

Paul Pfaffenbichler

**WAS BIENEN UND MENSCHEN GEMEINSAM
HABEN - ÜBER BEOBACHTUNGEN DES
ZEITEMPFINDENS, DIE EVOLUTIONSTHEORIE
UND DAS WEBER FECHNERSCHE
EMPFINDUNGSGESETZ ZU EINER
ERKLÄRUNG DES MENSCHLICHEN
VERHALTENS IM VERKEHRSSYSTEM**

Was Bienen und Menschen gemeinsam haben - über Beobachtungen des Zeitempfindens, die Evolutionstheorie und das Weber Fechnersche Empfindungsgesetz zu einer Erklärung des menschlichen Verhaltens im Verkehrssystem

Einleitung

Dieser Artikel unternimmt den Versuch den Beitrag der Arbeiten Prof. Knoflachers zu einem umfassenden Verständnis des menschlichen Verkehrsmittelwahlverhaltens darzustellen. Der Ausgangspunkt sind frühe Arbeiten der 1970er Jahre, in denen erkannt wurde, dass unterschiedliche Wegeteile unterschiedlich empfunden und bewertet werden. Diese lieferten exponentielle Zeitbewertungsfunktionen, konnten allerdings keine theoretische Begründung für ihr Auftreten geben. Diese gelang Prof. Knoflacher zum einen durch die Verknüpfung des Verkehrssystems mit der evolutionären Prägung seiner Benutzer und der Erkenntnis, dass weniger die Zeit als vielmehr der physiologische Energieaufwand die entscheidende Größe ist und zum anderen durch die Verbindung dieser Erkenntnisse mit dem Weber-Fechnerschen Empfindungsgesetz. Abschließend wird gezeigt, wie diese Erkenntnisse in die Praxis der dynamischen Flächennutzungs- und Verkehrsmodellierung eingeflossen sind.

Beobachtungen des Zeitempfindens

Zu Beginn der 1970er Jahre untersuchte Klaus Walther am Verkehrswissenschaftlichen Institut der Rheinisch Westfälischen Technischen Hochschule Aachen die Attraktivität öffentlicher Verkehrsmittel. Dabei erkannte er die große Bedeutung des Zugangs zu den Haltestellen (Walther, 1973a). Beobachtet wurde von ihm die Bereitschaft der potentiellen Benutzer Zugangswege zu akzeptieren oder abzulehnen. Diese wurde als *Ansprechbarkeit* bezeichnet und in Prozent gemessen. Aus einer Untersuchung von rund 2.300 Reisen im öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) leitete Walther *Ansprechbarkeitslinien* ab (Walther, 1973b). Diese haben die Form von Exponentialfunktionen mit einem negativen Koeffizienten (siehe Abbildung 1). Walther erkannte, dass nicht die reine physikalische Fußwegzeit den Widerstand bildet, sondern dass diese mit einem Zuschlag zu versehen ist, welcher wiederum von der Fußweglänge abhängig ist. Dieser Zeitbewertungsfaktor lässt sich als Reziprokwert der Ansprechbarkeit darstellen (Abbildung 2). Der Zeitbewertungsfaktor „...gibt an, als wieviel Minuten der Fahrgast die effektiv benötigte Fußwegzeit t_f beim Zugang zur Haltestelle gegenüber der Fahrzeit mit dem Verkehrsmittel empfindet“ (Walther, 1973a) S. 480.

In den folgenden Jahren erweiterte Walther sein Konzept der Zeitbewertungsfaktoren auf andere Teilaspekte eines ÖV-Weges wie Wartezeit und Umsteigezeit sowie auf andere Verkehrsmittel (Walther, 1975). Die bewerteten Reisezeiten verwendete Walther um mit Hilfe der Analogie zum zweiten Kirchhoffschen Gesetz der Elektrotechnik Verkehrsmittelanteile abzuschätzen.

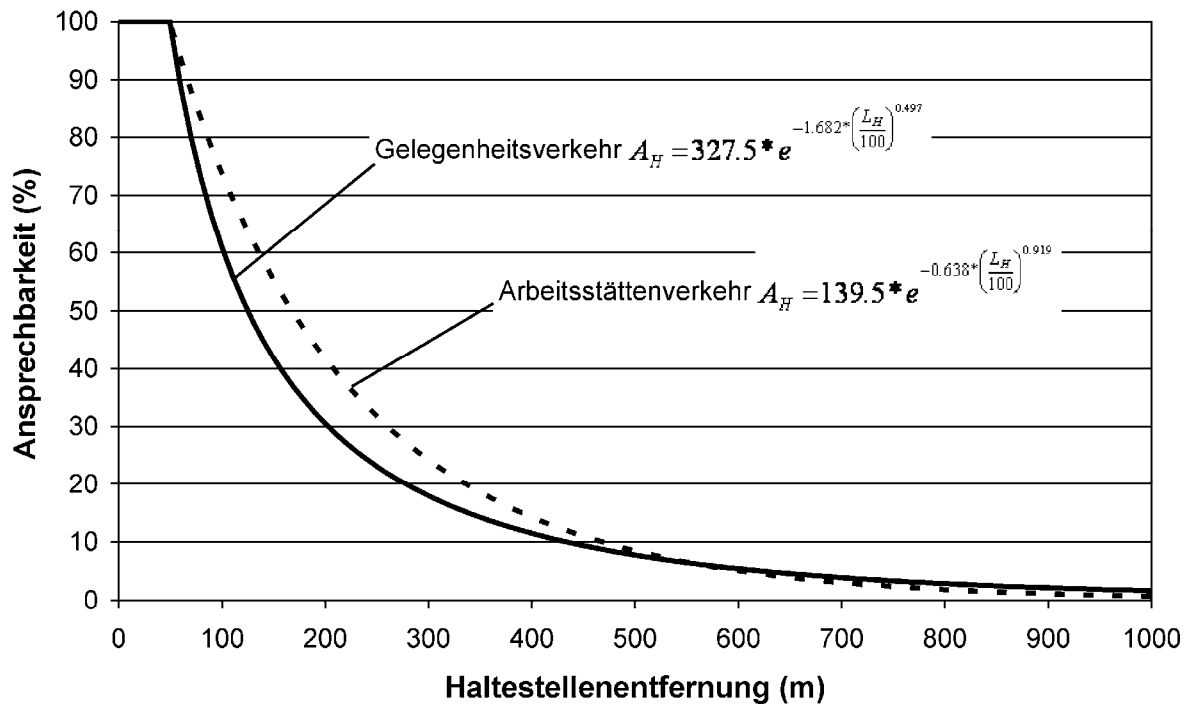


Abbildung 1: Ansprechbarkeiten nach (Walther, 1973b)

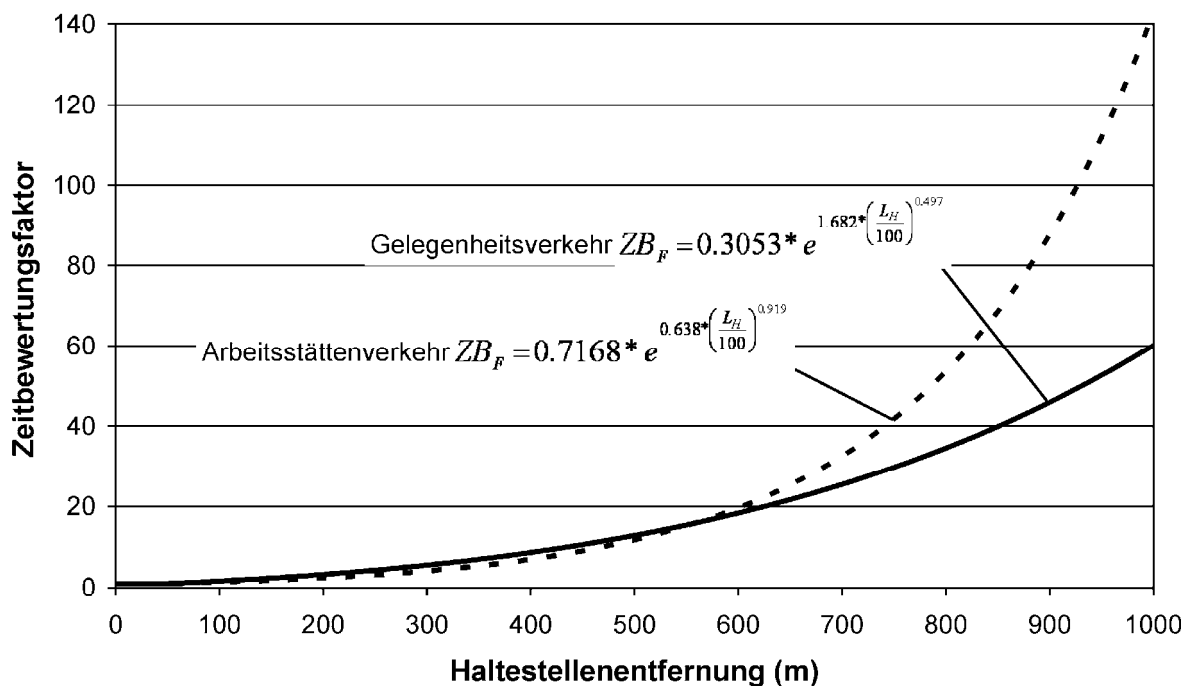


Abbildung 2: Zeitbewertungsfaktor des Zugangsweges zur Haltestelle nach (Walther, 1973b)

Ausgehend von den Arbeiten von Walther untersuchte Morwitzer in seiner Diplomarbeit unter der Anleitung von Prof. Knoflacher die subjektive Bewertung der Wartezeiten im motorisierten Individualverkehr, welche im Zuge der Fahrt von der Quelle zum Ziel auftreten (Morwitzer, 1979). Die Untersuchungen wurden in Wien als Befragungen von Fahrern hinsichtlich der

bereits im Stau verbrachten Zeit durchgeführt. Aus dem Vergleich der subjektiven Angaben mit der physikalischen Zeit wurden zeitliche und räumliche Fehleinschätzungen der Lenker ermittelt. Im Gegensatz zu Walther kommt Morwitzer nicht auf mit steigenden Wartezeiten exponentiell steigende Zeitbewertungsfaktoren sondern auf exponentiell fallende. Ein von ihm dafür angeführtes Argument ist, dass die Lenker mit zunehmender Wartezeit öfter auf die Uhr blicken und daher in der Lage sind, die Zeit genauer zu schätzen. Es ist fraglich, ob die Messmethoden von Walther und Morwitzer direkt vergleichbar sind. Die von Morwitzer ermittelten subjektiven Zeiten müssten mit den ebenfalls erhobenen Zumutbarkeiten verknüpft werden. Seine Einteilung in drei in Klassen ist dafür aber leider nicht geeignet.

In seiner von Prof. Knoflacher betreuten Diplomarbeit untersuchte Peperna den Effekt der Qualität der Gestaltung des Umfelds auf die Empfindung des Zugangs zu Haltestellen (Peperna, 1982). Das Hauptergebnis seiner Arbeit ist, dass im Falle eines attraktiven Umfelds um bis zu 70% längere Entfernung zur Haltestelle akzeptiert werden als in einem unattraktiven Umfeld (Abbildung 4).

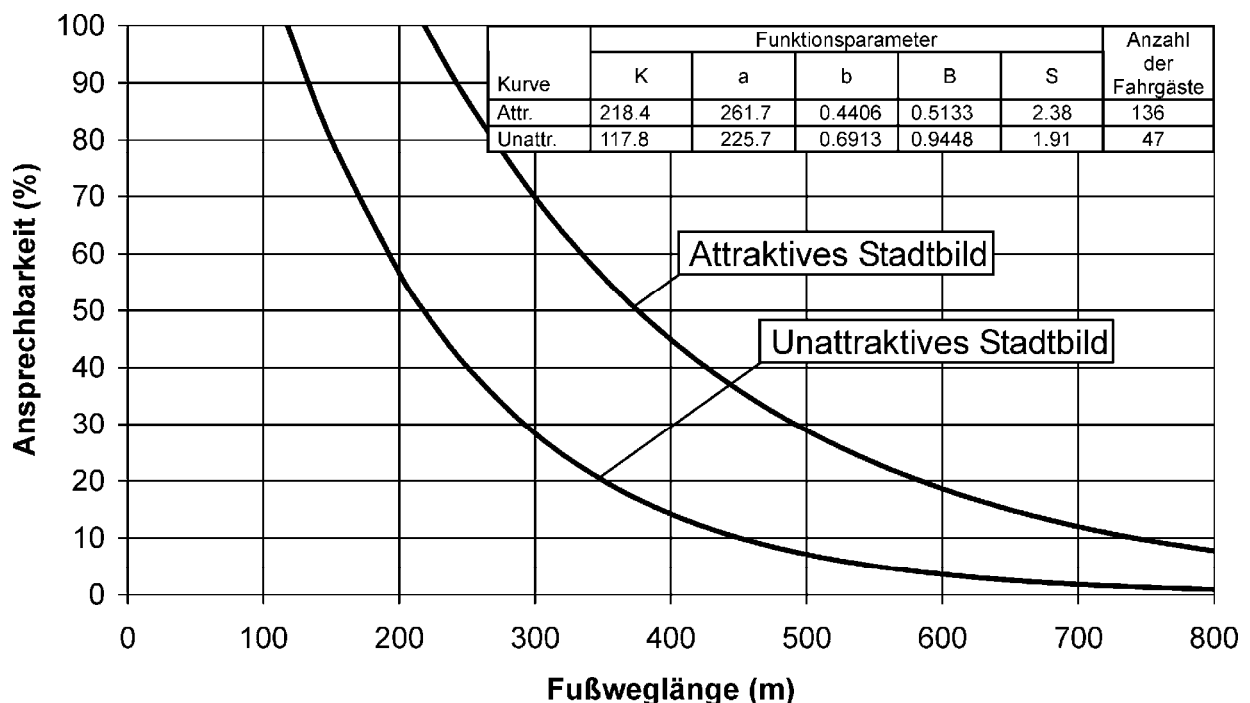


Abbildung 3: Einfluss der Qualität des Umfelds auf die Ansprechbarkeit von Haltestellen nach (Peperna, 1982)

In einer weiteren von Prof. Knoflacher betreuten Diplomarbeit übertrug Thomas Macoun die Methodik von Walther auf den Zugang zum motorisierten Individualverkehr. Er untersuchte für Wien die Akzeptanz der Fußwege zu Parkgaragen und Parkplätzen im öffentlichen Straßenraum (Macoun, 1984). Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse für die Ansprechbarkeit im Arbeitsstättenverkehr.

Alle hier angeführten Arbeiten zeigen, dass verschiedene Wegeteile von den Reisenden unterschiedlich empfunden und bewertet werden. Sie liefern allerdings keine theoretische Erklärung dafür, warum dies durch Exponentialfunktionen geschieht.

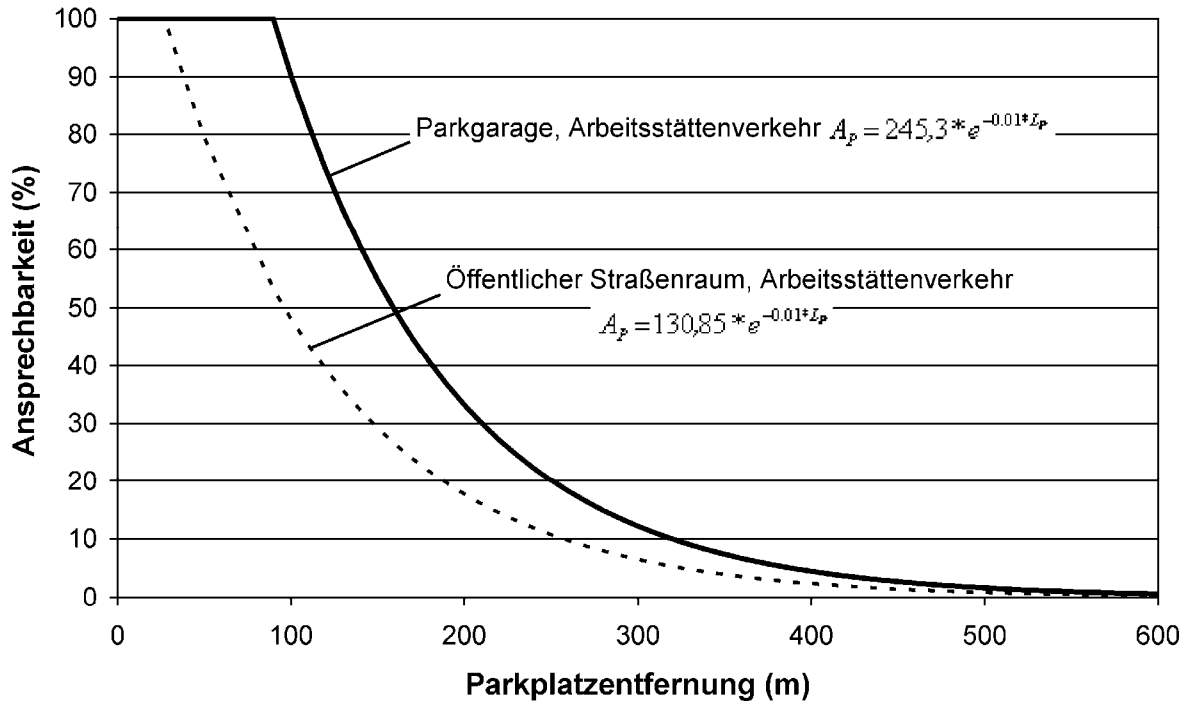


Abbildung 4: Ansprechbarkeit von Parkplätzen in Parkgaragen und im öffentlichen Straßenraum nach (Macoun, 1984)

Die Arbeiten Karl von Frischs und ihre Bedeutung für das Verkehrswesen

Ausgehend von den Arbeiten des Nobelpreisträgers Karl von Frisch erkannte Knoflacher Anfang der 1980er Jahre, dass hinter der Wahrnehmung und Empfindung von Wegeteilen der mit ihnen verbundene physiologische Energieaufwand steht (Knoflacher, 1981; von Frisch, 1965). In dem von Frisch durchgeführten Experiment stehen den Bienen zwei „Verkehrsmittel“ zur Verfügung um eine Nahrungsquelle zu erreichen: sie können fliegen oder sie können durch eine Röhre krabbeln. Der mit den beiden Fortbewegungsarten verbundene physiologische Energieaufwand ist dabei unterschiedlich. Für eine gleich lange Entfernung müssen Bienen etwa 20 mal mehr Energie aufwenden, wenn sie krabbeln anstatt zu fliegen. Krabbeln die Bienen im Experiment 3-4 Meter, dann berichten sie im Stock mit einem Schwänzeltanz, als wären sie 60-80 Meter geflogen. Das bedeutet, das Maß für ihre Empfindung des zurückgelegten Weges entspricht dem investierten Energieaufwand.

Knoflacher schloss aus diesen Experimenten, dass dies auf alle Lebewesen und damit auch den Menschen zuträfe. Damit stellte Knoflacher eine Verbindung zwischen dem Verhalten der Menschen im Verkehrssystem und ihrer evolutionären Prägung her: *Energieminimierung war und ist eines der wesentlichen Auswahlkriterien in der Evolution* (Knoflacher, 1985) S. 82. Die relevante Größe der Verkehrsmittelwahl ist also nicht (nur) die Zeit, sondern der damit verbundene physiologische Energieaufwand. Diese Erkenntnis deckt sich auch mit den Ergebnissen von Walther (Walther *et al.*, 1997). Gehen benötigt mehr Energie als Stehen und Stehen benötigt mehr Energie als Sitzen. Dementsprechend sind die subjektiven Zeitbewertungsfaktoren der Zu- und Abgangswege höher als jene für das Umsteigen (eine

Mischung aus Gehen und Warten). Jene wiederum sind höher als für das Warten (eine Mischung aus Stehen und Sitzen).

Das Weber-Fechnersche Empfindungsgesetz als Grundlage zur Erklärung der subjektiven Zeitbewertung

In der Folge stellte Knoflacher die Verbindung zwischen dem Befund der exponentiellen Bewertung der verschiedenen Wegebestandteile und der theoretischen Grundlage des Weber-Fechnerschen Empfindungsgesetzes her (Knoflacher, 1982). Nach dem Weber-Fechnerschen Empfindungsgesetz ist die Empfindung gleich dem Logarithmus naturalis der Intensität der Reizung (Formel 1).

$$E = \ln(I)$$

Formel 1

Legende:

E Empfindung

I Intensität der Reizung

Nach (Knoflacher, 1982) kann in der Verkehrsplanung der subjektive Widerstand, einen Weg mit einem bestimmten Verkehrsmittel durchzuführen, als die Intensität der Reizung I betrachtet werden. Die Empfindung E wird durch die Länge des Weges, die benötigte Zeit, den physiologischen Energieaufwand und psychologische Faktoren wie Unsicherheitsgefühl und Stress bestimmt. Wie die Versuche von Frisch's in der Interpretation durch Knoflacher gezeigt haben, verrechnen Lebewesen die Entfernungen zurückgelegter Wege mit deren physiologischem Energieaufwand (Knoflacher, 1981; von Frisch, 1965). Wie die Arbeit von Peperna gezeigt hat, spielen beim Menschen aber auch qualitative, psychologische Aspekte eine wesentliche Rolle (Peperna, 1982). Als eine erste Annäherung zur Berücksichtigung sowohl des Energieaufwands als auch psychologischer, stressbedingter Faktoren wurde von Knoflacher die Herzfrequenzrate verwendet. Die Empfindung E kann damit auf folgende Beziehung zurückgeführt werden:

$$E = f(HR, t)$$

Formel 2

Legende:

HR Herzfrequenzrate

t Zeit

Damit lässt sich das Weber-Fechnersche Empfindungsgesetz für die Anwendung im Verkehrswesen wie folgt formulieren:

$$W = e^{f(HR, t)}$$

Formel 3

Legende:

W Widerstand

Mit dieser Formulierung des Weber-Fechnerschen Empfindungsgesetzes liefert Knoflacher eine theoretische Erklärung der von Walther und anderen gefundenen Zusammenhänge zwischen physikalischem Aufwand und subjektiv empfundenem Aufwand:

Eine Detailanalyse der empirisch festgestellten Diskrepanzen zwischen objektiven Planungsgrößen und subjektiven Umsetzmechanismen liefert eine einheitliche Theorie für die Beschreibung des bekannten Widerstandsgesetzes im Verkehrssystem auf der Basis subjektiven Energieverbrauches. Dieser, dem umgekehrten Weber-Fechnerschen Empfindungsgesetz entsprechende Ansatz, ist in der Lage physiologische und psychologische Elemente des Widerstandes theoretisch zu erklären und liefert weiterhin Ansatzpunkte für empirische Forschungen sowohl für die Stadtplanung als auch die Verkehrsorganisation unter einer auch hinsichtlich der Wirkungsmechanismen gleichwertigen Berücksichtigung verschiedener Arten der Verkehrsteilnahme, wie etwa Fußgängerverkehr, motorisierter Individualverkehr und öffentlicher Verkehr. (Knoflacher, 1982) S. 393.

In (Knoflacher, 1985) und (Knoflacher, 1987) wird der Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der Arbeiten von Frischs, der Evolutionstheorie und dem Weber-Fechnerschen Empfindungsgesetz im Detail beschrieben. Die Forschungen auf diesem Gebiet wurden in späteren Jahren fortgeführt und die aufgestellten Hypothesen konnten durch empirische Untersuchungen bestätigt werden (Knoflacher and Gatterer, 1986; Spiegel, 1995).

Anwendung der Erkenntnisse

In Rahmen einer von Prof. Knoflacher betreuten Dissertation wurde das aggregierte, dynamische Flächennutzungs- und Verkehrsmodell MARS (Metropolitan Activity Relocation Simulation) als Kernstück eines Systems zur Beurteilung der Nachhaltigkeit entwickelt (Pfaffenbichler, 2003). Das Modell basiert auf der Hypothese, dass Städte selbst organisierende Systeme sind und daher die Prinzipien von Systems Dynamics und Synergetik zur Beschreibung des kollektiven Verhaltens angewendet werden können (Haken, 1983; Sterman, 2000). Aufbauend auf Wiener Forschungsergebnissen wurde zuerst ein qualitatives Modell erstellt. Dabei kam die Methode der Causal-Loop-Diagramme zur Anwendung. Auf dieser Basis wurde ein quantitatives Modell entworfen und in Computercode transformiert. Dabei wurden Widerstandsfunktionen entsprechend den in den vorangehenden Kapiteln beschriebenen Prinzipien verwendet.

Das erste operationale MARS Modelle wurde für die Stadt Wien erstellt. Um die Erklärungskraft des Modells zu beurteilen, wurde mit dem kalibrierten Modell ein umfangreiches Testprogramm unter Verwendung von Daten der Periode 1981 bis 2001 durchgeführt. In der Folge wurde das Modell in Projekten zur Bearbeitung unterschiedlichster Fragestellungen verwendet (Pfaffenbichler, 2008; Pfaffenbichler *et al.*, 2008; Shepherd *et al.*, 2008). Derzeit existieren MARS Modelle von zehn europäischen Stadtregionen (Bari, Edinburgh, Gateshead, Helsinki, Leeds, Madrid, Oslo, Stockholm, Trondheim und Wien) sowie von drei asiatischen Stadtregionen (Chiang Mai, Hanoi und Ubon Ratchathani). Ein Modell der brasilianischen Stadt Port Alegre ist in Bearbeitung. Ein Modell von Cork, Irland, und ein Modell von Ho Chi Minh City, Vietnam, sind in Vorbereitung.

Zusammenfassung

Ende der 1960er Jahre - Anfang der 1970er Jahre wurde in der Verkehrswissenschaft erkannt, dass unterschiedliche Wegeteile von den Reisenden unterschiedlich empfunden und bewertet werden (Walther, 1973a; b). Dabei ergaben sich immer wieder Exponentialfunktionen als subjektive Zeitbewertung (Macoun, 1984; Walther, 1973a; b). Ausgehend von den Arbeiten des Nobelpreisträgers Karl von Frisch erkannte Prof. Knoflacher Anfang der 1980er Jahre, dass die treibende Komponente bei der Bewertung von Teilwegen weniger die Zeit als vielmehr der physiologische Energieaufwand ist (Knoflacher, 1981; von Frisch, 1965). Etwa zeitgleich gelang ihm durch die Verknüpfung mit dem Weber-Fechnersche Empfindungsgesetz eine theoretische Begründung für das Auftreten der Exponentialfunktion (Knoflacher, 1982). Dadurch konnte er die Beschreibung des menschlichen Verhaltens im Verkehrssystem auf ein fundamentales physiologisches Gesetz zurückführen. Praktische Bedeutung haben diese Erkenntnisse unter anderem in der Entwicklung dynamischer, integrierter Flächennutzungs- und Verkehrsmodelle gewonnen (Pfaffenbichler, 2003).

Literatur

- Haken, H. (1983). *Erfolgsgeheimnisse der Natur - Synergetik: Die Lehre vom Zusammenwirken*, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart.
- Knoflacher, H. (1981), "Human Energy Expenditure in Different Modes: Implications for Town Planning." **International Symposium on Surface Transportation System Performance**.
- Knoflacher, H. (1982). "Zum Problem der subjektiven Widerstände in Transportsystemen." **Internationales Verkehrswesen** 34 (6), 391-393.
- Knoflacher, H. (1985). *Katalysatoren für Nichtmotorisierte*, Verlag Professor Hermann Knoflacher, Wien.
- Knoflacher, H. (1987). *Verkehrsplanung für den Menschen*, Wirtschaftsverlag Dr. Anton Orac, Wien.
- Knoflacher, H., and Gatterer, W. (1986). "Untersuchung des spezifischen Energieverbrauchs einzelner Verkehrsteilnehmer." Forschungsarbeit im Auftrag des Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung und des Bundesministeriums für Bauten und Technik, Wien.
- Macoun, T. (1984). "Zugangszeiten zu Parkplätzen." Diplomarbeit am Institut für Verkehrsplanung, Univ. Prof. Dipl. Ing. Dr. H. Knoflacher, Technische Universität Wien, Wien.
- Morwitzer, P. (1979). "Objektive und subjektive Wartezeiten im Individualverkehr." Diplomarbeit, Univ. Prof. Dipl. Ing. Dr. H. Knoflacher, Institut für Verkehrsplanung, Technische Universität Wien, Wien.
- Peperna, O. (1982). "Die Einzugsbereiche von Haltestellen öffentlicher Nahverkehrsmittel im Straßenbahn- und Busverkehr." Diplomarbeit, Univ. Prof. Dipl. Ing. Dr. H. Knoflacher, Institut für Verkehrsplanung, Technische Universität Wien.
- Pfaffenbichler, P. (2003). "The strategic, dynamic and integrated urban land use and transport model MARS (Metropolitan Activity Relocation Simulator) - Development, testing and application." Doctoral thesis, Institute for Transport Planning and Traffic Engineering, Vienna University of Technology, Vienna.

- Pfaffenbichler, P. (2008). MARS - Metropolitan Activity Relocation Simulator - A Systems Dynamics based Land Use and Transport Interaction Model, Verlag Dr. Mueller, Saarbruecken.
- Pfaffenbichler, P., Emberger, G., and Shepherd, S. (2008). "The Integrated Dynamic Land Use and Transport Model MARS." **Journal of Networks and Spatial Economics** (8), 183-200.
- Shepherd, S., Pfaffenbichler, P., Martino, A., Fiorello, D., and Christidis, P. (2008). "The Effect of Oil Prices on Transport Policies for Europe." **International Journal of Sustainable Transportation** 2 (1), 19-40.
- Spiegel, T. (1995). Die Empfindung des Widerstandes von Wegen unterschiedlicher Verkehrsmittelbenützung und deren Auswirkung auf das Mobilitätsverhalten, **Beiträge zu einer ökologisch und sozial verträglichen Verkehrsplanung**, Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik, Technische Universität Wien, Wien.
- Sterman, J. D. (2000). Business Dynamics - Systems Thinking and Modeling for a Complex World, McGraw-Hill Higher Education.
- von Frisch, K. (1965). Tanzsprache und Orientierung der Bienen, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York.
- Walther, K. (1973a). "Die Fußweglänge zur Haltestelle als Attraktivitätskriterium im öffentlichen Personennahverkehr." **Verkehr und Technik** (10, 11), 444-446,480-484.
- Walther, K. (1973b). "Nachfrageorientierte Bewertung der Streckenführung im Öffentlichen Personennahverkehr." Dissertation, Professor Dr.-Ing. H. Nebelung and Professor E. Kühn, Fakultät für Bauwesen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen.
- Walther, K. (1975). "Die fahrzeitäquivalente Reisezeit im öffentlichen Personennahverkehr." **Verkehr und Technik** (7), 271-275.
- Walther, K., Oetting, A., and Vallée, D. (1997). Simultane Modellstruktur für die Personenverkehrsplanung auf der Basis eines neuen Verkehrswiderstands, **Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen**, 52, Aachen.