastwagen in Steigungen und Gefällen (P. Spacek, Ph. Düggeil) |
| IVT 79/2 | Aufbau von Strassennetzen (Prof. M. Rotach, H. Werdin) | IVT 84/6 | Die situative Geschwindigkeit, ein Massstab zur Beurteilung von Kurven (Dr. C. Friedinger) |
| IVT 79/3 | Baulich integrierte Stadtstrassen (BISS) (Prof. M. Rotach, R. Zeltner) | IVT 85/1 | Verkehrsangebot Schweiz 1970 — 85 auf Schiene, Strasse, Wasser, Luft und Rohrleitungen (Prof. C. Hidber, N. Bischofberger) |
| IVT 80/1 | Neue Betriebsformen für den öffentlichen Verkehr in ländlichen Räumen (Prof. H. Brändli, M. Muheim, F. Reutimann) | | |
| IVT 80/2 | Motorisierungsprognose 1985 — 2000 (Prof. C. Hidber, M. Stöcklin) | | |

Reihe abgeschlossen

«Schriftenreihe des IVT»

- | | |
|--|--|
| <p>59 1989 Aufteilung von Erholungsaktivitäten im Raum und in der Zeit (Dr. A. Deloukas)</p> <p>60 1986 «Baulich integrierte Strassen» (Prof. M. Rotach, F. Hoppler, M. Burgherr, M. Grieder)</p> <p>61 1986 Unterhaltskosten von Trolley- und Dieselnbussen in der Schweiz (Prof. H. Brändli, B. Albrecht, H. Müller, E. Schmid)</p> <p>62 1986 Eichung und Validation eines Umlegungsmodelles für den Strassengüterverkehr (E. Meier)</p> <p>63 1986 Fahrpläne für die Zürcher S-Bahn (G. Rey)</p> <p>64 1987 Quergefälle in Geraden und Kurven (P. Spacek)</p> <p>65 1987 Simulation von Eisenbahnsystemen mit RWS-1 (zweite, überarbeitete Auflage) (P. Giger)</p> <p>66 1986 Siedlung-Verkehrsangebot-Verkehrsnachfrage (Prof. M. Rotach, F. Hoppler, H. Bruderer, M. Mötteli)</p> <p>67 1987 N 13, Au-Haag Auswirkungen der Sofortmassnahmen vom Sommer 1984 auf das Unfallgeschehen (Prof. K. Dietrich, P. Spacek)</p> <p>68 1987 Entwicklung des Schweizerischen Personenverkehrs 1960-1990 (Prof. C. Hidber, J.-P. Widmer)</p> <p>69 1988 mac Trac-interaktives Programm für Zuglaufrechnungen, Benutzerhandbuch (P. Brunner)</p> <p>70 1988 Mehrdimensionale Bewertungsverfahren und UVP im Verkehr (Prof. C. Hidber, Prof. G. Hauser, P. Schirato)</p> <p>71 1988 Ein Beitrag zur Umlegung: Ausgewählte Probleme und Lösungsansätze - Eine Untersuchung im Rahmen des Projektes «Marcus Aurelius», Bericht III (Prof. C. Hidber, M. Keller)</p> <p>72 1988 Flexible Betriebsweise Die Kombination von Linien- und Bedarfsbetrieb auf einer Buslinie (Prof. H. Brändli, B. Albrecht, K. Bareiss)</p> <p>73 1988 Von der Bahn 2000 zum System öV 2000 (Prof. H. Brändli, B. Albrecht, W. Glünkin)</p> <p>74 1988 Planung des öffentlichen Verkehrs in nichtstädtischen Gebieten (Prof. H. Brändli, H. Amacker)</p> <p>75 1989 Simulation of Railway Networks with RWS-1 (P. Giger)</p> <p>76 1989 Einfluss des Mischprozesses auf die Qualität bituminöser Mischungen (M. Kronig)</p> <p>77 1989 Regionale Arbeitsmobilität (W. Dietrich)</p> <p>78 1989 Zur Bewertung der Wirkung sicherheitsorientierter Massnahmen im Eisenbahnbetrieb (R. Röttinger)</p> <p>79 1989 Bewertung der offiziellen NEAT-Varianten Alpentransversalen (W. Schurter, N. Bischofberger)</p> | <p>80 1989 DQM-2 Ein Gerät zur dynamischen Querprofilmessung auf Strassen (U. Scheifele)</p> <p>81 1989 Neuverkehr infolge Ausbau und Veränderung des Verkehrssystems (Dr. E. Meier)</p> <p>82 1989 Entwicklung von Verhaltensmodellen als Grundlage eines programmierten Erhaltungskonzeptes, Teil 1: Modelle für bleibende Verformungen (J.-D. Zufferey, D. Monsch, I. Scazziga)</p> <p>83 1989 Moderne EDV-Anwendungen zur Verkehrsbeeinflussung (Prof. C. Hidber, W. Schurter)</p> <p>84 1989 Berufspendlerverkehr 1950-1990 Entwicklung des Berufspendlerverkehrs der schweizerischen Agglomerationen (Prof. C. Hidber, N. Bischofberger)</p> <p>85 1990 Drainasphalt Beobachtungen des Verhaltens von hohlraumreichen Verschleisschichten unter Verkehr (H. Köster)</p> <p>86 1991 Güterverkehrsaufkommen in Industriegebieten (P. Schirato, Prof. C. Hidber)</p> <p>87 1991 Langzeitverhalten von bituminösen Drainbelägen Teil 1: Lärmverhalten von Drainbelägen (T. Isenring)</p> <p>88 1991 EDV-Anwendungen im Verkehrswesen 1989/90 (Prof. C. Hidber, W. Schurter)</p> <p>89 1991 Sichtweiten. Ueberprüfen der Grundlagen zur VSS-Norm SN 640 090 Projektierungsgrundlagen, Sichtweiten (Dr. F. Bühmann, H. P. Lindenmann, P. Spacek)</p> <p>90 1992 Transporttechnik der Fussgänger Transporttechnische Eigenschaften des Fussgängerverkehrs (U. Weidmann)</p> <p>91 1992 Optimierung in Verkehrsplanung, Transporttechnik und Logistik (Referate Weiterbildungskurs vom 16/17. Oktober 1991)</p> <p>92 1992 Elemente eines computergestützten Werkzeugs zur Entwicklung von Eisenbahnsicherungsanlagen mit Petri-Netzen (M. Montigel)</p> |
|--|--|

Ausserhalb der IVT-Schriftenreihe erschienene Berichte:

- 1986 Behinderte im Strassenverkehr Arbeitsbericht (G. Oswald)
- 1987 Gestaltung von Kantonsstrassen in Ortskernen (HP. Lindenmann, St. Frey, M. Schwob)
- 1988 EDV-Anwendungen im Verkehrswesen (Prof. C. Hidber / B. Albrecht / E. Meier / W. Schurter)
- 1989 Sicherheit an Bus- und Tramhaltestellen (Prof. H. Brändli / F. Kobi)
- 1990 Verkehrsplanung im Toggenburg Auswertung der Diplomarbeit Herbst 1989 und der Arbeiten des 7. Semesters 1989 / 1990 (M. Grob)