

Transporttechnik der Fussgänger

Transporttechnische Eigenschaften des Fussgängerverkehrs, Literaturlauswertung

Report

Author(s):

Weidmann, Ulrich

Publication date:

1992-01

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000687810>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Originally published in:

IVT Schriftenreihe 90

Transporttechnik der Fussgänger

Transporttechnische
Eigenschaften des
Fussgängerverkehrs
Literaturauswertung

Ulrich Weidmann
dipl. Ing. ETH/SIA
Verkehringenieur SVI

Schriftenreihe des IVT Nr. 90
Zürich, Januar 1992

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	Verteilung der Geschlechter	9
2.3	Altersverteilung	10
2.4	Grösse	13
	2.41 Grössenverteilung	13
	2.42 Körperproportionen und Platzbedarf	14
2.5	Biomechanik und Physiologie	16
	2.51 Bewegungsabläufe	16
	2.52 Energieverbrauch	20
	2.53 Leistungsfähigkeit	26
3.	Geschwindigkeitsverhalten der Fussgänger	35
3.1	Mittelwert	35
3.2	Abhängigkeit von verschiedenen Einflüssen	35
	3.21 Ueberblick	35
	3.22 Eigenschaften der Fussgänger	36
	3.23 Begleitumstände der Bewegung	37
	3.24 Charakteristiken der Anlage	42
	3.25 Einfluss der Fussgängerdichte	44
3.3	Streuung der Fussgängergeschwindigkeiten	46
4.	Dimensionierung von Fussgängeranlagen	47
4.1	Grundlagen der Dimensionierung	47
	4.11 Grundbeziehung	47
	4.12 Genereller Verlauf der Leistungsfähigkeit	47
4.2	Fussgängerdichte und nutzbare Breite des Verkehrsraumes	48
	4.21 Platzbedarf	48
	4.22 Nutzbare Breite des Verkehrsraumes	52
4.3	Leistungsfähigkeit der Fussgängeranlagen	53
	4.31 Leistungsfähigkeit in der Ebene	53
	4.32 Leistungsfähigkeit von Treppen	57
4.4	Zulässige Belastung der Verkehrsanlagen	59
	4.41 Das Level-of-Service-Konzept	59
	4.42 Richtwerte der zulässigen Belastungen	64

5.	Zusammenfassung und Folgerungen	67
5.1	Zusammenfassung der wichtigsten Fakten	67
	5.11 Eigenschaften der Fussgänger	67
	5.12 Geschwindigkeitsverhalten der Fussgänger	68
	5.13 Leistungsfähigkeit von Fussgängeranlagen	70
5.2	Folgerungen und Schwerpunkte weiterer Forschungsarbeiten	71
A.	Anhang	73
A.1	Literatur	73
A.2	Abkürzungsverzeichnis	81
A.3	Abbildungsverzeichnis	82
A.4	Verzeichnis der Tabellen	84

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 Fussgängeranlagen von zentraler Bedeutung ist. Namentlich im städtischen Raum und im Zusammenhang mit dem öffentlichen Verkehr wird man mit Fragestellungen konfrontiert, zu deren Beantwortung genaue transporttechnische Kenntnisse über den Fussgängerverkehr 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 geballten kurzzeitigen Belastungen der Knotenpunktbahnhöfe. Dabei wird nicht nur die Leistungsfähigkeit der Fussgängeranlagen kritisch, sondern mit zunehmender Fussgängerdichte sinkt auch die Geschwindigkeit. Die Annahmen bezüglich der Umsteigezeiten 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 werden auch die Fahrgastwechselzeiten durch Rückstauerscheinungen 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. Augenfällig wird dabei, dass gerade der Mikrobereich (Haltestellenzugänge) sehr sorgfältig geplant werden muss.

Mit diesen Beispielen soll es sein Bewenden haben, zeigen sie doch genügend, 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, das Geschwindigkeitsverhalten und der Platzbedarf sowie die Leistungsfähigkeit verschiedener Anlagentypen.

Rahmen der Arbeit ist ein Forschungsprojekt über den Fahrgastwechsel im öffentlichen Personenverkehr. Ausgangspunkt war der Mangel an Fahrgastwechseluntersuchungen, was eine gezielte transporttechnische Fussgängeruntersuchung nötig machte. Nur gestreift werden daher die in der Fachliteratur intensiv behandelten Fahrbahnüberquerungen. Unberücksichtigt bleiben planerische Aspekte des Fussgängerverkehrs. Zu architektonischen Gesichtspunkten, zur Schätzung des Verkehrsaufkommens, zu den zeitlichen Gesetzmässigkeiten, zu den Verkehrszwecken und zur Verkehrsmittelwahl werden somit keine Aussagen gemacht. Diese Literaturlauswertung erhält dadurch zwangsläufig eine einseitige Gewichtung, was aber nicht zur Auffassung verleiten soll, dass der Fussgängerverkehr auf der technischen Ebene abschliessend behandelt werden kann.

1.3 Vorgehen

Grundlage der Literaturstudie bilden rund 150 Veröffentlichungen zum Fussgängerverkehr in Fachzeitschriften und Büchern der letzten Jahrzehnte mit Schwerpunkt im deutschen und angelsächsischen Sprachraum. Soweit als möglich wurde der Versuch gewagt, die Literaturangaben mit dem Ziel zuverlässiger Richtwerte in Uebereinstimmung zu bringen. Das Schwergewicht der Hauptarbeit gestattete aber keine eigenen Felduntersuchungen, obschon dies im Sinne der Ergänzung und Eichung angezeigt gewesen wäre.

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 ihre Gesetzmässigkeiten.
 - Im zweiten Teil (Kapitel 3) wird das Geschwindigkeitsverhalten der Fussgänger in Beziehung gebracht mit den Eigenschaften des Fussgängers und der Fusswege, den Besonderheiten der Anlagen sowie der Fussgängerdichte. Schliesslich wird die zu erwartende Streuung der Fussgängergeschwindigkeiten diskutiert.
-

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

Zum Verständnis des verkehrstechnischen Verhaltens der Fussgänger sind einige Kenntnisse über jene Fussgängereigenschaften erforderlich, welche dieses bestimmen. 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 Physiologie und der Biomechanik. Der Vergleich mit den verkehrstechnischen Erkenntnissen erfolgt in den Kapiteln 3 und 4.

2.2 Verteilung der Geschlechter

Das Geschlecht eines Menschen beeinflusst die körperliche Leistungsfähigkeit und mit- hin die Gehgeschwindigkeit. Die Kenntnis der prozentualen Anteile in einem Fussgän- gerkollektiv 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 [128]. Bei allen übrigen Altersgruppen überlagern sich hingegen dem natürlichen Geschlech- terverhältnis demographische und soziale Einflüsse. Namentlich die ausländische Er- werbsbevölkerung, welche aus rechtlichen und teilweise wirtschaftlichen Gründen vor- wiegend aus jüngeren Männern besteht, kann zu einer Verzerrung führen. Dadurch wird in den unteren Alterskategorien die grössere Sterblichkeit der Männer zunächst über- kompensiert. In der Stadt Zürich, welche für mittlere Grossstädte hinreichend repräsen- tativ sein dürfte, wird erst in der Alterskategorie der 40- bis 44-jährigen wieder der Gleichstand erreicht. In der Altersgruppe der 60- bis 64-jährigen kommen auf 100 Frau- en lediglich noch 77 Männer, in der Altersgruppe zwischen 85 und 89 Jahren sind es sogar nur noch deren 40 [128].

Der verkehrstechnische Nutzen dieser Informationen muss leider beschränkt bleiben, da sich die betrachteten Fussgängerkollektive kaum je so zusammensetzen, dass alle Al- tersschichten und beide Geschlechter dem statistischen Mittel entsprechend vertreten sind. Die Differenzen entstehen durch die unterschiedliche Lebensweise (Berufstätigkeit, Wirtschaftsbranche) sowie durch eine andere Verkehrsmittelwahl (Frauen benützen überdurchschnittlich häufig öffentliche Verkehrsmittel). Beispielhaft hat dies [92] für eine Geschäftsstrasse in Bonn untersucht und dabei sowohl einen Tagesgang wie einen Wo- chengang festgestellt.

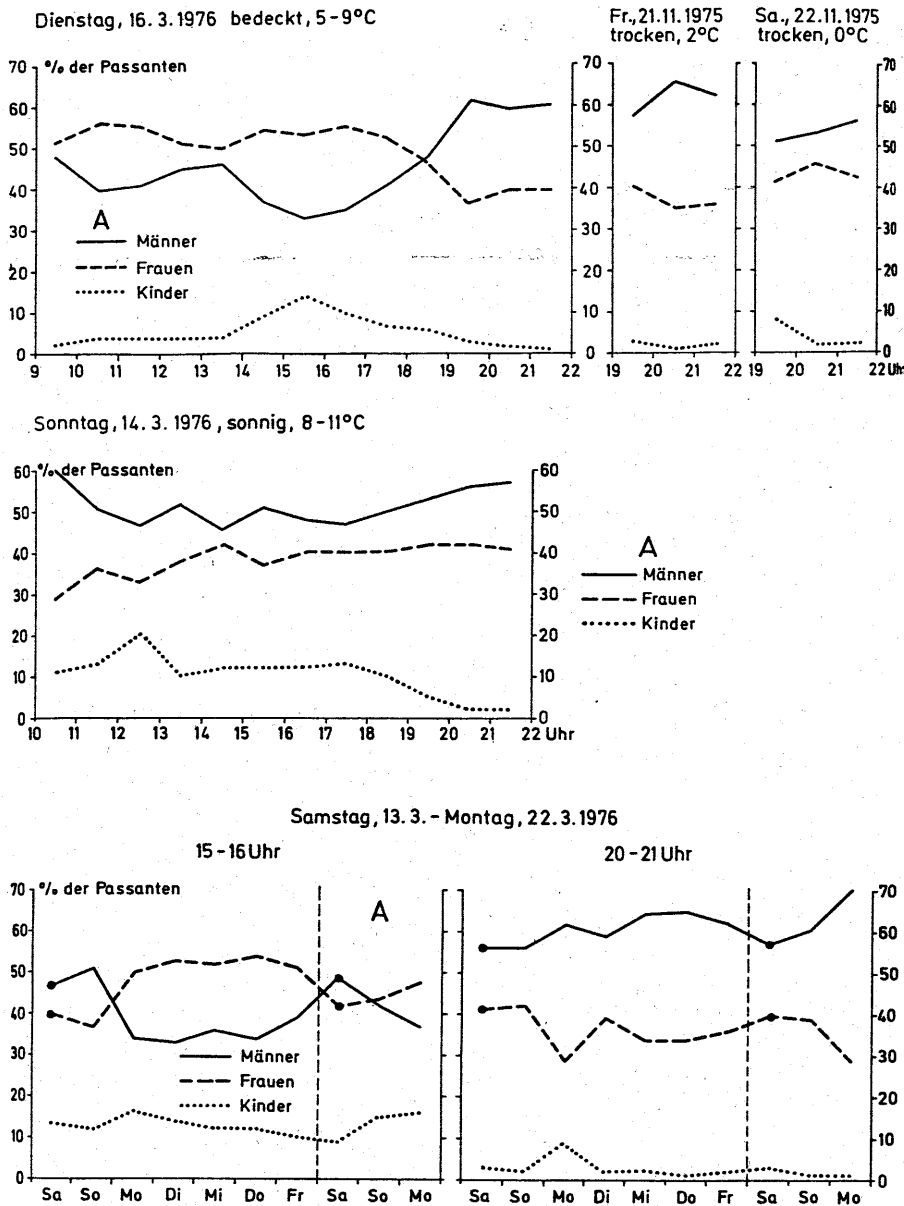


Abb. 1: Passantenstruktur nach Geschlecht in der Sternstrasse in Bonn. Oben: Tagesganglinie; unten: Wochenganglinie (Abbildung: [92]).

2.3 Altersverteilung

Aus dem oben genannten Grund ebenfalls nur eine mässige Aussagekraft hat die gegenwärtige Altersverteilung in der Bevölkerung. Wesentlich sind aber für den Verkehringenieur die 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.

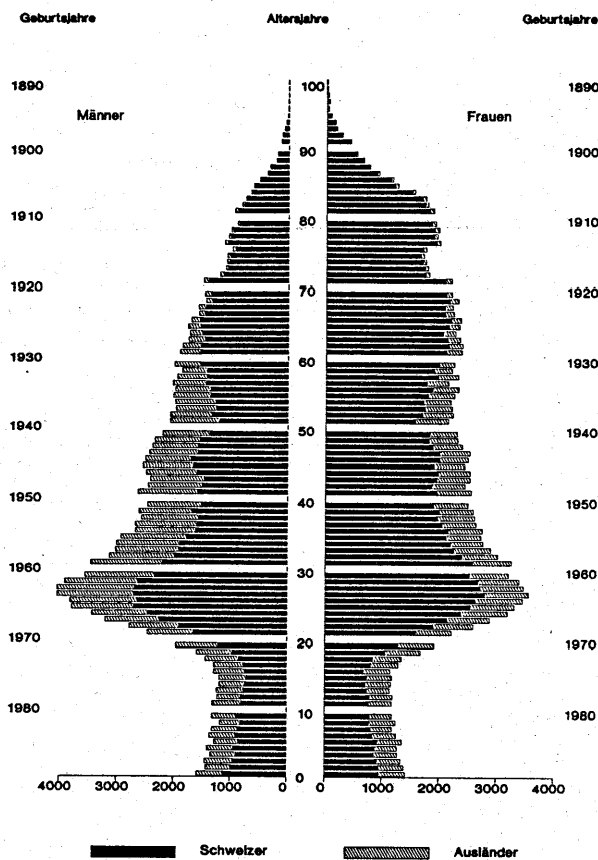


Abb. 2: Alterspyramide der Stadt Zürich, Stand 1990 (Abbildung: [128]).

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

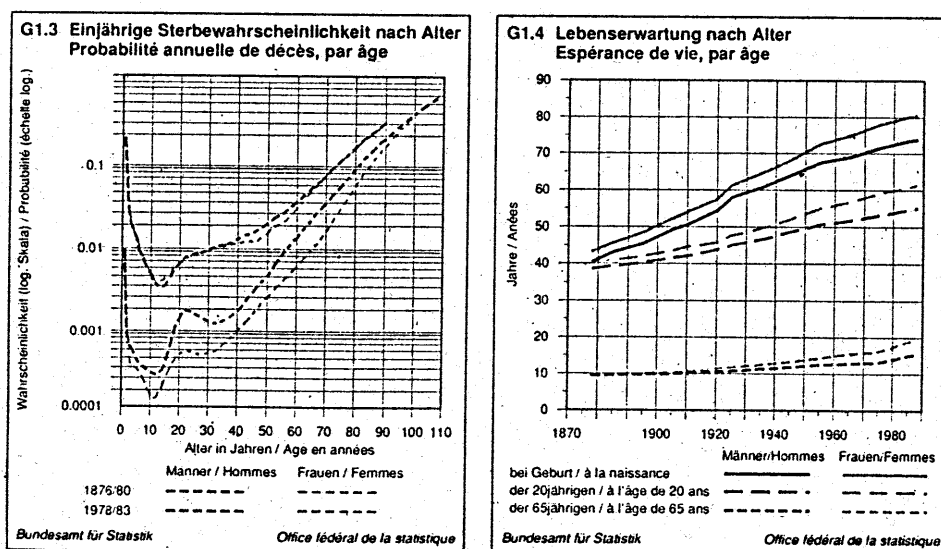


Abb. 3: Sterbewahrscheinlichkeit (links) und Lebenserwartung (rechts) der Schweizer Bevölkerung nach Alter und Geschlecht (Abbildung: [127]).

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 führt vor allem das Absinken der Sterblichkeit in jüngeren Jahren zu einer höheren statistischen Lebenserwartung. 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 [108].

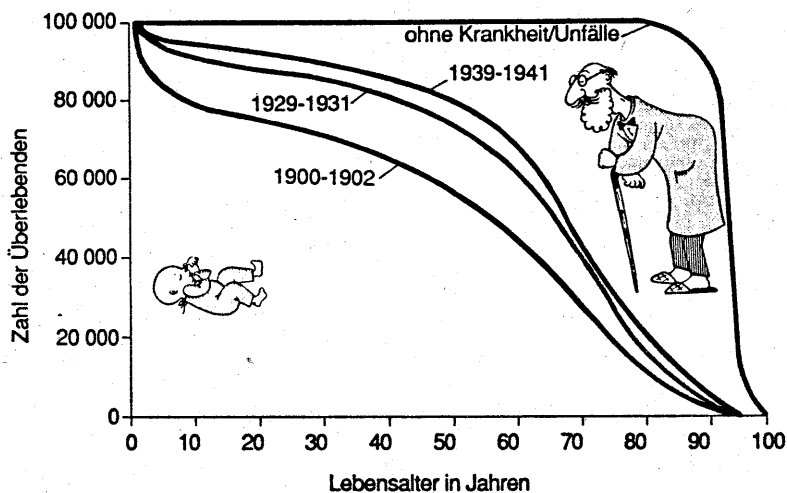


Abb. 4: Ueberlebensrate von jeweils 100'000 US-Amerikanern in aufeinanderfolgenden Zeiträumen. Die oberste Kurve stellt die theoretische Ueberlebenskurve ohne Krankheiten oder Unfälle dar (Abbildung: [108]).

Die Restlebenserwartung der beiden Geschlechter gleicht sich im höheren Alter wieder an, was aufgrund der erwähnten Einflüsse auf die Lebenserwartung als plausibel erscheint [128].

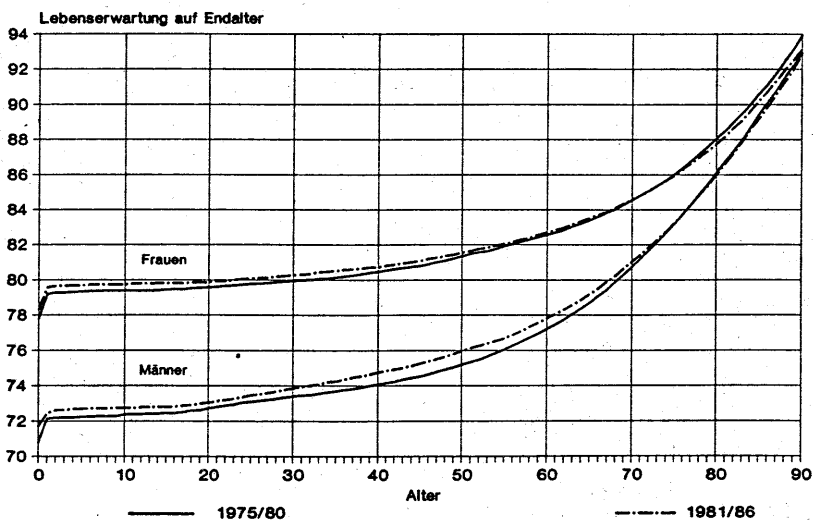


Abb. 5: Lebenserwartung auf Endalter in der Stadt Zürich (Abbildung: [128]).

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

2.4 Grösse

2.41 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 sind 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 [72].

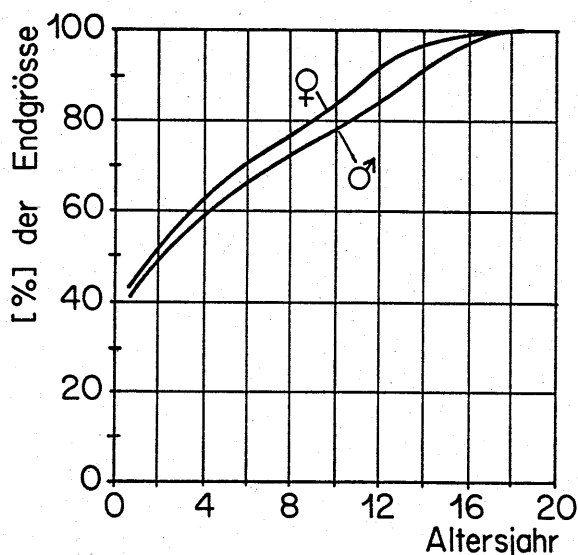


Abb. 6: Wachstumsverlauf von Kindern in Prozenten der erreichten Endgrösse (Abbildung: IVT nach [38], [50]).

Die mittlere Körpergrösse wächst zumindest in Europa und Nordamerika seit Jahrzehnten beständig, was als Akzeleration bezeichnet wird. Erklärt wird sie mit den veränderten Ernährungsgewohnheiten, so beispielsweise der Verwendung von raffiniertem Zucker. Das Ausmass der Akzeleration ist mit ungefähr 1.1 cm pro Jahrzehnt beachtlich und hat die mittlere Körpergrösse allein seit dem Zweiten Weltkrieg um rund 5 cm ansteigen lassen. In jüngster Zeit scheint sie sich zu verlangsamen [38], [65].

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.

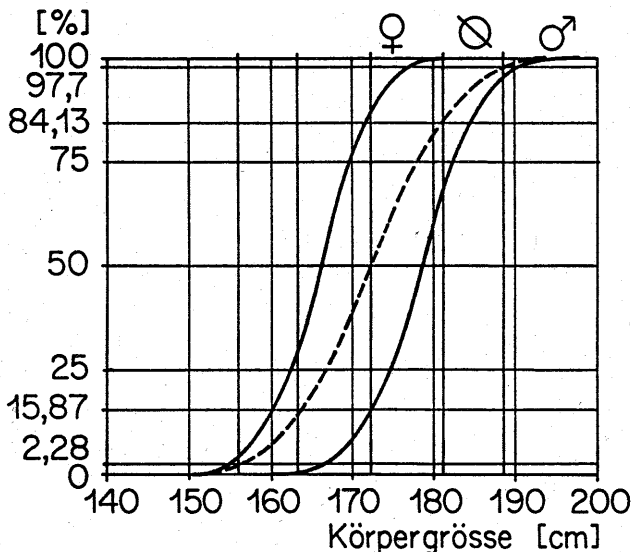


Abb. 7: Grössenverteilung erwachsener Menschen in Mitteleuropa, nach Geschlecht und total (Abbildung: IVT).

In südlichen und asiatischen Ländern liegen die Werte tiefer. [34] 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 [72] sind erwachsene Mitteleuropäer auch ungefähr 1 bis 2 cm grösser als Einwohner von Grossbritannien.

2.42 Körperproportionen und Platzbedarf

2.42.1 Körperproportionen

Für diese Untersuchung sind das Verhältnis zwischen Körpergrösse und Beinlänge beziehungsweise minimalem Platzbedarf, indirekt also den Maximalmassen in den beiden Körperhaupttrichtungen von Belang.

Die Länge der Gliedmassen der Frau ist im Vergleich zu jener des Mannes 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 [38], [94], [126], [136]. Die unterschiedliche Wachstumsgeschwindigkeit der einzelnen Körperteile führt dazu, dass Kinder andere Körperproportionen aufweisen als Erwachsene.

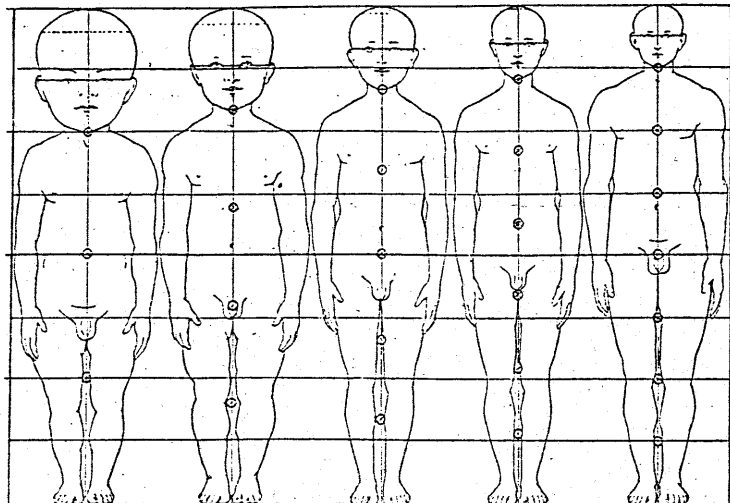


Abb. 8: Verschiebung der Körperproportionen im Laufe des Wachstums (Abbildung: [126] nach Stratz).

Die maximale Körperbreite beträgt für mittlere Verhältnisse bei Männern 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 [38].

2.42.2 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 [38] 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 .

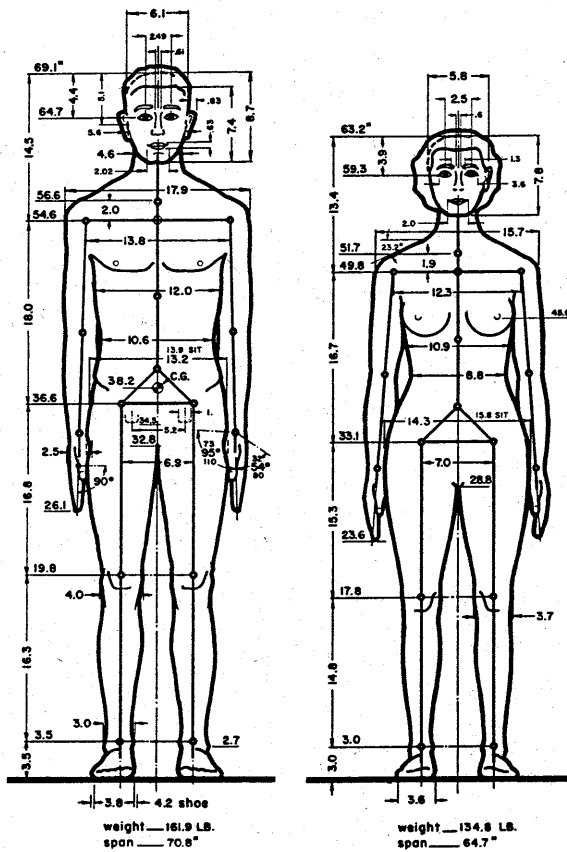


Abb. 9: Anthropometrische Daten eines stehenden Mannes und einer stehenden Frau, Durchschnittswerte für USA-Bevölkerung ca. 1960, alle Angaben in [inch] (Abbildung: [38]).

Der Platzbedarf eines stehenden Menschen unter praktischen Bedingungen umfasst zusätzlich die Füße, die Kleidung sowie die nicht ausgefüllten 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 projizierten Fläche. Dies entspricht einer Fussgängerdichte von rund 6.6 P/m^2 , welche nicht überschritten werden kann [20], [67], [110]. Allfällig mitgeführtes Gepäck lässt die praktisch erreichbare Fussgängerdichte weiter absinken.

2.5 Biomechanik und Physiologie

2.51 Bewegungsabläufe

Die Muskelkräfte, die äusseren Reaktionskräfte, die Schwerkraft, die Trägheitskräfte sowie die Reibung bestimmen die Bewegungsabläufe des Menschen. Der Aufbau des Bewegungsapparates lässt nur Rotationen zu, weshalb alle Bewegungen darauf zurückgeführt werden müssen. Es bilden sich kinematische Ketten, zusammengesetzt aus einer Anzahl Gliedern und Gelenken, weshalb der kybernetische Mechanismus äusserst komplex ist [52].

Die Bewegung eines Beines lässt sich als Pendelbewegung idealisieren. Die Gehgeschwindigkeit und der Energieverbrauch des Menschen hängen daher mit dessen Eigenfrequenz zusammen [37]. 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 [129]. 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 somit 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 ist mindestens ein Fuss und während kurzer Zeit beide Füße in Kontakt mit dem Boden. Beim Laufen tritt dagegen zwischen den Stützphasen eine Flugphase auf [37].

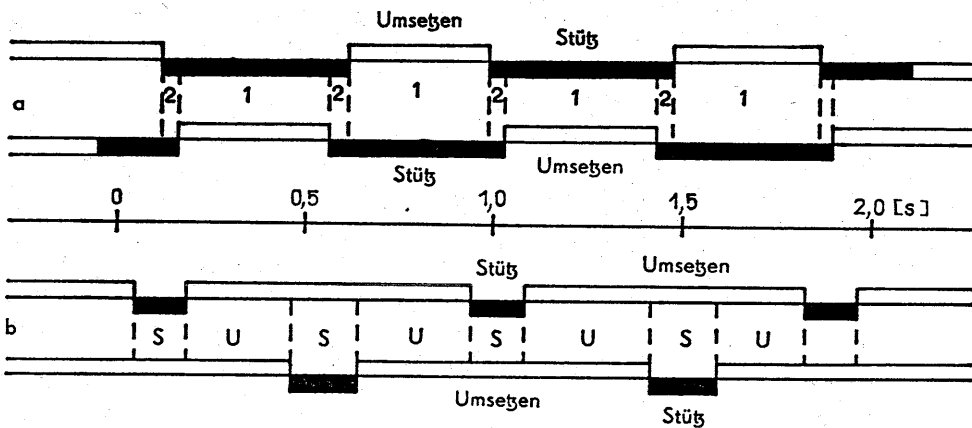


Abb. 10: Chronogramm von Gehen (a) und Laufen (b) (Abbildung: [37]).

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

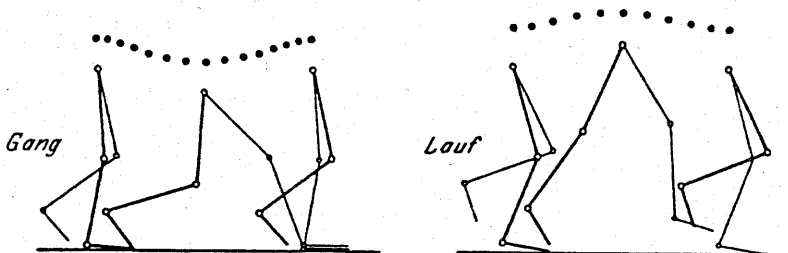


Abb. 11: Verlauf der Schwerpunktlage des Körpers während des Bewegungsvorganges beim Gehen beziehungsweise beim Laufen (Abbildung: [14]).

Während der Gehbewegung unterliegt der Körperschwerpunkt vielfältigen Beschleunigungen und Verzögerungen.

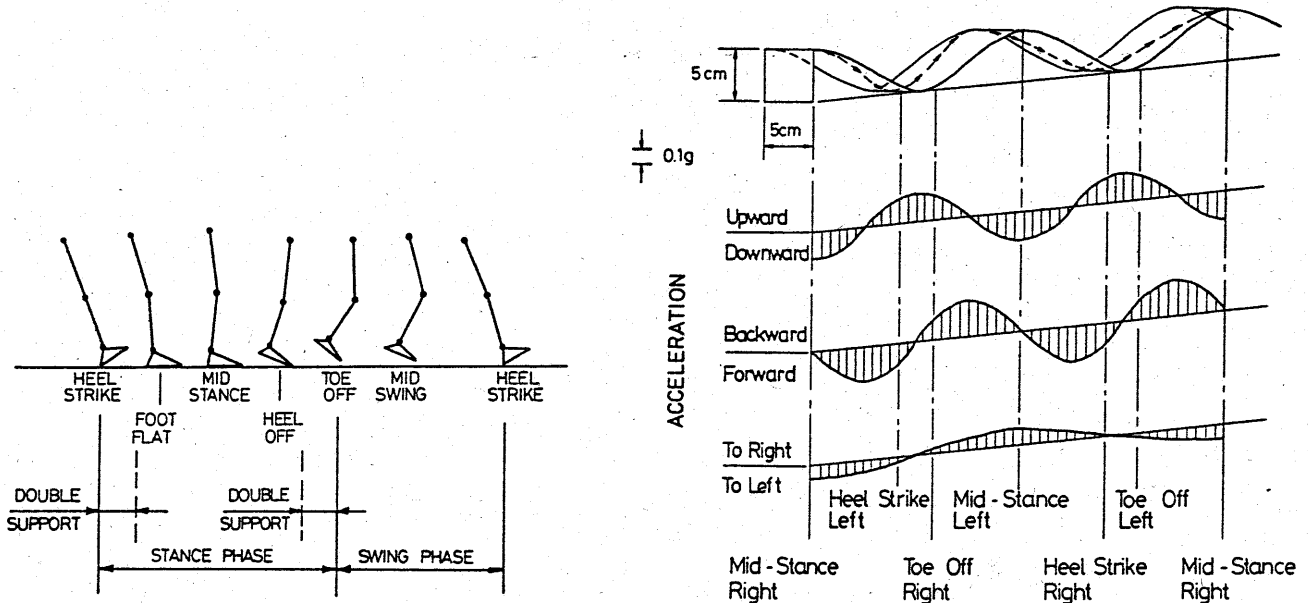


Abb. 12: Links: Phasenverlauf der Bewegung eines Beines. Rechts: Bewegung des Körperschwerpunktes und Verlauf der auf ihn einwirkenden Beschleunigungen und Verzögerungen (Abbildung: [94]).

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% der statischen Gesamtlast.

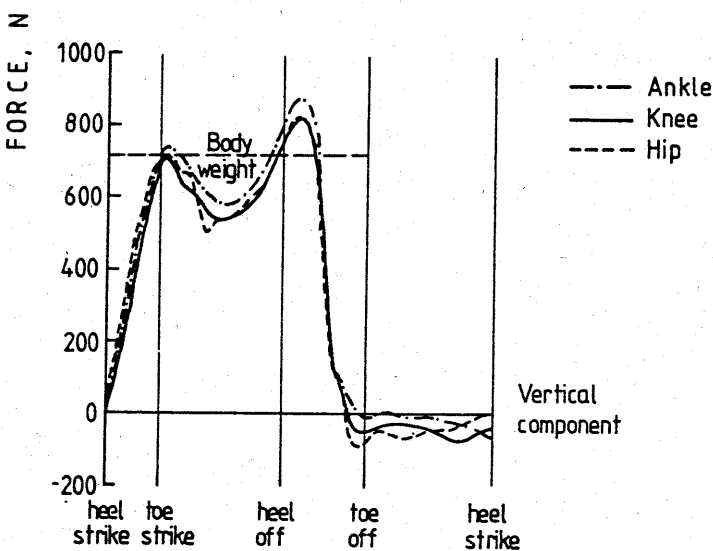


Abb. 13: Gelenkkräfte beim Gehen in der Ebene (Abbildung: [94]).

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 [88] gilt dafür folgende Beziehung:

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

wobei l_s = Schrittlänge [m]
 v_F = Fussgängergeschwindigkeit [m/s]

Ueber einer Gehgeschwindigkeit von 2.5 m/s kann laut [88] nur noch die Frequenz erhöht werden. Dies stimmt mit den Angaben von [99] überein, wonach bei 2.0 m/s die obere Grenze des natürlichen Gehens erreicht ist. 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 gilt allgemein 0.5 m/s.

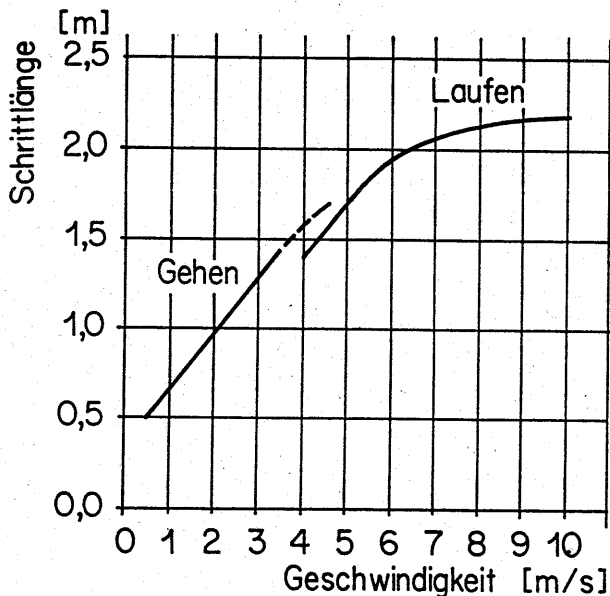


Abb. 14: Schrittlänge in Funktion der Geschwindigkeit beim Gehen und Laufen (Abbildung: IVT nach [88]).

Als Schrittlänge nennt [37] zwischen 0.80 und 0.90 m und als Schrittfrequenz eine solche von 110 bis 120 pro Minute. Dies ergäbe eine Geschwindigkeit von rund 1.63 m/s, was eher zu hoch gegriffen ist. Gut zutreffen dürfte die Frequenz von etwas über 2 Hz, wie man sie auch beim Hüpfen auf einem Bein (2.06 Hz) oder beim Tanzen (2.10 Hz) festgestellt hat [14]. Die Schrittlänge hingegen liegt eher bei 0.63 m, was eine mittlere Geschwindigkeit von etwa 1.32 m/s ergäbe [115].

2.52 Energieverbrauch

2.52.1 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 [129]:

- 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. Dies entspricht 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 fett-freies Körpergewicht ist er praktisch identisch [9], [129], [134]. Der Grundumsatz ist alters-abhängig. Er fällt bezogen auf die Körperoberfläche bis zum zwanzigsten Altersjahr stark, anschliessend leicht ab und erreicht im höheren Alter sein Minimum [117].

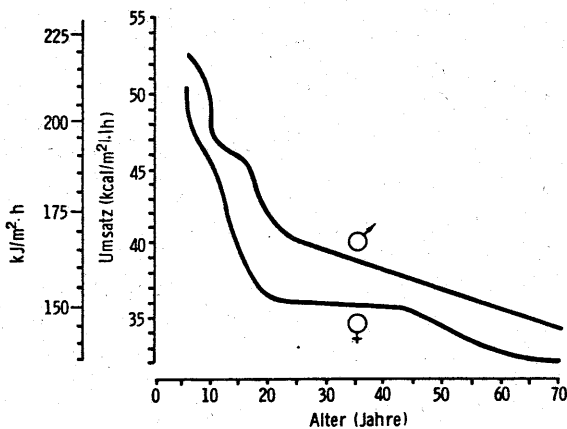


Abb. 15: Abhängigkeit des Grundumsatzes vom Alter und vom Geschlecht, bezogen auf die Körperoberfläche (Abbildung: [117] nach Boothby).

2.52.2 Gesamtumsatz und Wirkungsgrad

Zum Grundumsatz kommt der Arbeitsumsatz hinzu (Gesamtumsatz abzüglich des Grundumsatzes). Um den Energieaufwand für die Fortbewegung einordnen zu können, werden vergleichsweise die Energieverbräuche für einige andere Tätigkeiten aufgeführt:

Tab. 1: Energieverbräuche (Gesamtumsatz) bei verschiedenen Tätigkeiten. Der Energieverbrauch wird hier in [kJ/h] angegeben, obschon ein Teil der Tätigkeiten kaum während einer ganzen Stunde ausgeübt wird ([9], [117], [126], [134]).

Tätigkeit	Energieverbrauch	
	Männer	Frauen
Ruheumsatz	300 kJ/h	250 kJ/h
Ruhen im Liegen	320 kJ/h	250 kJ/h
Ruhen im Sitzen	300-320 kJ/h	
Sitzen	380 kJ/h	320 kJ/h
Stehen	630 kJ/h	440 kJ/h
Schreiben im Sitzen	500 kJ/h	
Essen im Sitzen	610 kJ/h	
Tanzen	1280 kJ/h	
Bergsteigen	2100 kJ/h	
Laufen	2370 kJ/h	
Schwimmen	2580 kJ/h	
Gehen in der Ebene	760 kJ/h	630 kJ/h
Gehen auf einer Rampe	1150 kJ/h	
langsames Gehen	870 kJ/h	
schnelles Gehen	1280 kJ/h	

Bezogen auf das Körpergewicht ist der Energieaufwand für alle Menschen ungefähr gleich.

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 ([88], [126], [129], [134]).

2.52.3 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. Die Geschwindigkeit hat daher einen beschränkten Einfluss auf den Energieaufwand zur Ueberwindung bestimmter Streckenlängen. Eine vernachlässigbare Rolle spielt der Luftwiderstand, welcher selbst bei Geschwindigkeiten von 10 m/s nur gerade 3.5 % des gesamten Bewegungswiderstandes ausmacht. Einen bedeutenden Einfluss auf den Energieverbrauch pro Länge und Körpergewicht hat hingegen die Schrittfrequenz. Je höher diese ist, desto grösser ist auch der spezifische Energieverbrauch, da der Körper sich zunehmend von seinem Eigenschwingungsbereich entfernt [88]. Dies deckt sich mit der Erfahrung von [129], wonach Personen intuitiv jene Schrittfrequenz wählen, welche dem Energieminimum entspricht.

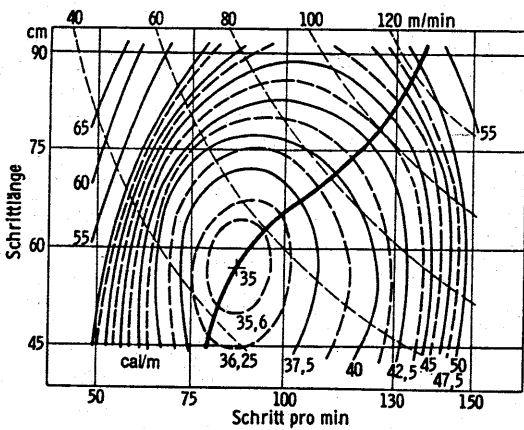


Abb. 16: Energieumsatz beim Gehen in der Ebene in Abhängigkeit von Schrittlänge und Schrittzahl (Abbildung: [117]).

Der Energieverbrauch hängt ungefähr quadratisch mit der Gehgeschwindigkeit zusammen. Beim Gehen steigt er über etwa 5 km/h steil an und bei 7 bis 9 km/h wechselt der Mensch auf die Bewegungsart des Laufens. Hier sind die beiden Fortbewegungsarten energetisch gleichwertig und der Fussgänger ist unschlüssig, welche Bewegungsart er wählen soll. Bei der Laufbewegung tritt ein starker Energiemehrverbrauch erst über 15 km/h auf.

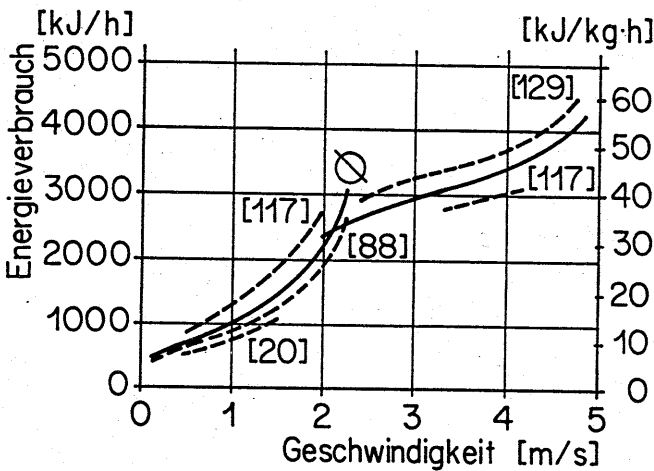


Abb. 17: Energieverbrauch beim Gehen und Laufen [14], [20], [88], [117], [129] (Abbildung: IVT).

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) und 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 bei sehr tiefen Geschwindigkeiten die Bedeutung des Grundenergieumsatzes rasch zunimmt und bei höheren Gehgeschwindigkeiten die Eigenschwingung des Beines bald verlassen wird.

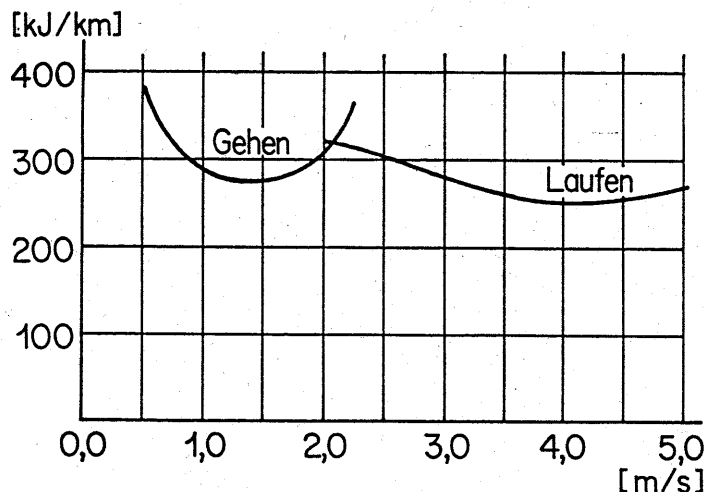


Abb. 18: Energieverbrauch für eine Strecke von 1000 m Länge in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit (Abbildung: IVT).

Bei der Belastung des Menschen mit Zusatzgewichten und bei einem schlechten Zustand der Wegoberfläche nimmt der Energieverbrauch zu. Bezogen auf eine Geschwindigkeit von 4 km/h gibt [117] dafür an:

Tab. 2: Energiemehrverbrauch durch Rückenlasten und verschiedene Zustände des Weges, bei einer Geschwindigkeit von 1.1 m/s (4 km/h) [117].

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 %
• geschälter Stoppelacker	+ 32 %
• schwerer, gepflügter und geeegter Acker	+ 75 %

2.52.4 Energieverbrauch auf Neigungen

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.

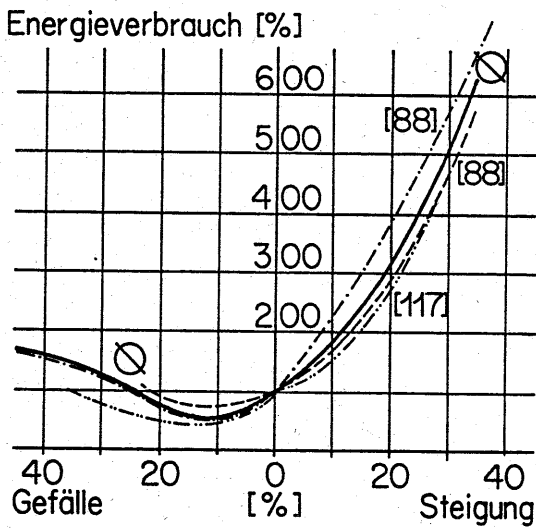


Abb. 19: Energieverbrauch beim Gehen auf geneigten Strecken, bezogen auf den Verbrauch in der Ebene (abgeleitet aus [88] und [117]; Abbildung: IVT).

Setzt man den Energieaufwand der mechanischen Arbeit gegenüber, so erhält man die Effizienz. Die mechanische Arbeit ist die Änderung der potentiellen Energie infolge eines Standortwechsels des Körpers. 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.

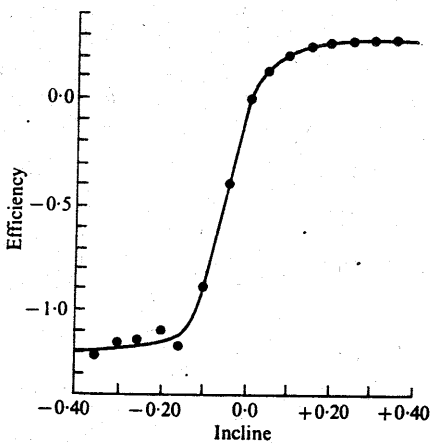


Abb. 20: Effizienz beim Gehen auf verschiedenen Neigungen (Abbildung: [88]).

2.52.5 Energieverbrauch beim Treppensteigen

Zum Energieverbrauch auf Treppen finden sich widersprüchliche Angaben, wobei es mangels Geschwindigkeitsangaben schwer fällt, die Ursache für diese Differenzen zu ermitteln. [122] spricht beispielsweise von einem um lediglich 30 % erhöhten Energieverbrauch, während [20] bei gleicher Horizontalgeschwindigkeit einen Mehrverbrauch beim Aufwärtsgehen von rund 690 % sowie einen Minderverbrauch von etwa 25 % beim Abwärtsgehen ausweist. [117] nennt einen Mehrverbrauch von 400 %, [67] gar einen

solchen von 900 bis 1400 % beim Aufwärtsgehen und von 35 % beim Abwärtsgehen. Die Arbeit von Döll und Lehmann (zitiert in [115] und [117]) 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.

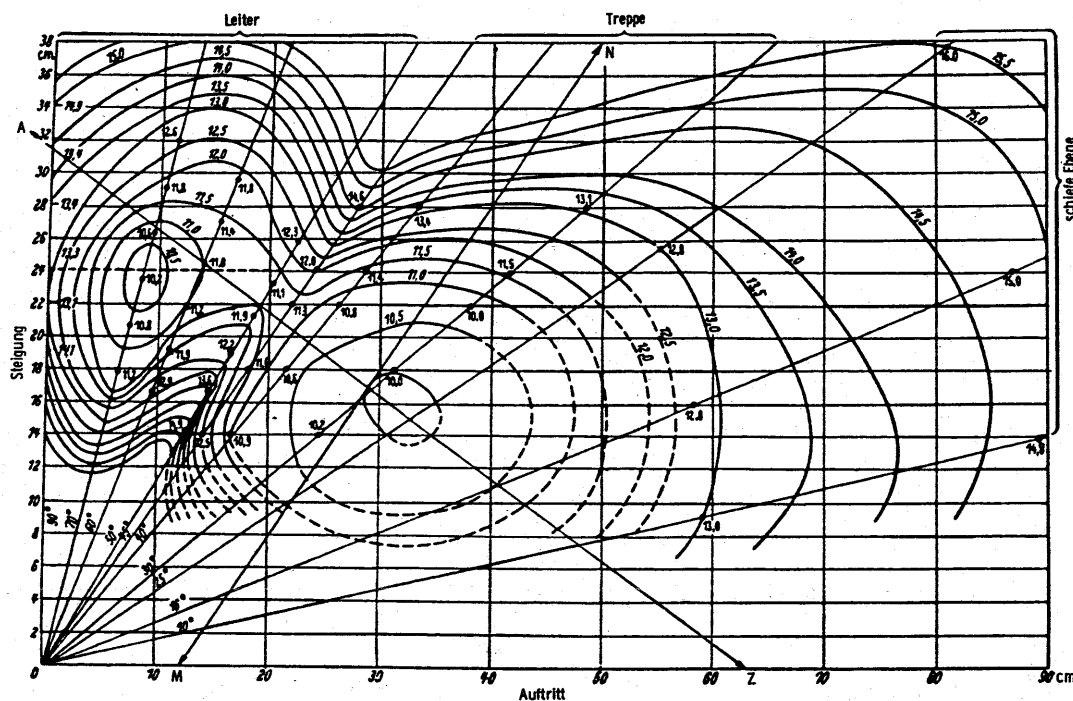
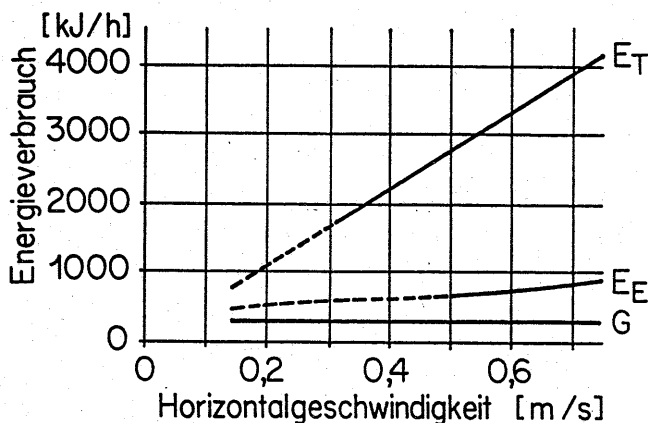


Abb. 21: Energieumsatz für eine Hubarbeit von 1 mkg für Rampe, Treppe und Leiter [cal/mkg]. Die Punkte gleichen Energieumsatzes sind mit einer Linie verbunden (Abbildung: [117]).

Diese Darstellung zeigt namentlich, dass der Energieaufwand nicht nur eine Funktion der Geschwindigkeit, sondern auch der ergonomischen Gestaltung der Treppe ist. An geringsten ist er bei einer Stufenhöhe von 16 cm und einer Stufentiefe von 31 cm, was eine horizontale Schrittlänge von 62 cm und eine schräge Schrittlänge von 70 cm ergibt. Für diesen Fall errechnet sich bei einer Horizontalgeschwindigkeit von 1.0 km/h ein Energiemehrverbrauch von 154 %, bei 2.0 km/h einen solchen von 336 % und bei 2.5 km/h einen solchen von 353 %.



E_E Gesamtenergieverbrauch Ebene
 E_T Gesamtenergieverbrauch Treppe
 G Grundumsatz

Abb. 22: Energieverbrauch auf energieoptimaler Treppe und Vergleich mit Energieverbrauch in der Ebene (Abbildung: IVT).

Leider gibt [117] keine Auskunft über den Energieverbrauch beim Abwärtsgehen. Analog zum Energieverbrauch auf Rampen ist für die üblichen Treppensteigungen von etwa 25 Grad mit einem ähnlichen Energieverbrauch wie in der Ebene zu rechnen.

2.53 Leistungsfähigkeit

2.53.1 Einfluss des Geschlechts

Die 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. So ist ihr Sauerstoff-Aufnahmevermögen etwa 30 % tiefer als dasjenige von Männern. Bezogen auf das Körpergewicht sind es immer noch 21 % [117], [129]. Die Muskelkraft liegt bei 50 bis 80 % (im Mittel etwa 67 %), die körperliche Leistungsfähigkeit gemessen in [mkg/min] bei 58 % und die Laufgeschwindigkeit von Schnellläufern bei 75 % [9], [37], [117]. Im Spitzensport schliessen Frauen bis auf etwa 90 % der Leistung von Männern auf [94].

2.53.2 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 etwa 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 Bein- und Rumpfmuskulatur und damit die Bewegungsgeschwindigkeit [9].

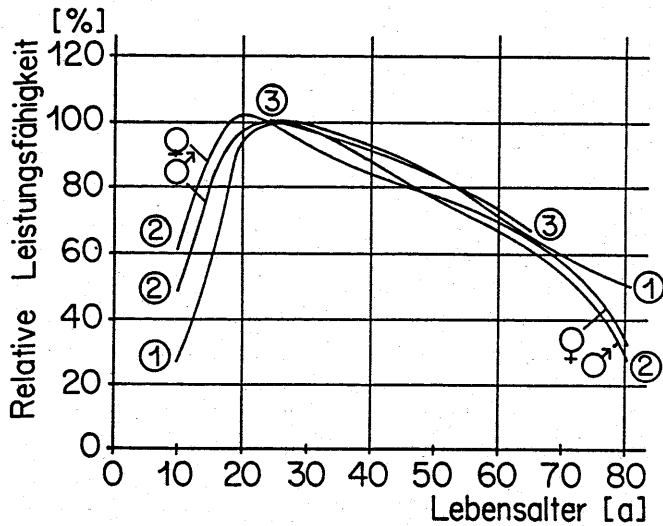


Abb. 23: Körperliche Leistungsfähigkeit in Funktion des Alters.

1 = Vitalkapazität der Lunge [129], 2 = Sauerstoff-Aufnahmevermögen [129], 3 = Maximales Herzschlagvolumen [9]. Die Vitalkapazität der Lunge spielt insofern eine Rolle, als dass bei einer Leistungssteigerung die Atemfrequenz konstant bleibt, während sich das Atemvolumen vergrößert (Abbildung: IVT).

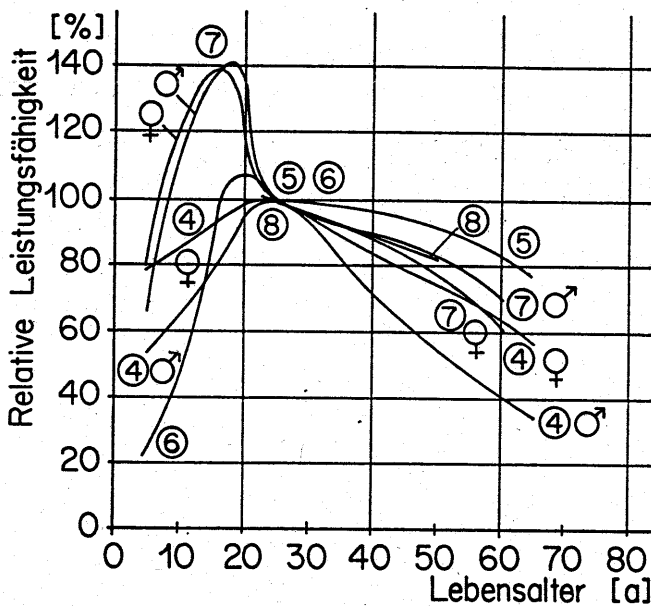


Abb. 24: Körperliche Leistungsfähigkeit in Funktion des Alters.

4 = Trainierbarkeit [129], 5 = Muskelkraft [9], 6 = Körperliche Leistungsfähigkeit [117], 7 = Laufgeschwindigkeit [37], 8 = Montageleistung von Arbeitern [117] (Abbildung: IVT).

2.53.3 Einfluss der Tageszeit

Die Leistungsbereitschaft des Menschen unterliegt im Tagesverlauf einer typischen Periodizität. Man unterscheidet 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 [53], [117], [126], [129].

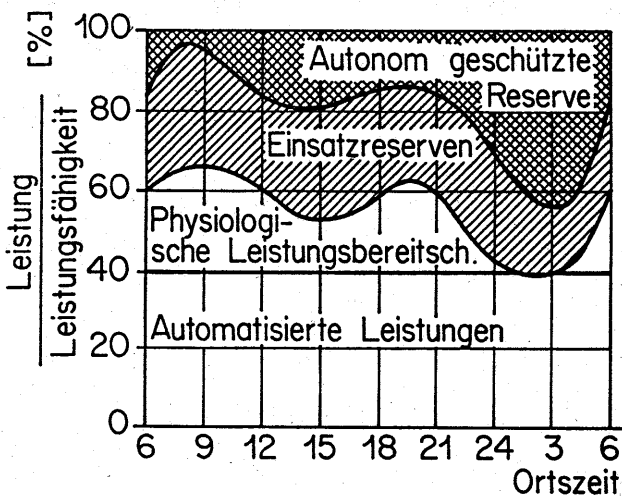


Abb. 25: Tagesperiodik der Leistungsbereitschaft (Abbildung: IVT nach Graf, Handbuch der gesamten Arbeitsmedizin).

Diese theoretische Periodizität der Leistungsfähigkeit wird durch experimentelle Befunde gestützt. In Abbildung 26 sind das Einschlafen von Autofahrern und Fehler von schwedischen Gasarbeitern dargestellt:

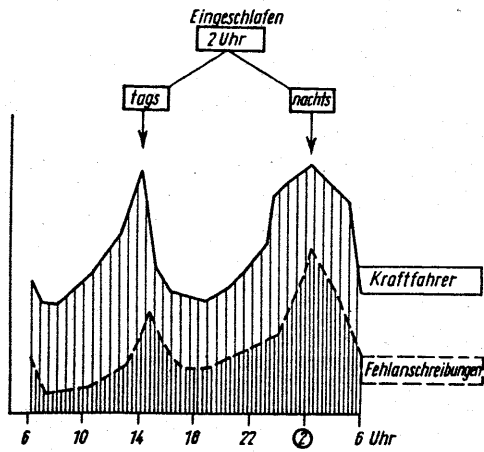


Abb. 26: Uebereinstimmung der Zeitpunkte gehäuftem Einschlafen bei Autofahrern (nach Prokop) mit gehäuftem Fehlanschiebungen von Gasarbeitern (Bjerner). Die Spitzen der Fehlleistungen fallen zusammen mit den Minima der physiologischen Leistungsbereitschaft (Abbildung: [53]).

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

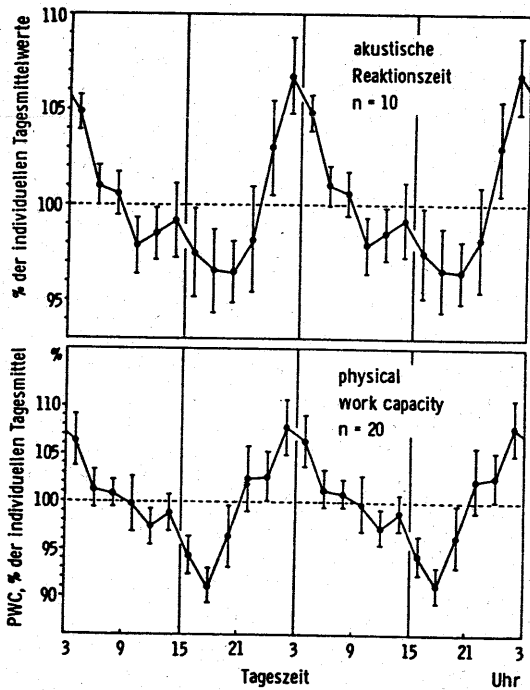


Abb. 27: Mittlerer tagesrhythmischer Verlauf der akustischen Reaktionszeiten (oben) und der ergonomisch bestimmten Arbeitskapazität für 170 Pulse/Minute (unten). Zur Nacht hin nehmen psychische Leistungsbereitschaft und Herzfrequenzreagibilität ab (Abbildung: [117] nach Voigt und Mitarbeitern).

Noch augenscheinlicher wird die Uebereinstimmung, wenn die Ergebnisse der Untersuchungen an den schwedischen Gasarbeitern als Leistungsdisposition dargestellt wird:

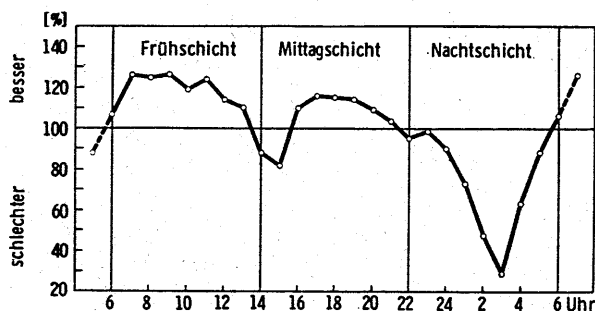


Abb. 28: Tagesganglinie der Leistungsdisposition von Gasarbeitern, erhoben in den Jahren 1912 bis 1931 durch Bjerner et al. (Abbildung: [117]).

Der eintägige Rhythmus wird von der Ortszeit bestimmt mit Synchronisierung über den Sonnenstand. Er erfasst das gesamte vegetative Nervensystem und findet sich auch in der Pulsfrequenz oder der Körpertemperatur. Die Anpassung an eine andere Ortszeit erfolgt mit etwa zwei Stunden pro Tag nur langsam.

2.53.4 Einfluss des Umgebungsklimas

Der menschliche Organismus muss seine Körpertemperatur in einem engen Regelbereich halten. Die mit der Umgebung ausgetauschte Wärme muss daher mittelfristig im Gleichgewicht sein [9]:

$$(2) \quad D_{WS} = W_M \pm W_C \pm W_R - W_E$$

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 Strahlung
	W_E	Wärmetausch durch Schweissverdunstung

Das Klima beeinflusst das körperliche Leistungsfähigkeit über die folgenden Grössen [126], [129], [134]:

- Umgebungstemperatur: 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 [134]:

$$(3) \quad w_C = a \cdot (T_H - T_L)$$

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

Die Kerntemperatur des Körpers kann trotz wechselnder Umgebungstemperatur zwischen der unteren und der oberen Grenze des Regelbereiches gehalten werden, indem die Wärmebildung durch Reduktion der Körperaktivitäten sukzessive bis auf den Grundumsatz abgesenkt wird (Normothermie). Wird der Regelbereich von der Umgebungstemperatur überschritten, so lässt sich die äusserliche Wärmebelastung nicht mehr ausgleichen, die Kerntemperatur des Menschen steigt an (Hyperthermie) und der Hitzetod droht. Umgekehrt können sinkende Temperaturen bis zur unteren Grenze des Regelbereiches durch erhöhte Körperaktivitäten wettgemacht werden (Zittern, Schlottern). Darunter (Hypothermie) erleidet der Mensch den Kältetod. Der Zusammenhang mit der Wärmeproduktion des Körpers lässt sich folgendermassen darstellen [134]:

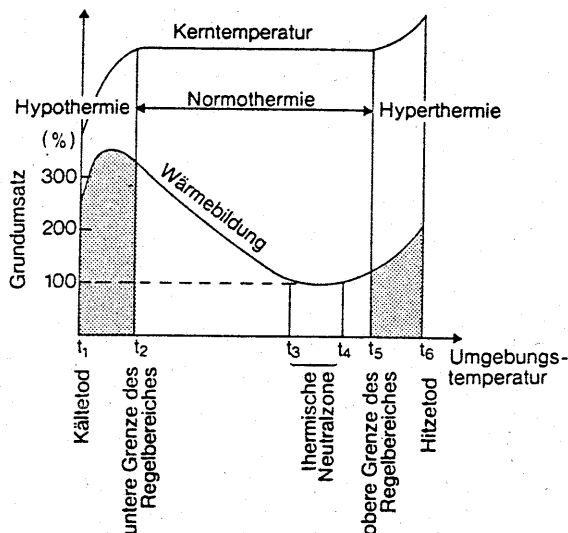


Abb. 29: Körpertemperatur und Wärmebildung des Menschen in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur. Die thermische Neutralzone für den unbedeckten, ruhenden Menschen liegt zwischen 28 und 31 Grad C; für Windstille und 50% Luftfeuchtigkeit (Abbildung: [134] nach Hensel, Brück, Raths).

Durch die Windgeschwindigkeit wird die Ausdehnung der ruhenden Grenzschicht über der Haut und damit das Wärmeübertragungsvermögen beeinflusst:

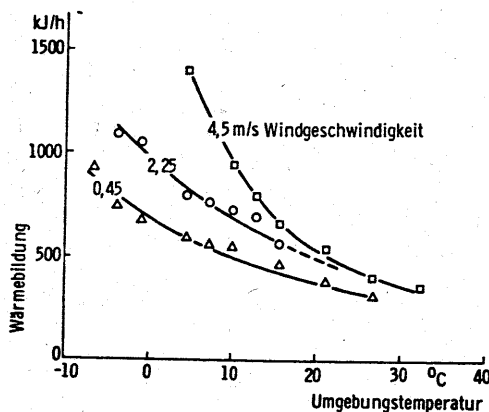


Abb. 30: Energieumsatz nach einstündigem Sitzen in unterschiedlicher Umgebungstemperatur (Abbildung: [117] nach Wenzel und Pierarski).

- **Wärmestrahlung:** Zwischen dem Menschen und festen Körpern findet ein Energieausgleich über langwellige Strahlung statt. Der Wärmeübergang ist nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz proportional zur vierten Potenz der Temperatur der Oberflächen [134]:

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

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

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

- **Luftfeuchtigkeit:** 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 [134]:

$$(5) \quad w_E = b \cdot (P_H - P_L)$$

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

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.

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 [134]. Andere Quellen nennen einen Energieaustausch von 60 % durch Strahlung, 15 % durch Leitung oder Konvektion sowie 20 % durch Wasserverdunstung [126]. Gemeinsam ist beiden der hohe Anteil der langwelligen Strahlung.

Die Wärmetauschköglichkeiten weisen ihre spezifischen Arbeitsbereiche auf. Ein Beispiel hierzu ist die Schweißbildung, welche bei steigender Temperatur eine verkleinerte Wärmeabgabe durch Strahlung und Konvektion kompensiert [9], [117]:

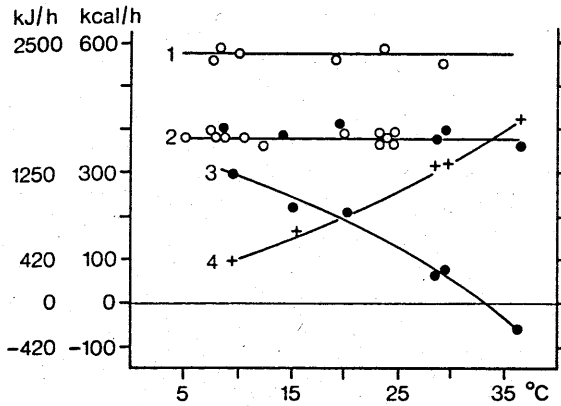


Abb. 31: Wärmeaustausch einer nackten Versuchsperson während der Arbeit (Leistung 150 Watt) in unterschiedlichen Raumtemperaturen. 1: Gesamter Energieumsatz. 2: Wärmeproduktion. 3: Wärmeabgabe durch Konvektion und Strahlung. 4: Wärmeabgabe durch Verdunstung. Die Verdunstung muss bei 36 Grad C zusätzlich die Wärmeaufnahme durch Konvektion und Strahlung kompensieren! (Abbildung: [9]).

Auf eine bestimmte Temperatur reagieren nicht alle Menschen gleich. Die folgende Darstellung besagt beispielsweise, dass eine Temperatur von 25 Grad von gleich vielen Versuchspersonen (je etwa 20 %) als zu warm beziehungsweise zu kalt empfunden wurde und dass gleichzeitig höchstens etwa 60 % der Versuchspersonen eine bestimmte Temperatur als behaglich beurteilen!

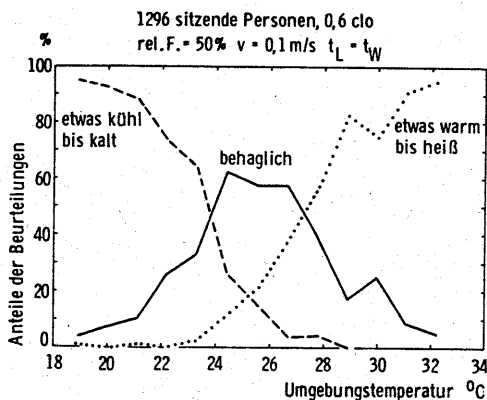


Abb. 32: Individuelle Unterschiede in der Beurteilung verschiedener Umgebungstemperaturen (Abbildung: [117] nach Fanger: Arbeitsmedizin).

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 [129]:

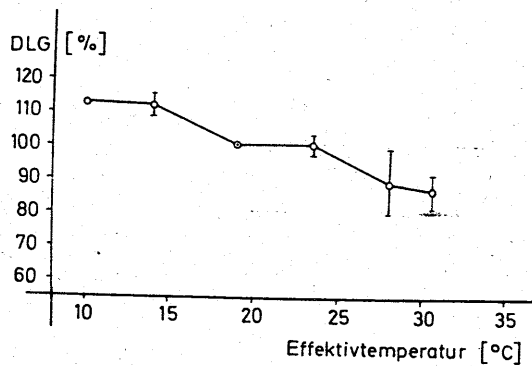


Abb. 33: Abnahme der Dauerleistungsgrenze mehrerer Versuchspersonen in Abhängigkeit von der Effektivtemperatur (Abbildung: [129]).

Einem übermässigen Energieverlust bei tiefen Temperaturen wirkt der Mensch durch eine entsprechende Bekleidung entgegen. Deren Isolationswirkung wird mittels der Einheit [clo] = 0.043 K·m²·h/kJ beschrieben (von engl. "clothing"), welche dem Isolationswert einer üblichen Strassenbekleidung entspricht [117].

<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. 34: Beispiele für den thermischen Widerstand gebräuchlicher Bekleidungen (Abbildung: [117] nach Fanger und Frank).

3. Geschwindigkeitsverhalten der Fussgänger

3.1 Mittelwert

In der untersuchten Literatur fanden sich 51 Angaben zur Durchschnittsgeschwindigkeit des Menschen, welche stark streuen. Der Durchschnitt liegt bei 1.34 m/s (4.83 km/h) mit einer Spannweite von 0.97 bis 1.65 m/s und stimmt mit Abschnitt 2.52.3 (Energierisiko) überein. Die Extremwerte in der Literatur 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. Bei einer Schrittlänge von 0.63 m [115] ergibt sich eine Schrittfrequenz von 2.13 Hz. Gemäss [88] müsste die Schrittlänge bei dieser Geschwindigkeit etwa 0.70 m und die Schrittfrequenz 1.91 Hz betragen. Als Mittelwert kann somit mit 2.0 bis 2.1 Hz gerechnet werden. 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 streuten die Extremwerte stark zwischen 0.90 m/s und 1.69 m/s.

3.2 Abhängigkeit von verschiedenen Einflüssen

3.21 Überblick

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

- Eigenschaften des Fussgängers:
 - Geschlecht
 - Alter
 - Grösse
 - Gesundheitszustand und Erholungsgrad
 - Charakterliche Eigenarten/Temperament/Stimmungslage
 - Belastung durch Gepäck
- Begleitumstände der Bewegung
 - Verkehrszweck
 - Tageszeit
 - Witterung/Klima
 - Länge des Weges
- Charakteristiken der Anlagen
 - Steigung von Rampen
 - Steigung und Schrittmasse von Treppen
 - Zustand der Oberfläche
 - Attraktivität der Umgebung
 - Strassenbelastung bei Fahrbahnüberquerungen

Hinzu kommt eine starke Abhängigkeit von der Fussgängerverkehrsdichte. Ein Teil dieser Einflüsse ist leicht beobachtbar und entsprechend gut dokumentiert (Geschlecht, Al-

ter, 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 [53] stellt eine vollständige Kurve des Geschwindigkeitsverlaufes dar, während sich bei den übrigen Autoren nur Einzelangaben finden.

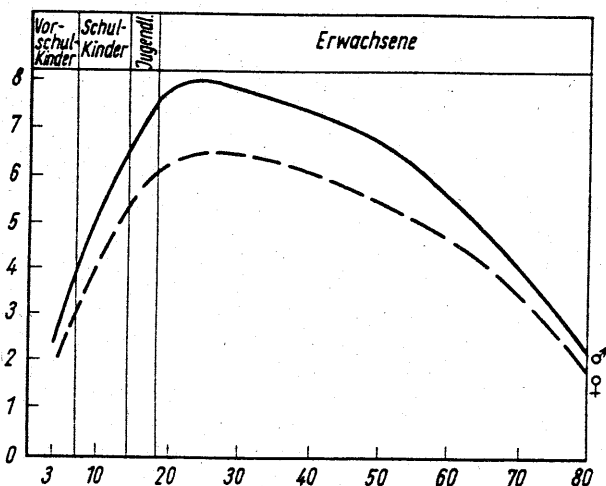


Abb. 35: Mittlere Gehgeschwindigkeit im Strassenverkehr bei gesunden Menschen in Abhängigkeit vom Lebensalter. Das absolute Geschwindigkeitsniveau ist deutlich zu hoch (Abbildung: [53]).

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 [128]) verwendet, da praktisch sämtliche Fussgängeruntersuchungen in Städten durchgeführt wurden und somit die stadttypische Altersverteilung zu berücksichtigen ist.

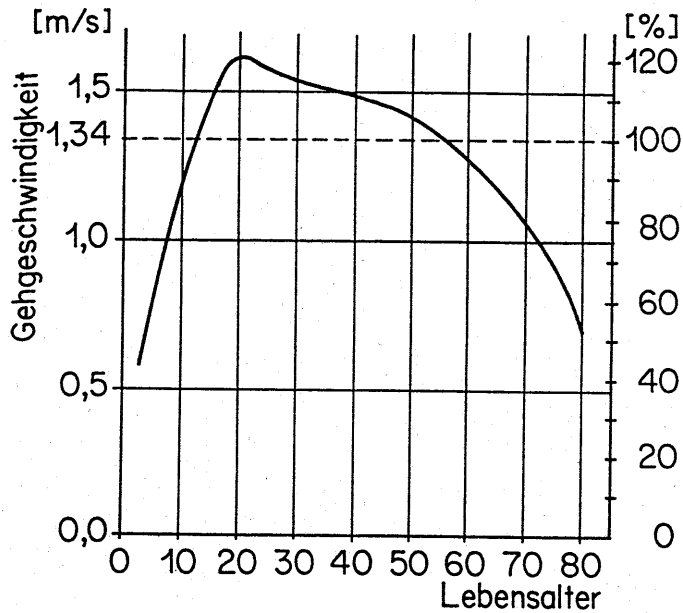


Abb. 36: Verlauf der Fussgängergeschwindigkeiten in Funktion des Lebensalters (Abbildung: IVT).

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 Fussgänger zumindest zeitweise ein überdurchschnittliches Alter aufweisen, 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 sich die Geschwindigkeit eines Fussgängers ungefähr proportional zur Körpergrösse verhalten 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 teilt man die Ortsveränderungen in die vier Kategorien Pendlerverkehr, Einkaufsverkehr, Nutzverkehr und Freizeitverkehr ein. 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 Fuss-

gängergeschwindigkeit. Zweitens aber unterscheidet sich die Zusammensetzung der Fussgängerkollektive 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 [99] und [121] 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 Uebereinstimmung 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 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 [64]. Die einzelnen Stundenmittelwerte sind in guter Uebereinstimmung mit der physiologischen Leistungsfähigkeit. Als wenig hilfreich erscheint dagegen die Ausgleichskurve:

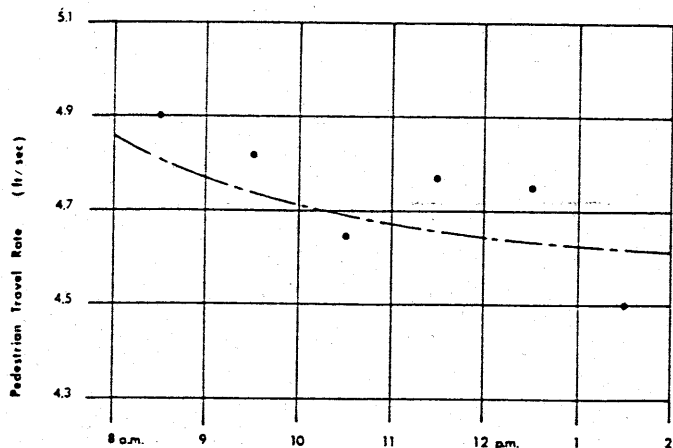


Abb. 37: Fussgängergeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Tageszeit (Abbildung: [64]).

Nach [146] ist der Spitzenverkehr morgens und mittags etwa gleich schnell, während [99] festgestellt haben will, dass der Spitzenverkehr abends um etwa 0.2 m/s schneller ist als morgens. [73] schliesslich hat bei mehreren Messungen eine Geschwindigkeitsabnahme um rund 6 % vom Mittag zum Abend ermittelt. Er widerspricht damit [99]. Die Erklärung dafür ist, dass sich die Angabe von [99] 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 [11], [43], [99]):

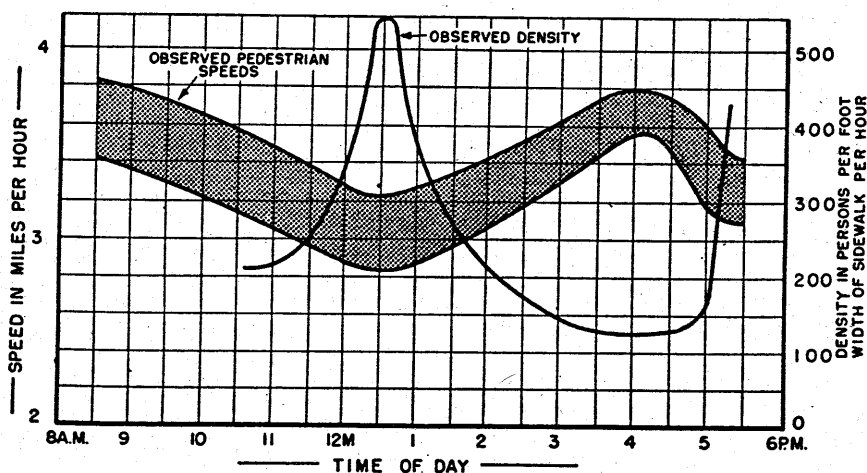


Abb. 38: Fussgängergeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Tageszeit und der Verkehrsdichte (Abbildung: [11]).

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 [64] wahrscheinlicher, woraus sich folgende Hypothese ergibt:

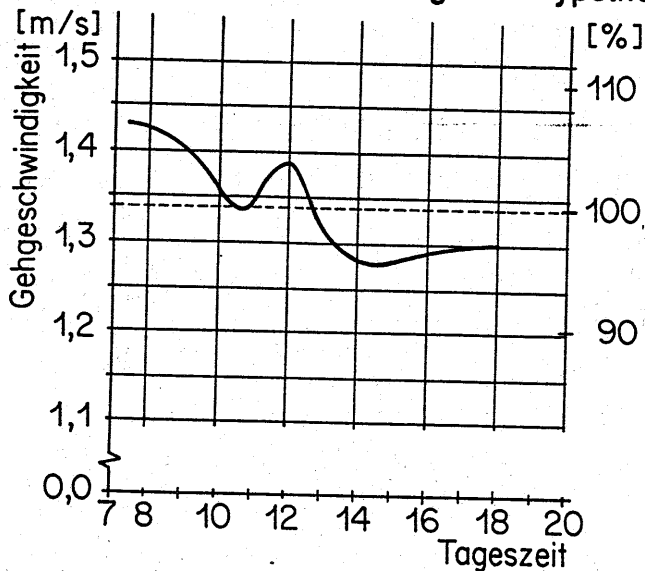


Abb. 39: Hypothese zum Geschwindigkeitsverlauf im Tagesgang, basierend auf [64] und [73] (Abbildung: IVT).

3.23.3 Witterung/Klima

Wie bereits in Kapitel 2.53.4 dargestellt, wird die körperliche Leistungsfähigkeit von Umgebungstemperatur, Luftfeuchtigkeit und Wärmestrahlung beeinflusst [53]. 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 ([64], [92]). Beide kommen zum Befund eines Geschwindigkeitsabfalles mit steigender Temperatur. Ein Unterschied besteht lediglich im Kurvenverlauf. Während [64] über 15 Grad keinen Geschwindigkeitsabfall mehr feststellt, nimmt dieser bei [92] gerade hier stark zu.

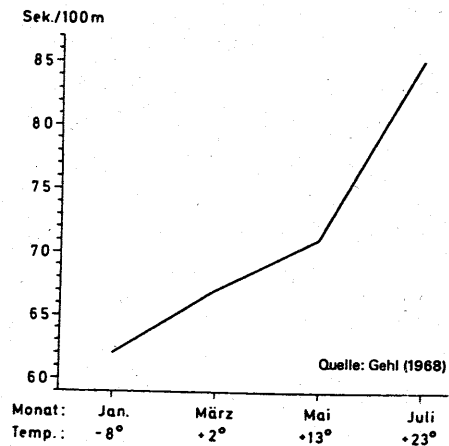
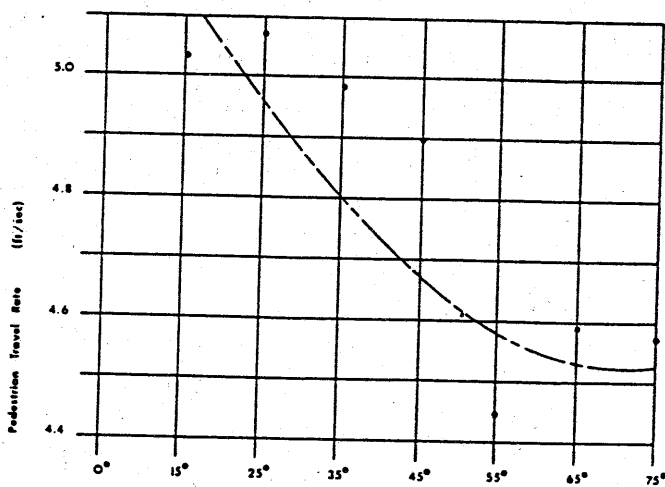


Abb. 40: Geschwindigkeit in Funktion der Umgebungstemperatur. (Abbildungen: Links: [64]; rechts [92]).

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 [64] und [92], so kann man sie auf etwa 15 Grad schätzen.

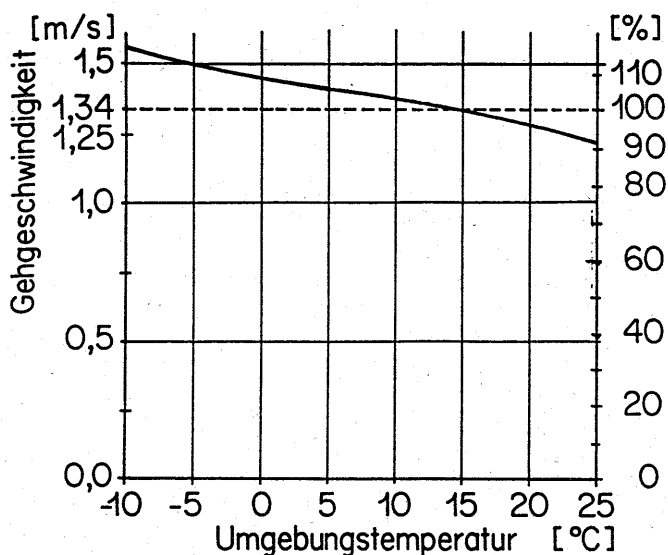


Abb. 41: Fussgängergeschwindigkeit in Funktion der Umgebungstemperatur zwischen -10 und +25 Grad (Abbildung: IVT).

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 [95] diese Frage untersucht. Demnach lässt sich hier eine Geschwindigkeitsabnahme mit zunehmender Länge der Treppe nachweisen.

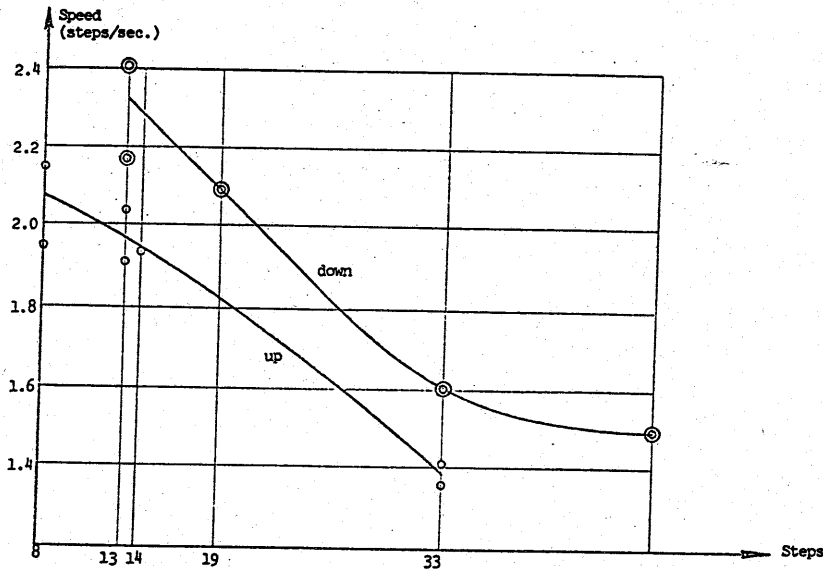


Abb. 42: Abnahme der Fussgängergeschwindigkeit auf Treppen in Funktion der Stufenzahl (Abbildung: [95]).

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. Vier Autoren geben an, dass im Neigungsbereich bis etwa 5 - 8 % kein Einfluss auf die Geschwindigkeit festzustellen ist ([21], [67], [110], [139]). Andere Quellen weisen im Gegensatz dazu eine deutliche Geschwindigkeitsabnahme bereits bei Steigungen von 5 % und eine leichte Geschwindigkeitserhöhung bei Gefällen ab 5 % experimentell nach ([11], [13], [75]). Gestützt wird letztere Angabe durch die Feststellung in Abschnitt 2.52.4, wonach die Neigung einen starken Einfluss auf den Energieverbrauch hat. Aus den 15 auswertbaren Angaben zum Geschwindigkeitsverhalten sowie dem Mittelwert gemäss 3.1 liess sich folgende Neigungs-/Geschwindigkeitskurve ermitteln:

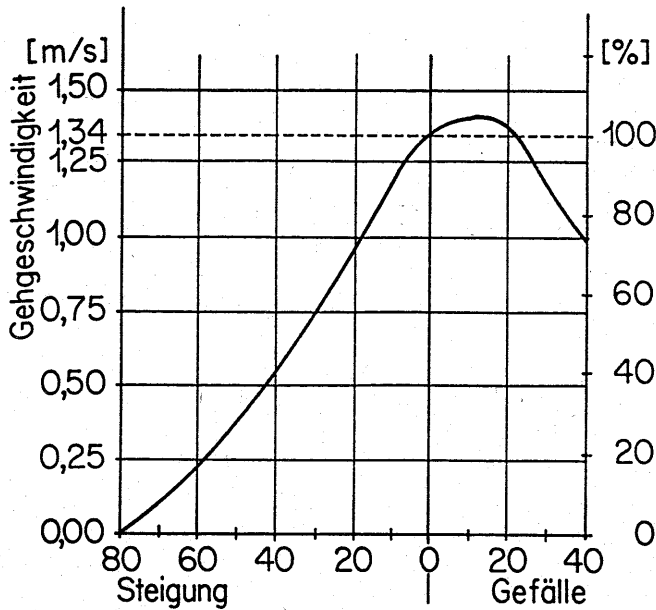


Abb. 43: Geschwindigkeit der Fussgänger in Funktion der Gehwegneigung. Die Neigungsbereiche über $\pm 20\%$ haben hypothetischen Charakter, da dies der Anwendungsbereich von Treppen ist (Abbildung: IVT).

Tab. 3: 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 $v_h = 0.652$ m/s, die mittlere Vertikalgeschwindigkeit $v_v = 0.326$ 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	$v_h = 0.610 \text{ m/s}$	$v_v = 0.305 \text{ m/s}$	1.97 Schritte/s
Abwärtsgehen	$v_h = 0.694 \text{ m/s}$	$v_v = 0.347 \text{ m/s}$	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 nähert sich beim Uebergang von der Rampe zur Treppe weitgehend an jene der Rampen an.

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/m^2 auftritt. Ein Teil der Autoren nähert diesen Kurvenabschnitt mit einer Gerade an ([44], [100], [102], [138]). Deren Steigung ist jeweils so gross, dass bereits bei einer Belegung von 3 bis 4 P/m^2 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 ([11], [29], [75], [95], [111], [125], [51]). 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/m^2 (insbesondere [59], [96], aber auch [106] und [124]).

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/m^2 ist demnach ein spürbarer Rückgang der Geschwindigkeit um nahezu 10 % zu erwarten. Bei 1.5 P/m^2 sinkt die Fussgängergeschwindigkeit auf gegen die Hälfte.

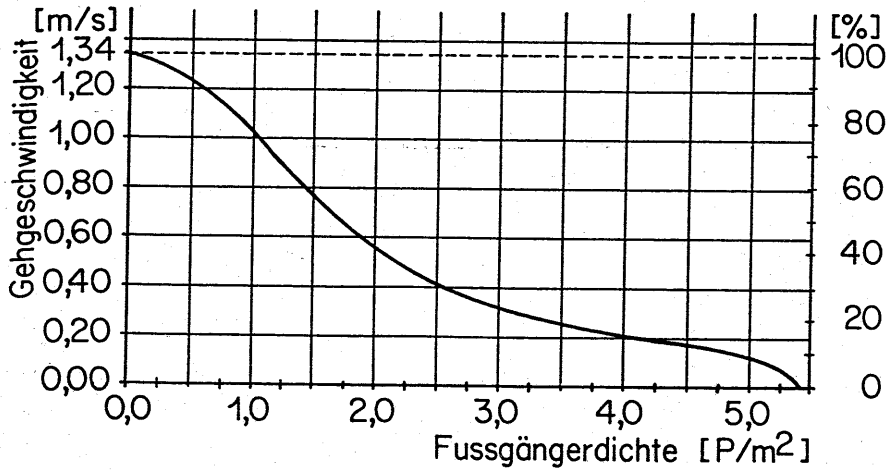


Abb. 44: Abhängigkeit der Fussgängergeschwindigkeit von der Fussgängerdichte in der Ebene (Abbildung: IVT).

3.25.2 Gehen auf Treppen

Die Datenbasis der analogen Darstellung für Treppen ist mit lediglich sieben Angaben ([44], [46], [53], [59], [95], [97], [125]) schwach und zudem widersprüchlich. Es fällt auf, dass die Geschwindigkeit im tiefen Dichtebereich (bis etwa 1.0 P/m²) 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/m² angegeben und stimmt mit dem Grenzwert der Ebene überein.

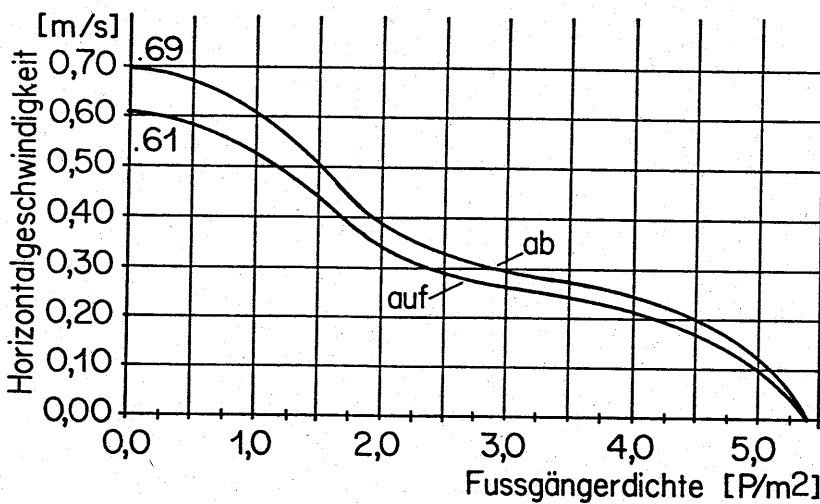


Abb. 45: Abhängigkeit der Fussgängergeschwindigkeit von der Fussgängerdichte auf Treppen (Abbildung: IVT).

3.3 Streuung der Fussgängergeschwindigkeiten

Die Geschwindigkeiten der einzelnen Fussgänger zeigen eine Normalverteilung um den Mittelwert. Die insgesamt 17 Streuungswerte aus zwölf Quellen ([11], [13], [20], [64], [65], [67], [106], [110], [122], [132], [138], [146]) 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_m	- 3 σ
•	2.28 %	< 0.82 m/s	< 0.61 v_m	- 2 σ
•	15.87 %	< 1.08 m/s	< 0.81 v_m	- 1 σ
•	50.00 %	< 1.34 m/s	< 1.00 v_m	Mittel
•	84.13 %	< 1.60 m/s	< 1.19 v_m	+ 1 σ
•	97.72 %	< 1.86 m/s	< 1.39 v_m	+ 2 σ
•	99.87 %	< 2.12 m/s	< 1.58 v_m	+ 3 σ

Die 3σ -Bereiche stimmen gut mit den in Abschnitt 2.51 genannten unteren und oberen Grenzen der natürlichen Bewegung überein.

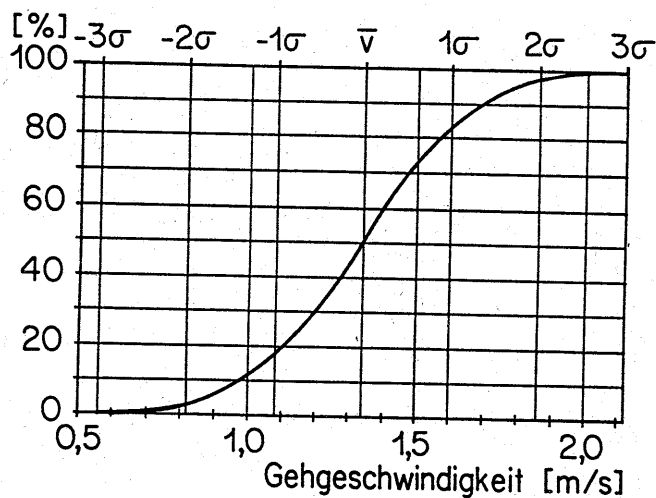


Abb. 46: Summenkurve der Fussgängergeschwindigkeiten. Ablesebeispiel: 30 % der Fussgänger sind langsamer als 1.2 m/s (Abbildung: IVT).

Einzelne Hinweise lassen erkennen, dass die Verteilung auch asymmetrisch mit einer positiven Schiefe (Konzentration im tieferen Geschwindigkeitsbereich) und vereinzelt sehr hohen Werten sein kann ([20], [99], [146]). Die zugehörigen Beobachtungen stammen aus der Umgebung öffentlicher Verkehrsmittel oder aus dem Berufsverkehr, was die Spitzenwerte hinreichend begründen dürfte.

4. Dimensionierung von Fussgängeranlagen

4.1 Grundlagen der Dimensionierung

4.1.1 Grundbeziehung

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

$$(6) \quad F = D \cdot v_F \cdot B_N \cdot t$$

wobei	F	Anzahl Fussgänger [P]
	D	Fussgängerdichte [P/m ²]
	v_F	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 eines Verlustes B_H infolge von Hindernissen oder Wandeinflüssen:

$$(7) \quad B_N = B_B - B_H$$

wobei	B_B	Bruttobreite der 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:

$$(8) \quad L = F/t = D \cdot v_F \cdot B_N$$

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:

$$(9) \quad L_s = D \cdot v_F$$

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

4.1.2 Genereller Verlauf der Leistungsfähigkeit

Im Unterschied zur Hydraulik ist v_F eine Funktion von D . Das Maximum der Leistungsfähigkeit wird nicht bei höchster Geschwindigkeit erreicht. Höchste Fussgängergeschwindigkeit und höchste Leistungsfähigkeit schliessen sich aus. Die Abhängigkeiten der

Grössen Geschwindigkeit, Verkehrsdichte und Verkehrsmenge ähneln jenen des motorisierten Individualverkehrs und ergeben für die drei Grundfunktionen Geschwindigkeit/Dichte, Dichte/Verkehrsmenge und Geschwindigkeit/Verkehrsmenge analoge Kurvenverläufe.

Loi d'écoulement des flots
d'automobiles de piétons

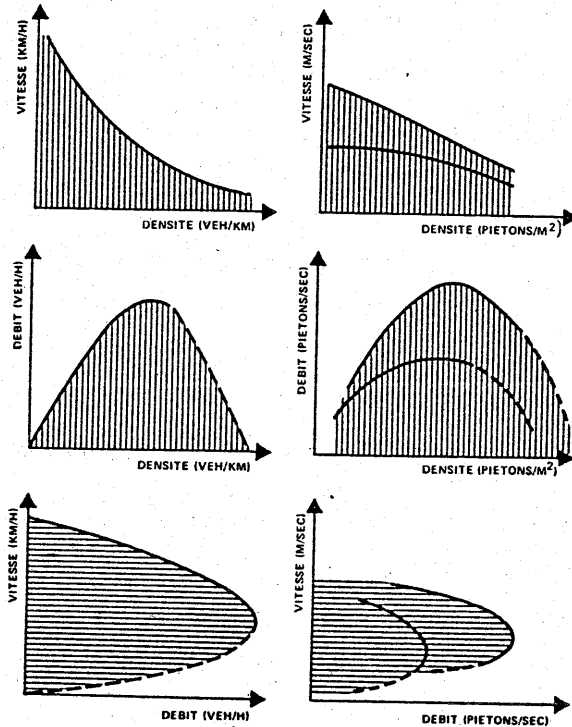


Abb. 47: Verkehrsstromgesetzmässigkeiten, links beim motorisierten Individualverkehr, rechts beim Fussgängerverkehr (Abbildung: [20]).

4.2 Fussgängerdichte und nutzbare Breite des Verkehrsraumes

4.21 Platzbedarf

4.21.1 Statischer Platzbedarf

Der geometrisch minimale Platzbedarf eines Fussgängers in Ruhe lässt eine Fussgängerdichte von 6.6 P/m^2 zu. 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/m^2 lässt sich ein Körperkontakt nicht mehr vermeiden ([50], [67], [110]). In Wartesituationen mit beliebigem Platzangebot stellt sich daher eine Fussgängerdichte von etwa 2.0 bis 2.9 P/m^2 ein. Bei Lichtsignalanlagen wurden beispielsweise 2.04 P/m^2 gefunden, in Warteschlangen 2.25 P/m^2 , auf Busstationen 2.7 P/m^2 oder beim Warten auf den Lift 2.9 P/m^2 . [75] und [99] haben zusätzlich gezeigt, dass die Fussgängerdichte bei Lichtsignalanlagen mit zunehmendem Abstand von der Bordsteinkante auf unter 2 P/m^2 fällt.

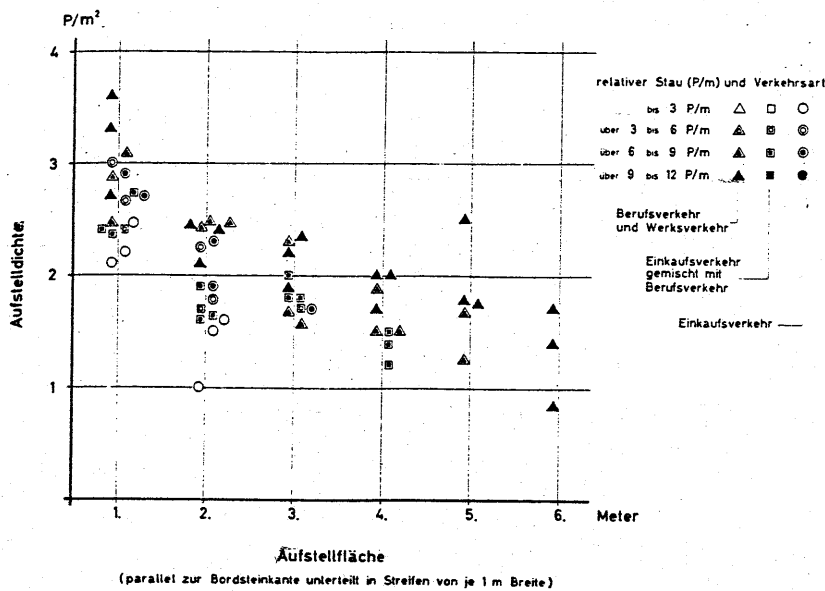


Abb. 48: Fussgängerdichte vor Lichtsignalanlage in Funktion der Distanz von der Bordsteinkante (Abbildung: [99]).

4.21.2 Dynamischer Platzbedarf

Der dynamische Platzbedarf für die Fortbewegung ist grösser als der statische. In Richtung der Bewegung muss der Fussgänger seine Beine im gewünschten Mass auslenken und bei einem plötzlichen Stopp der vor ihm gehenden Person anhalten können (Sicherheitsabstand). In seitlicher Richtung müssen die Schwankungsbewegungen des Körpers bei Bewegung auf idealer Bahn sowie die Abweichungen von dieser idealen Bahn berücksichtigt werden. Der Bewegungsraum in Querrichtung wird als Fussgängerspur bezeichnet. Die Auswertung von insgesamt 29 Angaben ergibt einen Mittelwert von 0.71 m. Der niedrigste, selten genannte Wert liegt bei 0.56 m, der höchste bei 1.00 m. Niedrigere Werte werden allgemein für Treppen und Rampen angeführt. Hier wird mit einer Spurbreite von etwa 0.60 m gerechnet.

Diese Literaturwerte sind mit den Schwankungen der Bewegung und mit der Breitenverteilung der Fussgänger unter Berücksichtigung des Mitführens von Gepäckstücken zu beurteilen. Der Körperschwerpunkt schwankt seitlich selbst beim Gehen auf idealer Bahn infolge der Art der Gehbewegung innerhalb einer Bandbreite von rund 5 cm [94]. [122] hat gefunden, dass die Gesamtschwankung der Fussgänger (inklusive Abweichung von der idealen Bahn) für 85 % der Fussgänger in einer Bandbreite von 28.2 cm liegt, es treten aber Werte bis über 60 cm auf. Die Bandbreite nimmt zudem nach [99] mit der Geschwindigkeit zu.

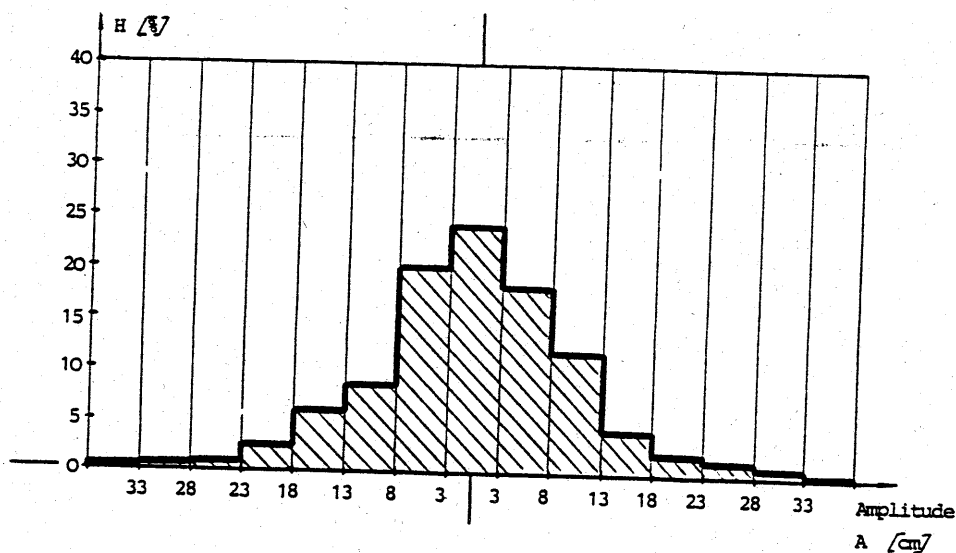


Abb. 49: Fussgängerschwanungen um eine Ideallinie, Gesamtschnitt (Abbildung: [122]).

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 [122] 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	KINDERWAGEN	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
	KINDERWAGEN	Angaben in [%]					0,0	0,0	0,0
	STOCK						0,0	0,1	
	HUND							0,0	

Abb. 50: Prozentuale Verteilung des Gepäcktransportes durch Fussgänger. Kleines Gepäckstück = Handtasche; mittleres Gepäckstück = Einkaufstasche; grosses Gepäckstück = Reisekoffer (Abbildung: [122]).

Für die einzelnen Konstellationen hat daraus [122] die folgenden 50 %- und 85 %-Fussgängerbreiten ermittelt, wobei die Streuung der Körperbreiten mitberücksichtigt wurde:

		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. 51: 50 %- und 85 %-Fussgängerbreiten in Abhängigkeit von der Gepäckbeförderung (Abbildung: [122]).

Aus den mittleren Schwankungen und der gewichteten Breitenverteilung ergibt sich der Fussgänger-Bewegungsraum. Dieser ist für die Hälfte der Fussgänger kleiner als 82 cm und für 85 % der Fussgänger kleiner als 101 cm. Die einleitend genannte, aus der Literatur abgeleitete Spurbreite ist damit für praktische Verhältnisse ungenügend.

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 einer mittleren Breite von 0.71 m (für diese Abschätzung gilt der Wert für Fussgänger ohne Gepäck) sowie mit der Schrittlängenfunktion (1), so erhält man bei maximaler Geschwindigkeit und einer Frequenz von 2.1 Hz eine Schrittlänge von 0.63 m sowie eine mögliche Fussgängerdichte von 2.2 P/m². Die Gehbewegung käme bei einer Dichte von etwa 5.4 P/m² zum Stillstand.

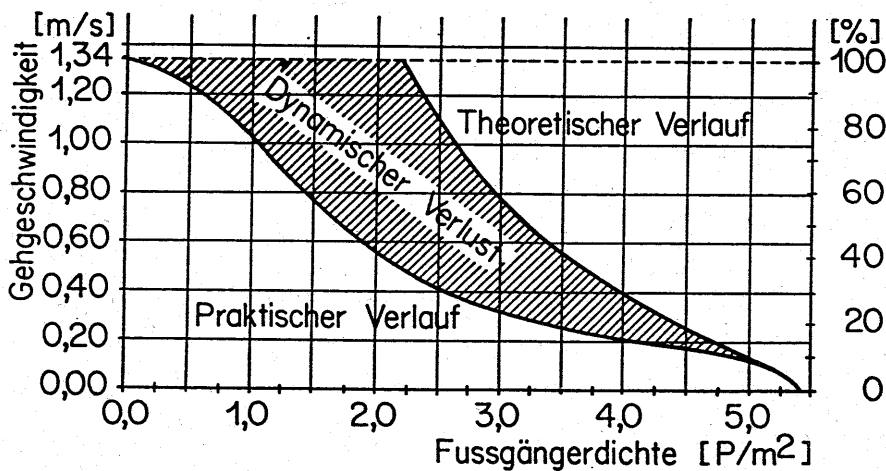


Abb. 52: Theoretische Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der Fussgängerdichte unter alleiniger Berücksichtigung des Platzbedarfes für die Schrittlänge; praktisch beobachtete Kurve und dynamischer Verlust (Abbildung: IVT).

Während die Angabe für die Dichte bei Bewegungsstillstand gut mit der höchsten Fussgängerichte gemäss 3.25.1 übereinstimmt, trifft dies für die Fussgängerichte bei grossen Geschwindigkeiten nicht zu. Der Vergleich der theoretischen mit der effektiven Kurve in Abbildung 52 zeigt einen mit der Geschwindigkeit rasch zunehmenden Platzbedarf, der als dynamischer Verlust durch Sicherheitsabstände zu betrachten ist.

In der Literatur wird meist ein Längsabstand von 1.0 m und eine Fussgängerichte von rund 1.4 P/m² postuliert (zum Beispiel [21], [87], [99], [121], [133]). Die als wünschbar erachtete Fussgängerichte liegt aber darunter, was dadurch bekräftigt wird, dass hier bereits ein starker Geschwindigkeitsrückgang festzustellen ist ([21], [65], [67], [96], [110], [132], [143]). Sinnvoll wird die Angabe einer Fussgängerichte ohnehin erst unter Bezugnahme auf das Qualitätsniveau (siehe Abschnitt 4.4).

4.22 Nutzbare Breite des Verkehrsraumes

4.22.1 Breitenverminderung durch Wandeinflüsse

Der Fussgänger hält gegenüber Wänden einen Mindestabstand ein. Auf Trottoirs hat [138] 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 [47]. Den Einfluss von Wänden in Korridoren hat [57] untersucht und dabei einen Abstand von 0.20 m zu Betonwänden und 0.14 bis 0.17 m zu Metallwänden festgestellt.

Die Angaben sind uneinheitlich, zu erkennen ist aber immerhin der Einfluss der Wandbeschaffenheit und die kleineren tolerierten Wandabstände in beengten Verhältnissen (Korridore von Gebäuden). Als Hypothese kann aufgestellt werden, dass in Korridoren etwa mit den Werten von [57] zu rechnen ist, was den erzwungenen Abständen von [122] 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. [96] weist schliesslich darauf hin, dass in Kurven mit einem zusätzlichen Platzbedarf von etwa 0.15 m zu rechnen ist.

4.22.2 Breitenverminderung durch Hindernisse

Hindernisse sind mit ihrer vollen Breite zu berücksichtigen. Zur Objektbreite kommt ein Mindestabstand hinzu. [122] hat ermittelt, dass der Abstand zu seitlichen Hindernissen in 50 % der Fälle bis zu 0.30 m, in 85 % der Fälle bis zu 0.43 m beträgt, vorausgesetzt dass dieser Abstand frei gewählt werden kann. Selbst der minimal tolerierte Mindestabstand liegt in 50 % der Fälle noch bei bis zu 0.23 m, in 85 % der Fälle bei bis zu 0.36 m. [57]

nennt dafür unabhängig von den Abmessungen des Hindernisses 0.10 m, was eher wenig sein dürfte. Der Einfluss eines Hindernisses ist auch ausserhalb dessen zu spüren und 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 [138] folgende Werte einzusetzen (US-amerikanische Verhältnisse):

- | | | |
|---|------------------------|-----------------|
| • | Beleuchtungskandelaber | 0.75 bis 1.05 m |
| • | Schaltschränke von LSA | 0.90 bis 1.20 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 |
| • | Bäume | 0.60 bis 1.22 m |
| • | Pflanzenkübel | 1.50 m |

In Schaufensterbereichen von Einkaufsstrassen 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 ([73], [100], [138]).

4.3 Leistungsfähigkeit der Fussgängeranlagen

4.31 Leistungsfähigkeit in der Ebene

4.31.1 Richtungsverkehr

Wie bereits erwähnt interessieren bezüglich der Leistungsfähigkeit von Fussgängeranlagen drei Zusammenhänge:

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

Die aus der Dimensionierung von Individualverkehrsanlagen stammende Funktion von Kladek (nach [121]) beschreibt den ersten Zusammenhang recht treffend:

$$(10) \quad v_i = v_{F,f} \cdot \left[1 - e^{-\gamma \cdot \left(\frac{1}{D} - \frac{1}{D_{\max}} \right)} \right]$$

wobei	v_i	Geschwindigkeit bei einer bestimmten Dichte [m/s]
	$v_{F,f}$	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 $v_{F,f} = 1.34 \text{ m/s}$ und $D_{\max} = 5.4 \text{ P/m}^2$ sowie dem Kurvenverlauf gemäss Abschnitt 3.25 ergibt sich die Eichkonstante zu $\gamma = 1.913 \text{ P/m}^2$. Die Funktion lautet damit für Fussgänger:

$$(11) \quad v_i = 1.34 \cdot \left[1 - e^{(-1.913 \cdot \left\{ \frac{1}{D} - \frac{1}{5.4} \right\})} \right]$$

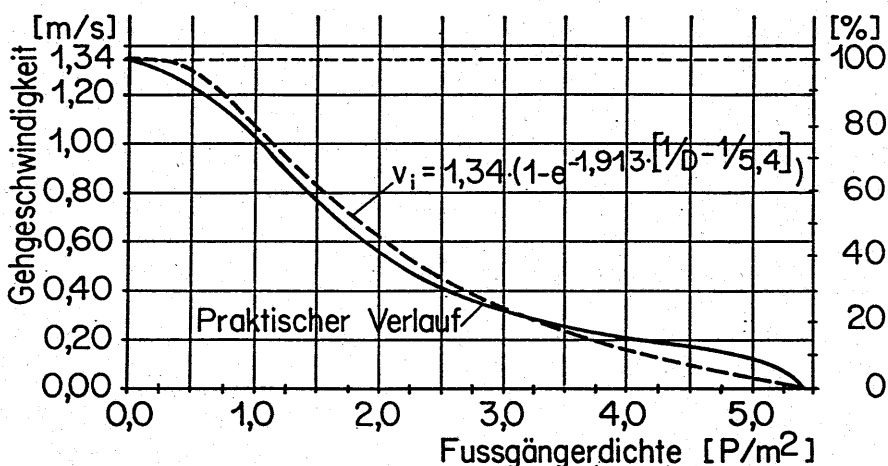


Abb. 53: Empirischer Zusammenhang zwischen Fussgängerdichte und Geschwindigkeit sowie Näherung mit Funktion von Kladek (Abbildung: IVT).

Die spezifische Leistungsfähigkeit ergibt sich nach (9) und (11) allgemein zu:

$$(12) \quad L_s = v_{F,f} \cdot D \cdot \left[1 - e^{(-\gamma \cdot \left\{ \frac{1}{D} - \frac{1}{D_{\max}} \right\})} \right]$$

wobei L_s Spezifische Leistungsfähigkeit [P/sm]

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

$$(13) \quad L_s = 1.34 \cdot D \cdot \left[1 - e^{(-1.913 \cdot \left\{ \frac{1}{D} - \frac{1}{5.4} \right\})} \right]$$

Durch Umformung wird aus den Beziehungen (11) und (13) schliesslich der allgemeine Ausdruck für die Leistungsfähigkeit in Funktion der Geschwindigkeit:

$$(14) \quad L_s = \frac{v_i}{\frac{1}{D_{\max}} - \frac{\ln \left(1 - \frac{v_i}{v_{F,f}} \right)}{\gamma}}$$

Die spezielle Form für die Leistungsfähigkeit von Fussgängeranlagen lautet:

$$(15) \quad L_s = \frac{v_i}{\frac{1}{5.4} - \frac{\ln\left(1 - \frac{v_i}{1.34}\right)}{1.913}}$$

Die drei Ausdrücke (11), (13) und (15) können im sogenannten Fundamentaldiagramm für den Fussgängerverkehr dargestellt werden:

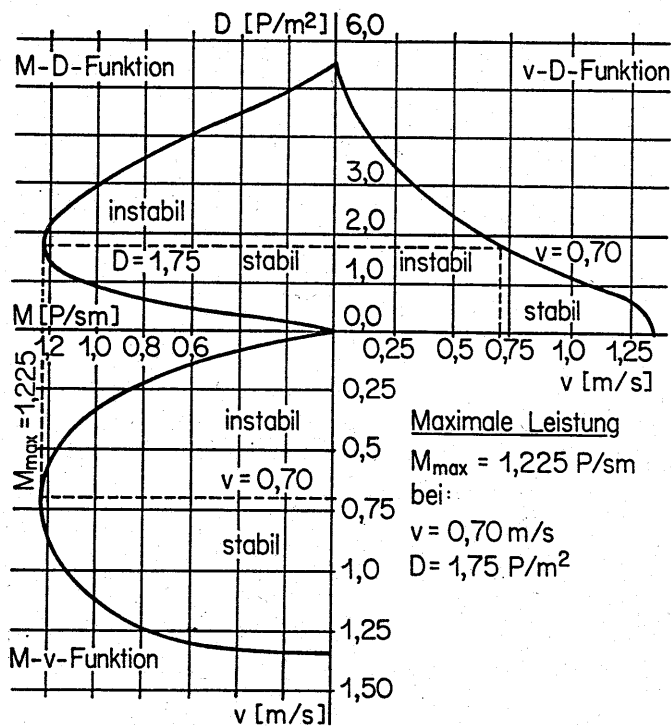


Abb. 54: Fundamentaldiagramm für Fussgängerverkehrsanlagen, Richtungsverkehr (Abbildung: IVT).

Die maximale Leistungsfähigkeit unter Normalbedingungen liegt demnach bei etwa 1.23 P/sm. Sie wird erreicht bei einer Fussgängerdichte von 1.75 P/m² und bei einer Fussgängergeschwindigkeit von 0.70 m/s (Arbeitspunkt). Verglichen mit den Literaturangaben ist dies eher wenig. Mehrere Autoren ([6], [12], [44], [97], [99]) geben Werte zwischen 1.4 und 1.5 P/sm an. Es finden sich aber auch tiefere Zahlen ([43], [99]), wobei die meisten Autoren die Dichte bei höchster Leistungsfähigkeit ähnlich wie in Abbildung 54 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 und zu einer höheren Leistungsfähigkeit. Im instabilen Bereich sinken Geschwindigkeit und Leistungsfähigkeit, sodass hier Rückstaugefahr besteht.

[99] hat Extremwerte der Leistungsfähigkeit mittels Experimenten untersucht. Auf die Anweisung, zügig zu gehen und aufzuschliessen, sich gegenseitig aber nicht zu behindern, erhielt [99] eine Leistung von 2.25 P/sm. Das Verhältnis von Dichte $D = 1.5$ P/m² zu Geschwindigkeit $v_f = 1.5$ 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 gemäss Abbildung 52 und bestätigt die dortigen Ueberlegungen. Die Leistungsfähigkeit war mit 4.33 P/ms dann 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 [99].

4.31.2 Gegenverkehr

Bei entgegengesetzten Fussgängerströmen verursacht die Behinderung einen Leistungsabfall, dessen Ausmass bisher nur wenig untersucht worden ist. [6], [12], [44] und [97] nennen eine mittlere Einbusse von rund 8 %. [110] spricht von unter 6 % und [102] gibt an, dass kein grosser Einfluss des Gegenverkehrs zu erwarten sei, da sich die beiden Verkehrsströme separieren. Diese Aussage deckt sich mit jener von [138]. [96] 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.

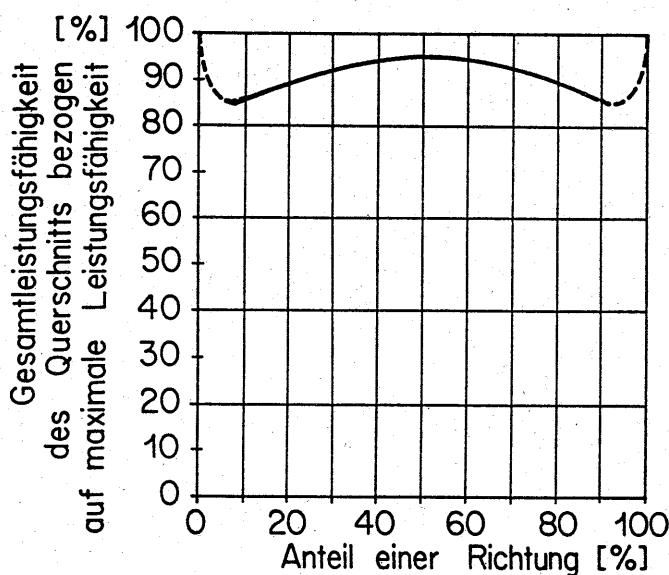


Abb. 55: Prozentuale Leistungsfähigkeit eines Querschnitts bei Gegenverkehr, bezogen auf die Leistungsfähigkeit bei einseitig gerichtetem Fussgängerstrom (Abbildung: IVT nach [96]).

Der jeweils schwächere Fussgängerstrom beansprucht überproportional viel Platz. Die folgende Abbildung von [96] 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.

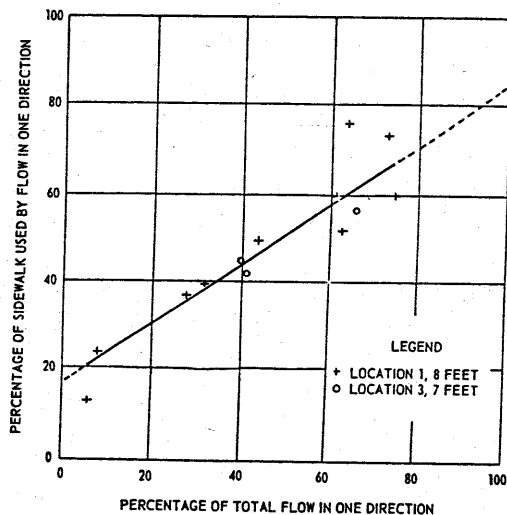


Abb. 56: Aufteilung eines Fussweges in Funktion der Richtungsanteile bei Gegenverkehr (Abbildung: [96]).

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. Hin-gegen kommt die bei einigen Untersuchungen eindeutig ausgewiesene Unempfindlichkeit im tiefen Dichtebereich gut zum Ausdruck. Es ergibt sich für die Geschwindigkeit beim Aufwärtsgehen:

$$(16) \quad v_{h,auf} = 0.610 \cdot \left[1 - e^{(-3.722 \cdot \left\{ \frac{1}{D} - \frac{1}{5.4} \right\})} \right]$$

wobei $v_{h,auf}$ Horizontalkomponente der Fussgängergeschwindigkeit beim Aufwärtsgehen in Abhängigkeit von der Fussgängerichte [m/s]

Für das Abwärtsgehen gilt:

$$(17) \quad v_{h,ab} = 0.694 \cdot \left[1 - e^{(-3.802 \cdot \left\{ \frac{1}{D} - \frac{1}{5.4} \right\})} \right]$$

wobei $v_{h,ab}$ Horizontalkomponente der Fussgängergeschwindigkeit beim Abwärtsgehen in Abhängigkeit von der Fussgängerichte [m/s]

Für die spezifische Leistungsfähigkeit eines Querschnittes erhält man:

$$(18) \quad L_{s,\text{auf}} = 0.610 \cdot D \cdot \left[1 - e^{(-3.722 \cdot \{\frac{1}{D} - \frac{1}{5.4}\})} \right]$$

$$(19) \quad L_{s,\text{ab}} = 0.694 \cdot D \cdot \left[1 - e^{(-3.802 \cdot \{\frac{1}{D} - \frac{1}{5.4}\})} \right]$$

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

Analog zu (15) wird schliesslich der Zusammenhang zwischen Leistungsfähigkeit und Geschwindigkeit zu:

$$(20) \quad L_{s,\text{auf}} = \frac{v_i}{\frac{1}{5.4} - \frac{\ln\left(1 - \frac{v_i}{0.610}\right)}{3.722}}$$

$$(21) \quad L_{s,\text{ab}} = \frac{v_i}{\frac{1}{5.4} - \frac{\ln\left(1 - \frac{v_i}{0.694}\right)}{3.802}}$$

Wie dem Fundamentaldiagramm zu entnehmen ist, liegt die optimale Fussgängerdichte für das Aufwärts- wie für das Abwärtsgen 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 Aufwärtsgen 0.850 P/sm und beim Abwärtsgen 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.

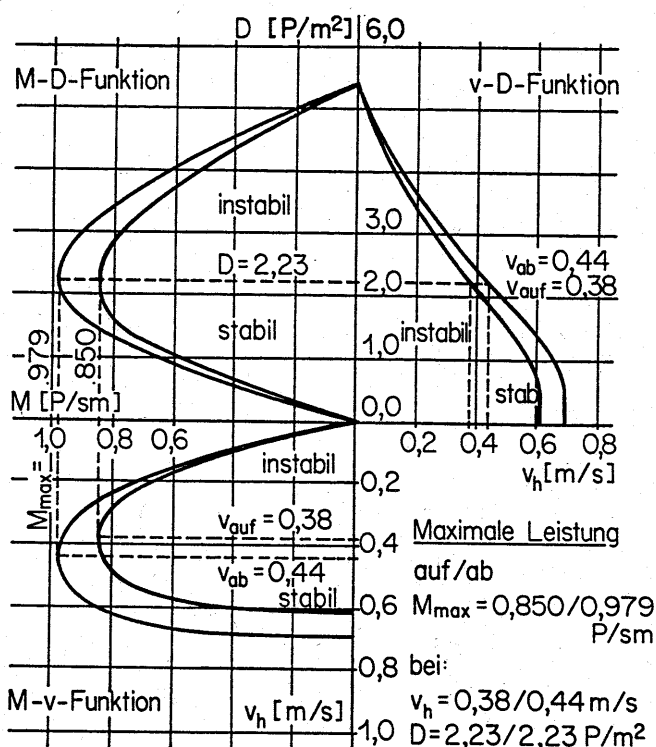


Abb. 57: Fundamentaldiagramm für Treppen, Richtungsverkehr (Abbildung: IVT).

Die Maximalleistung 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 (20) und (21) aber für eine mittlere Situation gelten, so ist die Differenz plausibel. Die Literaturangaben stimmen darin mit den hier erhaltenen Erkenntnissen überein, dass die Fussgängerdichte im Arbeitspunkt höher liegt als in der Ebene. Eine gute Übereinstimmung 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 -17 %.

4.4 Zulässige Belastung der Verkehrsanlagen

4.4.1 Das Level-of-Service-Konzept

4.4.1.1 Grundlagen

Bei der Bemessung einer Fussgängeranlage ist die Verwendung der maximalen Leistungsfähigkeit gemäss 4.3 nicht zulässig, da sie erst bei unangenehm hohen Fussgängerdichten auftritt. Die Komfortbetrachtungen müssen bei der Anlagendimensionierung dynamisch erfolgen, das heisst sie müssen die Häufigkeit des Auftretens von Bela-

stungsspitzen berücksichtigen. Seltene Belastungsspitzen lassen eine tiefere Qualitätsstufe zu als die Normalbelastung.

Diese Ueberlegungen sind in Analogie zur Unterscheidung von Leistungsfähigkeit und zulässiger Belastung beim motorisierten Individualverkehr. Unter Leistungsfähigkeit wird die grösste Anzahl Fahrzeuge verstanden, die in der 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 [110], [138]):

- 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

4.41.2 LOS beim Gehen in der Ebene

Aus der untersuchten Literatur lässt sich die folgende detaillierte Unterteilung ableiten ([24], [56], [87], [99], [106], [110], [121], [122], [138], [143]):

Tab. 4: 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 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>

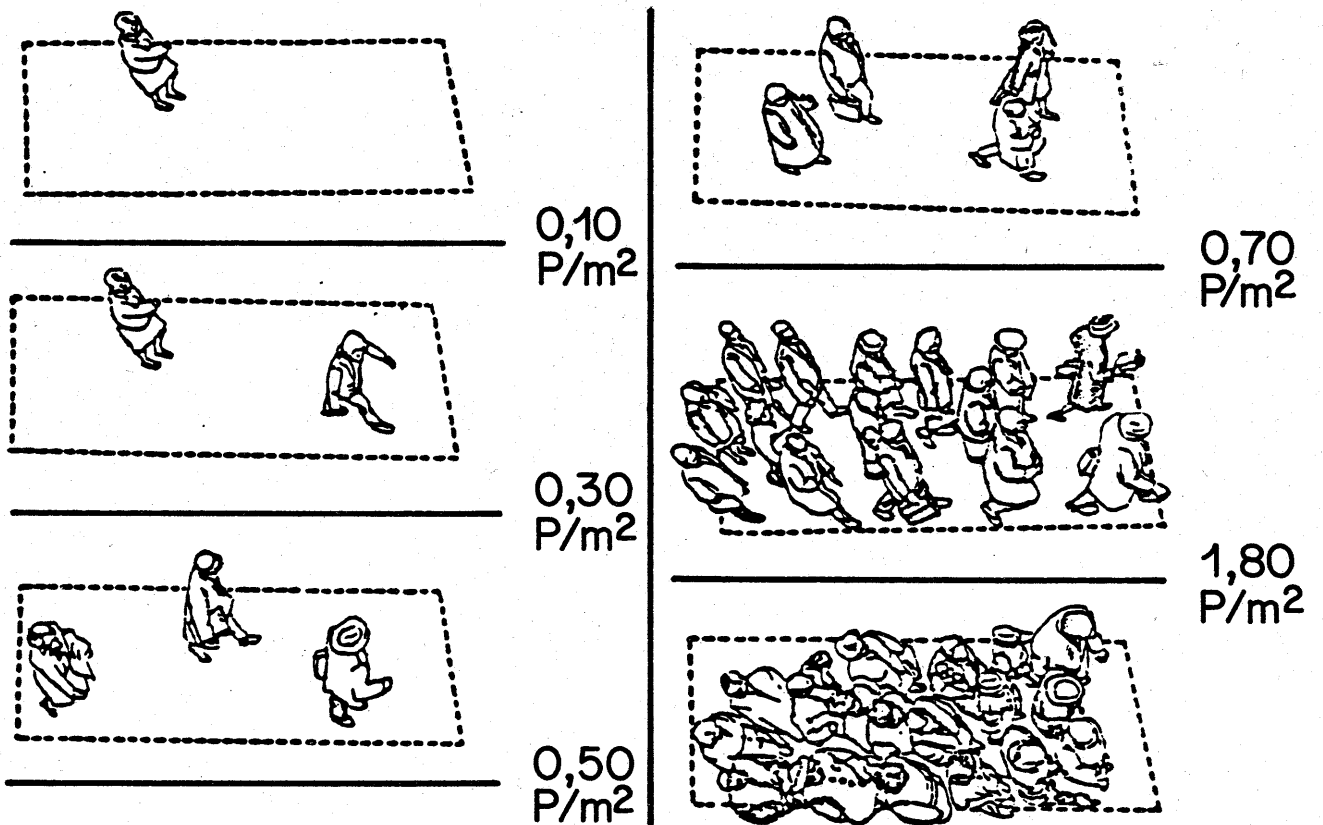


Abb. 58: Darstellung verschiedener Fussgängerdichten (Abgrenzung nicht identisch mit der hier verwendeten Definition; Abbildung: [138]).

Der Befund kann in folgende Kurzform gebracht werden:

Tab. 5: 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/m² rapide und reagiert somit gerade im tiefen Dichtebereich äusserst empfindlich auf kleine Belastungsänderungen. Gleichzeitig tritt ein starker Geschwindigkeitsverlust ein. In [87] wird darauf hingewiesen, dass unter städtischen Verhältnissen keine Dichten von über 2.6 P/m² beobachtet wurden. Für die Dimensionierung werden Verkehrsdichten bis 0.6 P/m² als akzeptabel betrachtet. Eine Dichte von über 1.0 P/m² darf nur in den seltensten Fällen in Rechnung gestellt werden. Der Zwischenbereich von 0.6 bis etwa 1.0 P/m² 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 [67] sowie daraus abgeleitet und vereinfacht [110]. Die Zuordnung der Verkehrsdichten zu den einzelnen Qualitätsklassen bleibt daher eine Abschätzung. Erkennbar ist in [67] 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 geringer. Die Qualitätsgrenzen verschieben sich daher etwas gegen den höheren Dichtebereich. Die Festlegung der Klassengrenzen berücksichtigt zusätzlich, dass der prozentuale Geschwindigkeitsverlust an der entsprechenden Klassengrenze ähnlich gross sein soll wie in der Ebene. Abweichungen zeigen sich nur bei den ganz hohen Fussgängerdichten, wo die Benützungsqualität nach diesem Kriterium etwas zu hoch eingeschätzt würde.

Tab. 6: 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 Richtwerte der zulässigen Belastungen

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 häufiger eine bestimmte Belastung unterschritten wird, desto höher muss der jeweilige Dimensionierungs-LOS sein. Die LOS-Stufen müssen daher mit der Dauercurve der Anlagenbelastungen in Verbindung gebracht werden. Aus den zugehörigen Leistungsfähigkeiten und Geschwindigkeiten der Anlage lässt sich der massgebende Fall ermitteln.

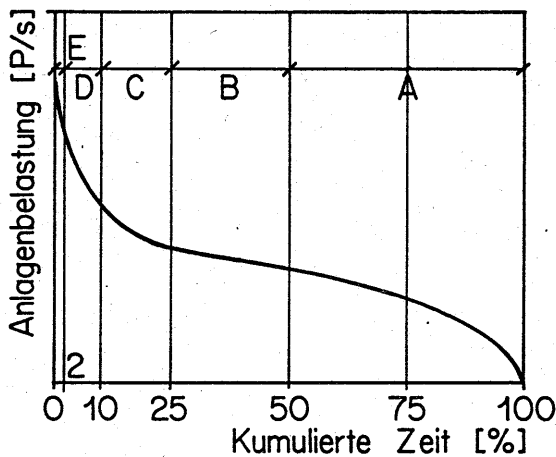


Abb. 59: Prinzip einer detaillierten Dimensionierung mit der Dauercurve einer Anlagenbelastung und den zugeordneten LOS (Abbildung: IVT).

Leider fehlen derzeit die erforderlichen Unterlagen, insbesondere typische Belastungsdauerkurven, sodass hier das vorgeschlagene detaillierte Bemessungsverfahren nicht konkretisiert werden kann.

4.42.2 Generelle Dimensionierungswerte

Den in 4.41.2 und 4.41.3 abgegrenzten Qualitätsstufen lassen sich charakteristische Geschwindigkeiten und Leistungsfähigkeiten zuordnen:

Tab. 7: 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 wenigen Hinweise in der Literatur nennen in der Ebene im 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 ([12], [87], [99], [121]). Bei Treppen gilt gemäss [121] ein Wert von etwa 1.3 P/m² und gemäss [12] ein solcher von rund 1.7 P/m². Letzterer erscheint als eher zu hoch. Die Richtwerte müssen sicherstellen, dass in vergleichbaren Fällen sowohl bei Treppen als auch bei ebenen Fussgängeranlagen ein homogenes Qualitätsniveau angewandt wird. Zudem ist ein Sicherheitsabstand vom instabilen Bereich des Fundamentaldiagramms zu gewährleisten, damit keine Rückstauerscheinungen auftreten. Basierend auf Tabelle 7 ergeben sich damit folgende Richtwerte:

Tab. 8: Bemessungsrichtwerte für Fussgängeranlagen.

Fall	LOS	Dichte [P/m ²]	Geschwindigkeit [m/s] auf / ab	Leistung [P/ms] auf / ab
Ebene				
• Normal	B	0.2	1.34	0.27
• Stossverkehr	D	0.5	1.30	0.65
• Engpässe	F	0.9	0.81	0.73
Treppe				
• Normal	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

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 ein 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.

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.

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/m² zu. Natürlicherweise stellt sich eine Fussgängerdichte von etwa 2.0 bis 2.9 P/m² 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/m² 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/m². 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 Gefällerrichtung.

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 Benützungsqualität 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/sm. Der Grenzwert stellt sicher, dass sich die Anlage noch im stabilen Betriebsbereich befindet. Die schliesslich zu wählende Qualitätsstufe hängt mit der Belastungshäufigkeit zusammen, weshalb die LOS mit der Belastungsdauerkurve in Verbindung gebracht werden müssen.

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 handelt sich meist um Beobachtungen, welche in Gedrängesituationen gemacht wurden und bei welchen sich die Fussgänger im Zeitdruck befinden. 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 Zusammen-

hang 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 Benutzer: 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: Analog zur vorliegenden Untersuchung sind die Verhältnisse bei Rolltreppen und Rollbändern aufzuarbeiten. Mit den linearen Elementen Gang/Weg und Treppe, dem flächenhaften Element der Plätze und den mechanischen Förderanlagen Lift, Rolltreppe und Rollband wären sämtliche Bestandteile einer Fussgängeranlage bekannt.

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] Antoniou, James: Planning for Pedestrians, in: Traffic Quarterly, January 1971, S. 55-71
 - [6] Australian Road Research Board: DoT Pedestrian Conference - Program and Papers, Sydney 1978
 - [7] Ashford, Norman/Holloway, Frank M.: The Effect of Age on Urban Travel Behaviour, in: Traffic Engineering, April 1971, S. 46-49, 67
 - [8] Asmussen, Dr. Gerhard: Physiologische Grundlagen von Haltung und Bewegung, Verlag Chemie, Weinheim/New York 1979
 - [9] Astrand, Irma: Arbeitsphysiologie, Schattauer Verlag, Stuttgart/New York 1987
 - [10] 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
 - [11] Baerwald, John E.: Traffic Engineering Handbook, Third Edition, Institute of Traffic Engineers, Washington DC 1965
 - [12] Barrette, R.: Moving Pedestrians in a Traffic-fress Environment, in: Traffic Engineering & Control September 1972, S. 235-238
 - [13] Berg, Dr. Walter: Gestaltung von Zugängen zu den Haltestellen und Bahnhöfen - Verkehrstechnisch-betriebliche Belange, Arbeitsgemeinschaft Recht für Fussgänger, Zürich 1988
 - [14] Berger, Dr. Wiltrud u.a.: Haltung und Bewegung beim Menschen - Physiologie, Pathophysiologie, Gangentwicklung und Sporttraining, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York/Tokyo 1984
 - [15] 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.
 - [16] Biermann, Jean-Louis: La capacité des divers moyens de transports routiers, in: Strasse und Verkehr 7/1967, S. 368-370
 - [17] 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
 - [18] Bölkow, Dr. Ludwig: Ein Jahrhundert Flugzeuge - Geschichte und Technik des Fliegens, VDI-Verlag, Düsseldorf 1990
-

-
- [19] City of Boulder: Fifth Annual Pedestrian Conference September 20 and 21, 1984, The City on its Feet, Transportation Division, City of Boulder 1984
- [20] Bovy, Prof. Philippe H./Vuille, J.: Réseaux et espaces piétonniers, EPF Lausanne, Institut de technique des transports, Lausanne 1973
- [21] 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
- [22] Bovy, Prof. Philippe H.: Pedestrian Planning and Design 1965-1975 - Bibliography, University of California, Institute of Transportation and Traffic Engineering, Berkeley 1975
- [23] 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
- [24] 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
- [25] Brändli, Prof. Heinrich/Berg, Walter: Einfluss von neuen Bahnhofszugängen auf das Fahrgastverhalten, in: Verkehr und Technik 11/1979, S. 480 - 482
- [26] 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
- [27] 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
- [28] Cameron, Ronald M.: Pedestrian Volume Characteristics, in: Traffic Engineering, January 1977, S. 36-37
- [29] Carstens, R.L./Ring, S.L.: Pedestrian Capacities of Shelter Entrances, in: Traffic Engineering, December 1970, S. 38-43
- [30] Collis, R.E.: A possible Design Criterion for Pavement Width, in: Traffic Engineering & Control, March 1975, S. 124-125
- [31] Cunagin, Wiley/Abrahamson, Tony: Driver Eye Height: A Field Study, in: ITE Journal, May 1979, S. 34-36
- [32] 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
- [33] Davis, Dennis G./Braaksma, John P.: Level-of-Service Standards for Platooning Pedestrians in Transportation Terminals, in: ITE-Journal April 1987, S. 31-35
- [34] Dieckmann, Prof. Dr. D.: Anmerkungen zur Gestaltung von ergonomischen Fahrerplätzen, in: Unfall- und Sicherheitsforschung Strassenverkehr, Heft 45/1983, Arbeitsplatz des Berufskraftfahrers, S. 54 - 59
- [35] Dietrich, Prof. Karl/Spacek, Peter: Vorlesung Transporttechnik, Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau, ETH Zürich, Zürich 1983
- [36] Van Dijk, Johannis: Befragung Regionalverkehr Zürich, ausgeführt im Auftrag der Behördendelegation für den Regionalverkehr Zürich und des Stadtrates der Stadt Zürich, Zürich 1972
-

-
- [37] Donskoi, D.D.: Grundlagen der Biomechanik, Deutscher Sportbund, Schriftenreihe des Bundesausschusses zur Förderung des Leistungssports, Trainerbibliothek Band 16, Verlag Bartels & Wernitz KG, Berlin 1975
- [38] Dreyfuss, Henry: The Measure of Man - Human Factors in Design, Whitney Library of Design, New York 1967
- [39] Duncan, N.C.: A further Look at Speed/Flow/Concentration, in: Traffic Engineering & Control, October 1979, S. 482-483
- [40] Dupuis, Prof. Dr. H.: Ergonomische Gestaltung von Fahrersitzen, in: Unfall- und Sicherheitsforschung Strassenverkehr, Heft 45/1983, Arbeitsplatz des Berufskraftfahrers, S. 60 - 63
- [41] Elkington, John/McGlynn, Roger/Roberts, John: The Pedestrian: Planning & Research - a Literature Review and annotated Bibliography, Transport & Environment Studies, London 1976
- [42] 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
- [43] Evans, Henry K.: Traffic Engineering Handbook, Second Edition, Institute of Traffic Engineers, New Haven/Connecticut 1950
- [44] 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
- [45] 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
- [46] Fürmetz, Prof.Dr. Reinhard: Anlagen zur Ueberwindung von Höhenunterschieden im städtischen Verkehrsraum, in: Fachhochschule Aachen, FH-Texte 38, S. 33 - 85, Aachen 1983
- [47] Fürmetz, Prof.Dr. Reinhard/Bernecker, Manfred: Fussgängerbewegungen auf Treppenanlagen im städtischen Verkehrsraum, in: Der Nahverkehr 4/1984, S. 56 - 59
- [48] Gantvoort, Johan Th.: Pedestrian Traffic in Town Centres, in: Traffic Engineering & Control January 1971, S. 454-456
- [49] Garbrecht, Dietrich: Gehen - Ein Plädoyer für das Leben in der Stadt, Beltz-Verlag, Weinheim und Basel 1981
- [50] 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
- [51] Girnau, Dr. Günter/Blennemann, Friedhelm: Verknüpfung von Nahverkehrssystemen, Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e.V. (STUVA), Alba Buchverlag, Düsseldorf 1970
- [52] Glaser, Prof.Dr. Roland: Grundriss der Biomechanik, WTB Band 286, Akademie-Verlag, Berlin 1983
- [53] Glissmeyer, Prof.Dr. Hans u.a.: Handbuch Städtischer Verkehr, Verlag transpress, Berlin 1974
- [54] Gray, B. Everett: Slips, Stumbles and Falls: Pedestrian Footwear and Surfaces, American Society for Testing and Materials, Philadelphia 1990
-

-
- [55] Grayson, G.B.: Observations of Pedestrian Behaviour at four Sites, Transportation and Road Research Laboratory, TRRL Laboratory Report 670, Crowthorne/Berkshire 1975
- [56] 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
- [57] 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
- [58] Hall, Edward T.: Die Sprache des Raumes, Pädagogischer Verlag Schwann, Düsseldorf 1976
- [59] Hankin, B.D./Wright, R.A: Passenger Flow in Subways, in: Operational Research Quarterly, volume 9. number 2, june 1958, S. 81 - 88
- [60] Harland, D.G./Jacoby, R.G./Pickering, D.: Footways used by Cyclists and Pedestrians, in: Traffic Engineering & Control, May 1986, S. 283-287
- [61] Heidemann, Dr. Claus: Ueber Gesetzmässigkeiten des Fussgängerverkehrs einer Einkaufsstrasse, in: Strassenverkehrstechnik 5/6/1967, S. 55-60
- [62] Heidemann, Dr. Claus: Gesetzmässigkeiten städtischen Fussgängerverkehrs, Forschungsarbeiten aus dem Strassenwesen, Neue Folge Heft 68, Kirschbaum-Verlag, Bad Godesberg o.J.
- [63] Hill, Michael R.: Pedestrian Behaviour and Facilities Design, Selected Bibliography 1970-1975, Council of Planning Librarians, Exchange Bibliography, Monticello/Illinois, 1976
- [64] Hoel, Dr. Lester A.: Pedestrian Travel Rates In Central Business Districts, in: Traffic Engineering, january 1968, S. 10 - 13
- [65] 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
- [66] ITE-Technical Council Committee 6Y-1: Levels of Service Provided by Urban Transportation Systems, in: Traffic Engineering, January 1976, S. 30-35
- [67] ITE-Technical Council Committee 5-R: Characteristics and Service Requirements of Pedestrians and Pedestrian Facilities, Traffic Engineering, May 1976, S. 34-45
- [68] ITE-Technical Council Committee 6Y-28: Pedestrian Planning Activities, in: ITE Journal, June 1986, S. 17-20
- [69] Jabez, Alan: Simulating Passenger Flows, in: UTI, March/April 1991, S. 24 - 25
- [70] 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
- [71] 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
- [72] 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
- [73] Kelly, J.J.: Piccadilly Circus Pedestrian Study, Greater London Council, Departement of Planning and Transportation, Transportation Branch, London 1974
-

-
- [74] 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
- [75] Kirsch, Dr. Helmut: Leistungsfähigkeit und Dimensionierung von Fussgängerüberwegen, in: Strassenbau und Strassenverkehrstechnik 33, Bonn 1964
- [76] 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
- [77] 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
- [78] Kochevar, Robert A./Lalani, Nazir: How long should a safe Pedestrian Clearance Intervall be? in: ITE Journal, May 1985, S. 30-32, 49
- [79] Krug, Stephan: Ein interaktives Programmsystem zur Angebotsplanung für den liniengebundenen öffentlichen Personennahverkehr, Dissertation an der Technischen Universität Carolo Wilhelmina Braunschweig, Braunschweig 1987
- [80] Lane, R.: Introduction to Traffic Engineering, part 4: Road Capacity, in: Traffic Engineering & Control January 1968, S. 440-443
- [81] Lautso, Kari/Pentti, Murole: A Study of Pedestrian Traffic in Helsinki: Methodes and Results, in: Traffic Engineering & Control January 1974, S. 446-449
- [82] Leibbrand, Dr. Kurt: Verkehrsingenieurwesen - Städtische Verkehrsplanungen für Schiene und Strasse, Birkhäuser-Verlag, Basel 1957
- [83] Leibbrand, Dr. Kurt: Stadt und Verkehr - Theorie und Praxis der städtischen Verkehrsplanung, Birkhäuser Verlag, Basel/Boston/Stuttgart 1980
- [84] Lenke, Peter: Fussgängerbereiche als Planungselement für den öffentlichen Nahverkehr, in: Verkehr und Technik 2/1971, S. 67-70, 3/1971, S. 96-102
- [85] Leung, W.S./Lau, C.C.: A new Study of the Traffic Flow/Concentration Relationship, in: Traffic Engineering & Control, September 1975, S. 386-387
- [86] Lewis, P.A.: The Interpretation and Use of Speed/Flow Relationships for Transport Planners, in: Traffic Engineering & Control June 1980, S. 304-309
- [87] 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
- [88] Margaria, Rodolfo: Biomechanics and energetics of muscular exercise, Oxford University Press, Oxford 1976
- [89] Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners: Pedestrian Planning and Design Seminar Proceedings, New York February 28-29, 1972
- [90] Maurer, Dr. W.: Statistik und Wahrscheinlichkeitsrechnung, Vorlesung an der ETH Zürich, Zürich 1984
- [91] 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
-

-
- [92] Monheim, Rolf: Fussgängerbereiche und Fussgängerverkehr in Stadtzentren in der Bundesrepublik Deutschland, Bonner Geographische Abhandlungen, Heft 64, Ferd. Dümmers Verlag, Bonn 1980
- [93] 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
- [94] Morecki, A. (Herausgeber): Biomechanics of Motion, International Centre for Mechanical Sciences, Courses and Lectures No 263, Springer-Verlag, Wien/New York 1980
- [95] Müller, Roland: Pedestrian Volume and Speed Characteristics - A Thesis presented to the Faculty of the Bureau of Highway Traffic, Yale University, Yale 1968
- [96] Navin, Francis P.D./Wheeler, Dr. Robert J.: Pedestrian Flow Characteristics, in: Traffic Engineering, June 1969, S. 30 - 36
- [97] 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
- [98] 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
- [99] Oeding, Detlef: Verkehrsbelastung und Dimensionierung von Gehwegen und anderen Anlagen des Fussgängerverkehrs, Dissertation an der Technischen Hochschule Carolo-Wilhelmina Braunschweig, Braunschweig 1963
- [100] O'Flaherty, C.A./Parkinson, M.H.: Movement on a City Centre Footway, in: Traffic Engineering & Control, February 1972, S. 434-438
- [101] Offner, Jean-Marc: Les Déplacements Piétonniers, analyse bibliographique, Institut de Recherche des Transports, note d'information No 20, Arcueil/F 1981
- [102] Older, S.J.: Movement of Pedestrians on Footways in Shopping Streets, in: Traffic Engineering & Control August 1968, S. 160-163
- [103] Otto, Dieter: Verkehrserzeugungsmodell zur Quantifizierung des Fussgängerverkehrsaufkommens, in: Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 279, Bonn 1980
- [104] Pasricha, P.S.: Pedestrian Planning in Greater Bombay, in: Traffic Engineering & Control February 1983, S. 62-67
- [105] Petersen, Stephen G./Braswell, Robert H.: Planning and Design Guidelines for Mode Transfer Facilities, in: Traffic Quarterly, July 1972, S. 405-423
- [106] 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
- [107] Pretty, Robert Lindsay: The Delay to Vehicles and Pedestrians at signalized Intersections, in: ITE Journal, May 1979, S. 20-23
- [108] Prinzing, Roland; Lebensalter und physiologische Zeit - Messung der Lebensdauer in biologischen Systemen, Neue Zürcher Zeitung Nr. 30/1991, 6. Februar 1991
- [109] Prusa, Wilfried: Die Gestaltung der Kraftomnibus-Innenräume - Verkehrsphysiologische und verkehrspsychologische Kriterien, in: Die Bundesbahn 9(1987)
-

-
- [110] 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
- [111] Reimer, Kurt: Die Bewegung der Menschenmassen in Verkehrsräumen, in: Glasers Annalen 71(1947) Nr. 7, S. 121 - 131
- [112] Reimer, Kurt: Das Problem des raschen Fahrgastwechsels bei städtischen Verkehrsmitteln, in: Glasers Annalen 73(1949) Nr. 11, S. 198-202, 73(1949) Nr. 12, S. 217-219
- [113] Reimer, Kurt: Bewegungsvorgänge auf Bahnsteigen des grossstädtischen Schnellverkehrs, in: Glasers Annalen 77(1953) Nr. 11, S. 338 - 341
- [114] Reiss, Martin L.: Young Pedestrian Behavior, in: Transportation Engineering, October 1977, S. 40-44
- [115] Reitmayer, Ulrich: Holztreppe in handwerklicher Konstruktion, 3. Auflage, Julius Hoffmann Verlag, Stuttgart 1986
- [116] Retzko, Prof.Dr. Hans-Georg/Androsch, Wolfgang: Pedestrian Behaviour at signalised Intersections, in: Traffic Engineering & Control August/September 1974, S. 735-738
- [117] Rohmert, Walter/Rutenfranz, Joseph: Praktische Arbeitsphysiologie, 3. neubearbeitete Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart/New York 1983
- [118] Rüger, Siegfried: Betriebstechnologie städtischer öffentlicher Personenverkehr, transpress-Verlag, Berlin 1974
- [119] Sandahl, Janne/Percivall, Martin: A Pedestrian Traffic Model for Town Centers, in: Traffic Quarterly, July 1972, S. 359-372
- [120] Schmitz, Andreas: Der Weg zur Strassenbahn - Die Lage der Haltestelle im Raum, in: Verkehr und Technik, Heft 4/1991, S. 139 - 144 und Heft 6/1991, S. 235 - 240
- [121] Schnabel/Lohse: Strassenverkehrstechnik und -planung, Grundlagen, VEB transpress, Berlin, 1980
- [122] Schopf, Josef Michael: Bewegungsabläufe, Dimensionierung und Qualitätsstandards für Fussgänger, Radfahrer und Kraftfahrzeugverkehr, Dissertation Technische Universität Wien, Wien 1985
- [123] 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
- [124] Schümborg, Prof.Dr.Günter: Gleisplangestaltung (Kapitel Personenverkehrsbereich), Verlag transpress, Berlin 1987
- [125] Schürch, A.: Fussgänger im Verkehr - Eine Literaturoberwertung, ETH Zürich, Lehrstuhl für Verkehrsingenieurwesen, LS-Studienunterlage Nr. 73/2, Zürich 1973
- [126] 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
- [127] Bundesamt für Statistik: Statistisches Jahrbuch der Schweiz 1991, Verlag Neue Zürcher Zeitung, Zürich 1990
- [128] Stadt Zürich: Statistisches Jahrbuch der Stadt Zürich 1991, 86. Jahrgang, Statistisches Amt der Stadt Zürich, Zürich 1991
- [129] Stegemann, Prof.Dr. Jürgen: Leistungsphysiologie - Physiologische Grundlagen der Arbeit und des Sports, 3. Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart/New York 1984
-

-
- [130] Stengel, Wolfgang: Aspekte der Verkehrssicherheit bei Führung von Bussen und Strassenbahnen in Fussgängerzonen, in: Verkehr und Technik 3/1980, S. 110 - 116
- [131] Verknüpfung von Nahverkehrssystemen, Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e.V., Düsseldorf, 1970
- [132] 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
- [133] Vereinigung Schweizerischer Verkehrsingenieure: Leistungsfähigkeit bei verschiedenen Transportarten, Forschungsauftrag 5/67, Zürich 1971
- [134] 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
- [135] Thillainayagam, R.: Economic Study for Providing Grade separated Pedestrian Crossings in Madras City, Highway Research Station, Madras ca. 1969
- [136] 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
- [137] Tolley, Rodney: The greening of urban transport: planning for walking and cycling in Western cities, Belhaven Press, London 1990
- [138] Transportation Research Board: Highway Capacity Manual, Special Report 209, Washington DC 1985
- [139] Untermann, Richard K.: Accomodating the Pedestrian - Adapting Towns and Neighborhoods for Walking and Bicycling, Van Nostrand Reinhold Company, New York 1984
- [140] Urbanik, Thomas: Understanding Forced Flow, in: ITE Journal, October 1986, S. 23-26
- [141] Vance, Mary: Pedestrian Facilities Design, 1970-1987, Architecture Series: Bibliographie A 2030, Monticello/Illinois 1988
- [142] 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
- [143] Weber, Wolfgang: Fahrwege und Fahrdynamik der Schienenbahnen, Skript zur gleichnamigen Vorlesung an der Universität Stuttgart/Institut für Eisenbahn- und Verkehrswesen
- [144] Weeber, Dr. Hannes u.a.: Verkehrsanlagen aus der Sicht des Fussgängers, in: Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 279, Bonn 1980
- [145] Wiebusch-Wothge, Dr. Rainer: Beurteilung von Verkehrsabläufen an konventionellen und alternativen Fussgängerüberwegen, Schriftenreihe Lehrstuhl für Verkehrswesen I, Ruhr-Universität Bochum, Heft 6, 1987
- [146] Wolf, Johannes: Ermittlung des hinsichtlich der Reisezeit zweckmäßigsten Haltestellenabstandes im städtischen Nahverkehr, Dissertation an der Hochschule für Verkehrswesen "Friedrich List", Dresden, 1970
- [147] Wolff, Hans/Bierschenk, Hartmut/Scholz, Dr. Gerhard: Berücksichtigung des Fussgängerverkehrs bei Verkehrserhebungen, in: Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 279, Bonn 1980
- [148] Zweigert, Dr. Manfred: Bahnanlagen des Nahverkehrs, transpress Verlag, Berlin 1982
-

A.2 Abkürzungsverzeichnis

a	Wärmeübergangszahl
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	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
E _E	Gesamtenergieverbrauch beim Gehen in der Ebene [kJ/h]
E _T	Gesamtenergieverbrauch beim Gehen auf Treppen [kJ/h]
F	Anzahl Fussgänger [P]
G	Grundenergieumsatz [kJ/h]
g	Proportionalitätsfaktor, abhängig von Emissions- und Absorptionseigenschaften der beteiligten Körper
γ	Eichkonstante der Formel von Kladek [P/m ²]
L	Leistungsfähigkeit einer Fussgängeranlage [P/s]
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]
P _H	Wasserdampfdruck der Haut
P _L	Wasserdampfdruck der Luft
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]
V _F	Fussgängergeschwindigkeit [km/h]
v _F	Fussgängergeschwindigkeit [m/s]
v _{F,f}	Fussgängergeschwindigkeit bei voller Freizügigkeit [m/s]
v _h	Horizontalgeschwindigkeit [m/s]
v _{h,ab}	Horizontalkomponente der Fussgängergeschwindigkeit auf Treppen beim Abwärtsgehen [m/s]
v _{h,auf}	Horizontalkomponente der Fussgängergeschwindigkeit auf Treppen beim Aufwärtsgehen [m/s]
v _i	Geschwindigkeit bei einer bestimmten Fussgängerdichte [m/s]
v _v	Vertikalgeschwindigkeit [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

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	16
Abb. 10	Chronogramm von Gehen und Laufen	17
Abb. 11	Verlauf der Schwerpunktage 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	18
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	Energieumsatz beim Gehen in der Ebene in Abhängigkeit von Schrittlänge und Schrittzahl	22
Abb. 17	Energieverbrauch beim Gehen und Laufen	22
Abb. 18	Energieverbrauch für eine Strecke von 1000 m Länge in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit	23
Abb. 19	Energieverbrauch beim Gehen auf geneigten Strecken	24
Abb. 20	Effizienz beim Gehen auf verschiedenen Neigungen	24
Abb. 21	Energieumsatz für eine Hubarbeit von 1 mkg für Rampe, Treppe und Leiter	25
Abb. 22	Energieverbrauch auf energieoptimaler Treppe	26
Abb. 23	Körperliche Leistungsfähigkeit in Funktion des Alters	27
Abb. 24	Körperliche Leistungsfähigkeit in Funktion des Alters	27
Abb. 25	Tagesperiodik der Leistungsbereitschaft	28
Abb. 26	Uebereinstimmung der Zeitpunkte gehäuften Einschlafens bei Autofahrern mit gehäuften Fehlanschreibungen von Gasarbeitern	29
Abb. 27	Mittlerer tagesrhythmischer Verlauf der akustischen Reaktionszeiten und der ergonomisch bestimmten Arbeitskapazität	29
Abb. 28	Tagesganglinie und Leistungsdisposition von Gasarbeitern	30
Abb. 29	Körpertemperatur und Wärmebildung des Menschen in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur	31
Abb. 30	Energieumsatz nach einstündigem Sitzen in unterschiedlicher Umgebungstemperatur	31
Abb. 31	Wärmetausch einer nackten Versuchsperson während der Arbeit	33
Abb. 32	Individuelle Unterschiede in der Beurteilung verschiedener Umgebungstemperaturen	33

Abb. 33	Abnahme der Dauerleistungsgrenze in Abhängigkeit von der Effektivtemperatur	34
Abb. 34	Beispiele für den thermischen Widerstand gebräuchlicher Bekleidungen	34
Abb. 35	Mittlere Gehgeschwindigkeit bei gesunden Menschen im Strassenverkehr in Funktion des Lebensalters	36
Abb. 36	Verlauf der Fussgängergeschwindigkeiten in Funktion des Lebensalters	37
Abb. 37	Fussgängergeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Tageszeit	39
Abb. 38	Fussgängergeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Tageszeit und der Verkehrsdichte	39
Abb. 39	Hypothese zum Geschwindigkeitsverlauf im Tagesgang	40
Abb. 40	Geschwindigkeit in Funktion der Umgebungstemperatur	40
Abb. 41	Geschwindigkeit in Funktion der Umgebungstemperatur	41
Abb. 42	Abnahme der Fussgängergeschwindigkeit auf Treppen in Funktion der Stufenzahl	42
Abb. 43	Geschwindigkeit der Fussgänger in Funktion der Gehwegneigung	43
Abb. 44	Abhängigkeit der Fussgängergeschwindigkeit von der Fussgängerdichte in der Ebene	45
Abb. 45	Abhängigkeit der Fussgängergeschwindigkeit von der Fussgängerdichte auf Treppen	45
Abb. 46	Summenkurve der Fussgängergeschwindigkeiten	46
Abb. 47	Verkehrstromgesetzmässigkeiten beim motorisierten Individualverkehr und beim Fussgängerverkehr	48
Abb. 48	Fussgängerdichte vor Lichtsignalanlage in Funktion der Distanz von der Bordsteinkante	49
Abb. 49	Fussgängerschwankungen um eine Ideallinie	50
Abb. 50	Prozentuale Verteilung des Gepäcktransportes durch Fussgänger	50
Abb. 51	50 %- und 85 %-Fussgängerbreiten in Abhängigkeit von der Gepäckbeförderung	51
Abb. 52	Theoretische Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der Fussgängerdichte, dynamischer Verlust	51
Abb. 53	Empirischer Zusammenhang zwischen Fussgängerdichte und Geschwindigkeit sowie Näherung mit Funktion von Kladek	54
Abb. 54	Fundamentaldiagramm für Fussgängerverkehrsanlagen	55
Abb. 55	Prozentuale Leistungsfähigkeit eines Querschnittes bei Gegenverkehr	56
Abb. 56	Aufteilung eines Fussweges in Funktion der Richtungsanteile bei Gegenverkehr	57
Abb. 57	Fundamentaldiagramm für Treppen	59
Abb. 58	Darstellung verschiedener Fussgängerdichten	62
Abb. 59	Prinzip einer detaillierten Dimensionierung mit der Dauerkurve einer Anlage und den zugeordneten LOS	64

A.4 **Verzeichnis der Tabellen**

Tab. 1	Energieverbräuche bei verschiedenen Tätigkeiten	21
Tab. 2	Energiemehrverbrauch durch Rückenlasten und verschiedene Zustände des Weges	23
Tab. 3	Mittlere horizontale und vertikale Geschwindigkeiten auf typischen Neigungen	43
Tab. 4	Abgrenzung der LOS A bis I gemäss Kriterien K1 bis K8	60
Tab. 5	Definition und Charakterisierung der verschiedenen Levels-of-Service beim Gehen in der Ebene	63
Tab. 6	Definition und Charakterisierung der verschiedenen Levels-of-Service beim Gehen auf Treppen	64
Tab. 7	Geschwindigkeiten und Leistungsfähigkeiten beim Gehen in der Ebene und auf Treppen in Abhängigkeit von der Qualitätsklasse	65
Tab. 8	Bemessungsrichtwerte für Fussgängeranlagen	66

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 schneetreier 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 Aequivalent 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 Skidometer — 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 Seilleiterschranke 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 Literaturauswertung (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. Düggegi) |
| 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 Umlagemodelles 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. Bühlmann, H. P. Lindenmann, P. Spacek)</p> <p>90 1992 Transporttechnik der Fussgänger Transporttechnische Eigenschaften des Fussgängerverkehrs (U. Weidmann)</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)