

AKTUALISIERUNG UND ERWEITERUNG VON PLANSPIELANSÄTZEN IM VERKEHRSWESEN IM HINBLICK AUF DIE ERSTELLUNG VON MOBILITÄTSSPIELEN

Forschungsprojekt

gefördert durch das Bundesministerium
für Bildung und Forschung (BMBF)

Förderkennzeichen 19 K 9801 4

- Schlussbericht -

**PROFESSUR VERKEHRSPLANUNG
UND VERKEHRSTECHNIK**

**Bauhaus-
Universität
Weimar**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulrich Brannolte
Dr.-Ing. Wolfram Griesbach
Dipl.-Ing. Raimo Harder
Dipl.-Ing. Thomas Kraus

Bauhaus-Universität Weimar
Fakultät Bauingenieurwesen
Professur Verkehrsplanung und Verkehrstechnik

Forschungsprojekt

**AKTUALISIERUNG UND ERWEITERUNG VON
PLANSPIELANSÄTZEN IM VERKEHRSWESEN
IM HINBLICK AUF DIE ERSTELLUNG VON
MOBILITÄTSSPIELEN**

Auftraggeber: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Bonn

Projektträger: TÜV Rheinland Sicherheit und Umweltschutz GmbH, Köln

Auftragnehmer: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulrich Brannolte
Professur Verkehrsplanung und Verkehrstechnik
Bauhaus-Universität Weimar

Bearbeitung: Dr.-Ing. Wolfram Griesbach
Dipl.-Ing. Raimo Harder
Dipl.-Ing. Thomas Kraus

Bearbeitungszeitraum: Januar 1998 - Juli 2000

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 19 K 9801 4 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Weimar, Juli 2000

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung.....	1
1.1	Zielstellung	1
1.2	Ausgangssituation.....	1
1.3	Konzeption	3
2	Wirkungsmodell.....	4
2.1	Methodisches Vorgehen	4
2.2	Variablen	6
2.3	Qualitative Beschreibung der Wirkungsbeziehungen.....	9
2.4	Quantitative Beschreibung der Wirkungsbeziehungen	12
2.4.1	Überblick	12
2.4.2	Beziehungen mit Prozesscharakter	13
2.4.2.1	Abbildung der Beziehungen	13
2.4.2.2	Zusammenfassung und Darstellung der Beziehungen.....	20
2.4.3	Beziehungen mit Wichtung.....	21
2.4.3.1	Abbildung der Beziehungen	21
2.4.3.2	Zusammenfassung und Darstellung der Beziehungen.....	23
2.4.4	Beziehungen mit Wichtung unter Berücksichtigung von Haupt- und Nebenquellvariablen	23
2.4.4.1	Abbildung der Beziehungen	23
2.4.4.2	Zusammenfassung und Darstellung der Beziehungen.....	25
2.4.5	Sonstige Wirkungsbeziehungen	25
2.4.5.1	Verkehrsmittelspezifische Kostenkomponenten.....	26
2.4.5.2	Neue Mobilitätskonzepte	28
2.4.5.3	Weitere Berechnungsansätze	28
2.5	Funktionsweise	30
2.6	Validierung	32
3	Gesamtmodell MOBILITY.....	37
3.1	Modellstruktur	37
3.2	Eingriffsmöglichkeiten des Spielers.....	38
3.3	Teilmodelle	38
3.3.1	Verkehrsnachfragemodell	38
3.3.2	Verkehrsumlegungsmodell.....	39
3.3.3	Weitere Teilmodelle.....	40
3.4	Zusammenwirken der Teilmodelle	41
3.4.1	Schnittstellen.....	41
3.4.2	Zeitmodellierung und Simulationsablauf.....	42
3.5	Indikatoren	42
4	Zusammenfassung und Ausblick	43
	Literaturverzeichnis.....	44

Anlagen

Anlage V:	Variablen des Wirkungsmodells.....	1-9
Anlage M:	Wirkungsmatrix	1-6
Anlage G:	Wirkungsgefüge	1
Anlage B:	Wirkungsbeziehungen (Übersicht).....	1-8
Anlage B1:	Beziehungen Typ B1: Formulare.....	1-13
	Grafiken	14-26
Anlage B2a:	Beziehungen Typ B2a: Formulare.....	1-9
	Grafiken	10-12
Anlage B2b:	Beziehungen Typ B2b: Formulare.....	1-9
	Grafiken	10-12
Anlage B3:	Beziehungen Typ B3: Formulare.....	1-11
	Tabellen	12-14
Anlage P:	Validierung des Wirkungsmodells (Auszug)	1-7
Anlage N:	Parameter des Verkehrsnachfragemodells.....	1-2

Abbildungen

Abb. 2.1:	Ausschnitt der Wirkungsmatrix.....	10
Abb. 2.2:	Ausschnitt des Wirkungsgefüges	11
Abb. 2.3:	Veränderung des Zielvariablenwertes ΔZ (Motorisierungsgrad) unter Berücksichtigung verschiedener Wirkungsfaktoren.....	14
Abb. 2.4:	Veränderung des Zielvariablenwertes ΔZ (Motorisierungsgrad) unter Berücksichtigung des Verlaufs der Wirkungsfunktion (Exponent n)	15
Abb. 2.5:	Veränderung des Zielvariablenwertes ΔZ (Motorisierungsgrad) unter Berücksichtigung verschiedener aktueller Zielvariablenwerte Z_{akt}	16
Abb. 2.6:	Übergangsfunktionen $f_T(t)$	18
Abb. 2.7:	Beispiel einer Wirkungskette	31
Abb. 2.8:	Einzelursachen und ihre Wirkungen.....	34
Abb. 2.9:	Bestimmung der Initialisierungswerte.....	35
Abb. 3.1:	Modellstruktur der Verkehrssimulation MOBILITY	37
Abb. 3.2:	Screenshot der Verkehrssimulation MOBILITY	38

Tabellen

Tab. 2.1:	Übergangsfunktionen $f_T(t)$	19
Tab. 3.1:	Auswahl wichtiger Bilanzierungspositionen des Finanzmodells.....	40
Tab. 3.2:	Indikatoren zur Bewertung des Spielers	42

1 Einführung

1.1 Zielstellung

Das vorliegende Forschungsprojekt ist eingebettet in die Mobilitätsforschungsinitiative des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) „Mobilität und Verkehr besser verstehen“. Zielstellung des Projekts ist die Entwicklung eines Modellansatzes zur Simulation mobilitätsbezogener Wirkungszusammenhänge auf verkehrswissenschaftlicher Basis. Dabei wird auf Grundlage des vorhandenen Planspiels *PLUS* eine fachlich fundierte Aktualisierung und inhaltliche Erweiterung um neue Komponenten und eine weitgehende technische und inhaltliche Anpassung von Spielkomponenten im Hinblick auf den Einsatz in multimedialfähigen, auf unterschiedliche Personenkreise ausgerichteten Mobilitätsspielen vorgenommen. Aufgrund der geplanten Modulstruktur ist dieser Ansatz entwicklungs- und anpassungsfähig für weitere Problemstellungen.

Die Komponenten werden einerseits als eigenständiges Modell implementiert, um eine Testbasis für die erarbeiteten Wirkungszusammenhänge zu erhalten. Damit ist auch eine Operabilität für Anwendungsfälle möglich, bei denen der Schwerpunkt auf der Modellierung komplexer Wirkungszusammenhänge liegt und multimediale Elemente von untergeordneter Bedeutung sind. Die entwickelten Komponenten lassen sich andererseits aber auch in die multimedialfähige Oberfläche eines Mobilitätsspiels einbinden. Dies wird mit der Entwicklung des Verkehrssimulationsspiels *MOBILITY* gezeigt, das von der Glamus GmbH, Bonn, unter maßgeblicher Mitwirkung der Bauhaus-Universität Weimar in einem parallel laufenden Projekt, unter Integration der hier gewonnenen Erkenntnisse, entwickelt wird.

1.2 Ausgangssituation

In verschiedenen Disziplinen, insbesondere in den Wirtschaftswissenschaften, sind spezielle didaktische Verfahren auf hohem Stand entwickelt und im Einsatz, um Entscheidungsstrategien zu trainieren, Erfahrungswissen aufzubauen und Verhaltensweisen unter unterschiedlichen Aspekten und Randbedingungen zu sensibilisieren. Diese Verfahren lassen sich als interaktive Lernverfahren klassifizieren; dazu gehören Fallstudien, Rollenspiele und Planspiele. Kennzeichnendes Merkmal ist, dass ein modellhaftes „virtuelles“ Umfeld bereitgestellt wird (in der Betriebswirtschaft bspw. eine Firma, im Verkehrswesen bspw. eine Stadt) und dass der Spieler einen definierten Entscheidungsraum und die Wahl von Verhaltensoptionen zur Verfügung hat, mit denen er auf das Modell einwirken kann und somit den Ablauf des Geschehens gewissermaßen in seinem Sinne zu steuern vermag.

Der Spieler ist Erlebnisträger darüber, wie sich beispielsweise der Verkehr in der modellierten Stadt entwickelt und gleichzeitig Entscheidungsträger für die von ihm realisierbaren Maßnahmen sowie für von ihm vorgebbare Verhaltensweisen simulierter Personen. Didaktisch wichtig ist dabei, dass der Spieler, in der Regel „einfache“ Einzelentscheidungen (z. B. über Fahrpreisveränderungen) fällt, aber mit der Reaktion eines komplexen vernetzten Systems mit vielfachen Rückkopplungen und gegenseitigen Abhängigkeiten konfrontiert wird. Weiterhin ist didaktisch von Bedeutung, dass bestimmte Entscheidungen in der Realität häufig erst nach Jahren Auswirkungen zeigen, der Spieler aber im Planspiel quasi wie im Zeitraffer mit langfristigen Konsequenzen seines Handelns konfrontiert wird. Erfahrungen, die der Spieler aus der Anwendung des Planspiels schöpft, können und sollen sich

auf sein eigenes Verhalten und Handeln auswirken (z. B. umweltbewussteres Verhalten) und das fachliche und politische Verständnis des Spielers für komplexere Zusammenhänge stärken.

Der Einsatz von Planspielen aus den Fachbereichen Verkehrswesen und Raumplanung erfordert die Modellierung und Quantifizierung von vergleichsweise sehr komplexen Zusammenhängen. Dementsprechend gibt es bisher nur wenige Ansätze und zur Anwendungsreife gebrachte Modelle.

Darüber hinaus haben sich die Aufgaben im Verkehrswesen im Vergleich zu den 70er- und 80er-Jahren stärker differenziert. Der Handlungsbereich hat sich auf technische, betriebliche, organisatorische und verhaltensbezogene Maßnahmen ausgeweitet, so dass auch die Anforderungen an die Modellierung des Verkehrs entsprechend gestiegen sind. Zukunftsorientierte Verkehrsmodelle sollten deshalb möglichst mehrere Lösungsansätze bzw. alternative Handlungsstrategien präsentieren können (Entwicklung von Szenarien).

Gleichzeitig haben sich die Möglichkeiten der Computertechnologie hinsichtlich deren Verfügbarkeit, Vernetzung und Leistungsfähigkeit vervielfacht. Auch in diesem Zusammenhang ergeben sich neue Randbedingungen für Modelle.

Um diesen Ansprüchen Rechnung zu tragen und komplexe Zusammenhänge bei Verhaltensstrukturen und Planungsprozessen transparenter vermitteln zu können, wurde Anfang der 70er-Jahre begonnen, sogenannte *Planspiele* zu entwickeln, die im Simulationskern Verkehrsmodelle enthalten. Diese pädagogischen und didaktischen Modelle haben bisher die Aufgabe, Auszubildenden im Fachgebiet Verkehrswesen und verwandter fachlicher Disziplinen eine realitätsnahe Planungs- und Entscheidungserfahrung zu vermitteln und fachfremden Personenkreisen Auswirkungen verkehrsplanerischer Entscheidungen näher zu bringen.

Wilson [Wils70] lieferte dazu einen theoretischen Entropieansatz mit den Lowry-Modellen (Verbindung räumlicher Verteilungen von Population, Arbeit und Einzelhandel mit Aspekten der Raumnutzung), die Grundlage vieler Raumnutzungsmodelle sind.

Integrierte Verkehrs- und Raumnutzungsmodelle sind operative Modelle, die die herkömmlichen Verkehrsmodelle entscheidend ergänzen und es letztlich erlauben, mögliche Auswirkungen von Maßnahmen in einem einheitlichen, theoretisch konsistenten Rahmen über einen weiten Zeitraum zu simulieren. Die Abgrenzung zu reinen Verkehrsmodellen besteht in einem interdisziplinären Ansatz.

Ein erstes, sehr aufwendig entwickeltes derartiges Planspielmodell ist *GUTS* (Game of Urban Transport System) [Will80]. Weiterentwickelt und auf deutsche Verhältnisse angepasst, ist es im universitären Bereich als Modell *PLUS* (Planspiel urbaner verkehrlicher Systeme) [Bran92] bekannt geworden.

Das Planspielmodell *PLUS* repräsentiert eine stark idealisierte Stadt unter besonderer Berücksichtigung der Verkehrssysteme Pkw (IV) und Bus (ÖV). Die vorgenommenen Vereinfachungen betreffen die Verkehrsmodellierungen, insbesondere die Verkehrserzeugung, sowie die geographische Lage, Verteilung der Arbeitsstätten und Wohngebiete ebenso wie den ÖPNV und das Straßennetz. Der Benutzer soll Erfahrungen mit der simulierten Umgebung gewinnen, die das Modell vermittelt, indem er mit Entscheidungsfindungsprozessen zu experimentieren hat. Durch eine Reihe von Systemparametern kann dabei in das Verkehrsmanagement eingegriffen werden. Das Programm berechnet die Auswirkungen der von den Spielern getroffenen Entscheidungen, die unterschiedliche Bereiche beeinflussen und für den Spieler am Ende eines Simulationsabschnittes (hier: 1 Jahr) sichtbar werden.

Seit Mitte der 90er Jahre existiert eine angelsächsische Weiterentwicklung von *GUTS* unter dem Namen *PLUTO* (Planning Urban Transport Options) [Bons94]. Eine weitere Entwicklungslinie wurde mit der didaktischen Aufbereitung des bekannten 4-Stufen-Algorithmus verfolgt. Hier existiert der

Ansatz *MOBIT* [Albr94]. Alle genannten Spiele enthalten keine Multimedia-Komponenten. Dies liegt einerseits an ihrem vorgesehenen Einsatzgebiet, andererseits aber auch an der Zeit ihres Entstehens. Darüber hinaus werden bestimmte verkehrliche Inhalte auch in kommerzielle Produkte, vornehmlich Computerspiele integriert (z. B. SimCity, Siedler, VerkehrsGigant). Es gibt aber kein derartiges Spiel, das Zusammenhänge aus dem Bereich Mobilität und Verkehr auf fundierter wissenschaftlicher Basis aufzeigt.

1.3 Konzeption

Kern des Vorhabens ist die Erarbeitung eines Modellansatzes zur Abbildung mobilitätsbezogener Wirkungszusammenhänge auf verkehrswissenschaftlicher Basis. Das in diesem Rahmen entwickelte Wirkungsmodell wird im Kapitel 2 beschrieben. Die wissenschaftlichen Arbeitsziele sind dabei gekennzeichnet durch die Definition und qualitative Ableitung der Wirkungsketten, d. h. die Erstellung des Wertegerüsts (Abschnitt 2.2 und 2.3), die Quantifizierung der erfassten Wirkungszusammenhänge, d. h. die Erstellung des Mengengerüsts (Abschnitt 2.4) und die Validierung des erstellten Wirkungsmodells (Abschnitt 2.6), sowohl als eigenständiges Modell, als auch als Teilmodell innerhalb des Verkehrssimulationsspiels MOBILITY.

Das gesamte Instrumentarium zur Implementierung eines Mobilitäts-Planspiels umfasst neben dem Wirkungsmodell weitere Teilmodelle (Verkehrsnachfrage, Verkehrsumlegung etc.). Ausführungen zu diesen Teilmodellen, der Einordnung des Wirkungsmodells in die gesamte Modellstruktur, der Ausgestaltung der Schnittstellen zwischen den einzelnen Teilmodellen sowie zur Gesamtkonzeption des Verkehrssimulationsspiels MOBILITY enthält Kapitel 3.

2 Wirkungsmodell

In diesem Kapitel wird das methodische Vorgehen zur Entwicklung des Wirkungsmodells erläutert. Die einzelnen Elemente des Modells und ihr Zusammenwirken, d. h. die Ableitung der Wirkungsketten und deren Quantifizierung wird vorgestellt. Das Kapitel schließt mit einigen Aspekten zur Implementierung und Validierung des Wirkungsmodells.

2.1 Methodisches Vorgehen

Mit Hilfe des Wirkungsmodells werden Auswirkungen von Maßnahmen des Verkehrsmanagements, der Einfluss preispolitischer Instrumente sowie die Nutzerpotentiale neuer Mobilitätskonzepte (Entscheidungsrahmen des Spielers) im Hinblick auf die Beeinflussung bestimmter Zielgrößen, wie bspw. Motorisierung, Mobilität und Modal Split, auf makroskopischer Ebene abgebildet.

Ausgangspunkt der Erarbeitung des Wirkungsmodells ist die Definition der Einflussmöglichkeiten des Spielers, die die **Startpunkte der Wirkungsketten** (sog. Initialzündungen) darstellen. Diese können drei inhaltlichen Ebenen zugeordnet werden, die sich am Entscheidungsrahmen der entsprechenden Personengruppen (Entscheidungsträger) in der Realität orientieren. Diese Entscheidungsebenen umfassen folgende Einflussmöglichkeiten:

- politische Rahmenbedingungen
 - Steuern
 - Forschungsaktivitäten
 - Öffentlichkeitsarbeit
- Verkehrsplanung und Verkehrsmanagement
 - Infrastrukturaufbau
 - Verkehrs- und Parkleitsysteme
 - Lichtsignalanlagen, ÖPNV-Priorisierung
- Mobilitätsdienstleistungen
 - Öffentlicher Personennahverkehr
 - Neue Mobilitätskonzepte (Routenführungssysteme, Carsharing etc.)

Die **Endpunkte der Wirkungsketten** werden im wesentlichen durch die Variationsmöglichkeiten der Verkehrsplanungsmodelle bestimmt. Die Endpunkte der Wirkungen sind also diejenigen Reaktionen, die im Verkehrsnachfragemodell als Variable implementiert sind und denen im Hinblick auf die vorgesehenen Einflussmöglichkeiten (s. o.) ein hohes Veränderungspotential zugeschrieben werden kann (Modal Split, Motorisierungsgrad etc.). Das Bewertungsmengengerüst (hier: Spielindikatoren) und damit verbunden auch die (für den Spieler sichtbaren) Auswirkungen bestimmter Entscheidungen auf das Verkehrsgeschehen bauen damit auf den Ergebnissen der Verkehrsplanungs- und Bewertungsmodelle auf.

Beispielsweise ergibt sich im Wirkungsmodell aus einer Erhöhung der Mineralölsteuer eine Steigerung der MIV-Betriebskosten, damit wird die Kostendifferenz zwischen MIV und ÖPNV größer und die Attraktivität des MIV gegenüber dem ÖPNV sinkt, woraus eine Veränderung des Modal Split zuungunsten des MIV resultiert. Über die Modellstufen Verkehrsnachfrage und Verkehrsumlegung führt dies zu einer Verringerung der Verkehrsbelastungen auf den Straßen; was sich in der Bewertung (des Spiels) aufgrund der geringeren Lärm- und Schadstoff- Emissionen positiv bemerkbar macht.

Die **Ableitung der einzelnen Wirkungsketten** erfolgt beobachtend (mit Hilfe der Statistik) oder hypothetisch (Formulierung als plausible Hypothese). Die Forderung, die Untersuchungsfragen auf hoher Abstraktionsebene zu beantworten und der geringe Stand quantitativer Erfahrungen hinsichtlich bestimmter Maßnahmen (bspw. Nutzerpotentiale für neue Mobilitätskonzepte) bringen es mit sich, das für die vielen Modellvariablen die Wirkungsketten in hypothetischer Form abgeleitet werden. Die Plausibilisierung der Berechnungsannahmen, d. h. die Diskussion der quantitativen Abhängigkeiten, erfolgte dabei durch einen Expertenkreis (*Arbeitsgruppe Simulation* im Rahmen des *Projektes MOBILITY*). Diesem Expertenkreis gehörten an: BMBF, TÜV Rheinland (Projektträger), Bauhaus-Universität Weimar sowie die beteiligten externen MOBILITY-Projektpartner DaimlerCrysler, Verkehrsverbund Rhein-Ruhr und der Rhein-Main Verkehrsverbund. Die Festlegung aller Modellparameter erfolgte dabei in einem mehrstufigen Prozess:

- interne Diskussion im Mitarbeiterkreis an der Bauhaus-Universität Weimar
- Vorstellung der Wirkungsbeziehungen im Rahmen der Arbeitsgruppe Simulation
- Rückmeldungen der beteiligten externen Partner
- Abstimmung und Verabschiedung der Wirkungsbeziehungen im Rahmen des *Workshops MOBILITY*

Die Vorgehensweise bei der Entwicklung des Wirkungsmodells, das auf der Methodik des Sensitivitätsmodells nach Vester [Vest90] basiert, soll an dieser Stelle kurz skizziert werden:

- Stand der Wissenschaft
 - Erfassung der Literatur/Software zu Planspieltechniken im Verkehrswesen
 - Erfassung der Literatur zu preispolitischen Instrumenten, Verkehrsmanagement, Mobilität
- Erarbeitung der Modellgrundlagen
 - Sammeln von wesentlichen, für die Zielstellung notwendigen, bilateralen Wirkungszusammenhängen
 - Einteilung der gewählten bilateralen Zusammenhänge nach thematischen Inhalten
- Bestimmung der qualitativen Zusammenhänge einzelner Wirkungsbeziehungen (Wertegerüst)
 - Beschreibung der Variablen
 - Auflistung der bilateralen Beziehungen in einer Wirkungsmatrix
 - Kennzeichnung der Wirkungsrichtung innerhalb der Matrix
 - Festlegung der vom Spieler steuerbaren Variablen
- Bestimmung der quantitativen Abhängigkeiten der Wirkungsbeziehungen (Mengengerüst)
 - Festlegung der Grenzen aller Variablen
 - Bestimmung von Initialisierungswerten für alle Variablen
 - Einteilung der Wirkungsbeziehungen in verschiedene Beziehungstypen
 - Algorithmische Modellierung der Beziehungstypen
 - Bestimmung der Einflussparameter hinsichtlich Wichtung und zeitlichem Verlauf
- Implementierung des Wirkungsmodells
 - Auswahl einer geeigneten Modellierungsmethode
 - Auswahl eines geeigneten Modellierungstools, das eine Zeitkomponente enthält
 - Implementierung des Simulationsmodells
- Entwicklung von Werkzeugen zur Ein- und Ausgabe von Daten
 - Komfortable Eingabe von steuerbaren Variablen
 - Datenimport von MOBILITY
 - Datenexport zur grafischen Ergebnisauswertung

- Validierung des Wirkungsmodells (PACE-Implementierung)
 - Konsistenztest des Gesamtsystems
 - Test des Einflussbereiches und der Wirkungstiefen von Einzelursachen
 - Gegenüberstellung des tendenziellen Verhaltens von Einzelursachen und deren Wirkungen
 - Untersuchungen zum Grenzverhalten einzelner (Ziel-)Variablen
 - Überprüfung von Verhaltenshypothesen
- Test des in MOBILITY implementierten Wirkungsmodells
 - Vorgehensweise wie bei der Validierung des in PACE implementierten Wirkungsmodells
 - Vergleich der Ergebnisse mit der PACE-Implementierung

Nachdem die methodische Vorgehensweise zur Entwicklung des Wirkungsmodells vorgestellt wurde, zeigen die folgenden Ausführungen dessen Aufbau und Funktionsweise im Detail.

Das Wirkungsmodell ist aus verschiedenen Elementen aufgebaut: den **Variablen**, den **Wirkungsbeziehungen** (Verknüpfungen zwischen Variablen) sowie den **Schnittstellen** zu anderen Teilmodellen (externe Verknüpfungen: Verkehrsnachfrage, Verkehrsumlegung etc.). Die einzelnen Variablen des Wirkungsmodells werden im Abschnitt 2.2 erläutert; die Beschreibung der Wirkungsbeziehungen in qualitativer Hinsicht erfolgt im Abschnitt 2.3, in quantitativer Hinsicht im Abschnitt 2.4; zur Integration des Wirkungsmodells in die Modellstruktur der Verkehrssimulation MOBILITY sowie zur Beschreibung der Schnittstellen siehe Kapitel 3.

2.2 Variablen

Grundlage der Entwicklung des Wirkungsmodells ist die Auswahl und Beschreibung eines überschaubaren und trotzdem systemrelevanten Variablensatzes. Eine Variable ist dabei eine veränderliche Einflussgröße zur Beschreibung des Systemzustands des Wirkungsmodells. Die Variablen repräsentieren dabei reale Größen mit unterschiedlichen Einheiten. Das Wirkungsmodell umfasst insgesamt 116 Variablen. Jede Variable wird durch

- den Variablen-Namen,
- die Variablen-Kurzbezeichnung,
- eine inhaltliche Beschreibung
- ggf. eine Einheit,
- die Grenzwerte (Minimum und Maximum) und
- einen Initialisierungswert

charakterisiert. Dabei kann eine Variable u. U. auch als Sammelbegriff für verschiedene unter dem Variablen-Namen zusammengefasste Deskriptoren verstanden werden. Insofern ist die entscheidende Basis für die Festlegung der Grenz- und Initialisierungswerte der einzelnen Variablen (im Rahmen der Quantifizierung der Wirkungsbeziehungen) eine möglichst detaillierte inhaltliche Beschreibung der Variablen. Beispielsweise wird die Variable *Standortkosten Wirtschaft (G8)* durch die Deskriptoren Erschließungskosten, Bodenpreise, Lohnkosten, Kosten für Ver- und Entsorgung und Steuerbelastung beschrieben (siehe hierzu Anlage V mit Bemerkungen zur Variablendefinition).

Entsprechend ihrer inhaltlichen Bedeutung im Wirkungsmodell werden folgende thematische Kategorien für die Variablen-Kurzbezeichnung verwendet:

- Gesellschaft (**G**)
- Finanzen: Einnahmen Stadt (**E**)
- Finanzen: Ausgaben Stadt (**A**)

- Finanzen: Sonstige Kosten (**S**)
- Infrastruktur (**I**)
- Mobilitätskonzepte (**K**)
- Mobilität und Verkehrsnachfrage (**M**)
- Verkehrsumlegung und Umwelt (**U**)

Beispiel:

Variable	<i>Motorisierungsgrad (M7)</i>
Minimum	450 Pkw/1000 Erwachsene
Maximum	800 Pkw/1000 Erwachsene
Initialisierungswert	625 Pkw/1000 Erwachsene

Für einige Variablen genügt zur eindeutigen Beschreibung die Angabe eines Initialisierungswertes. Dieser wird einmalig für das Spiel festgelegt und nicht mehr verändert, stellt also (in der derzeitigen Version des Spiels) eine Konstante dar. Im Regelfall sind dies Variablen zur Beschreibung von Kosten.

Beispiel:

Variable	<i>Anschaffungskosten Pkw (S1)</i>
Minimum	(entfällt)
Maximum	(entfällt)
Initialisierungswert	30.000 DM/Pkw (Mittelwert)

Für Variablen die sich aufgrund ihres globalen Charakters nicht durch konkrete Zahlenwerte, sondern nur qualitativ beschreiben lassen, werden die Grenzwerte verbal angegeben. Dies gilt ebenso für solche Variablen, die mehrere andere Variablen mit verschiedenen Einheiten unter Berücksichtigung eines Wichtungsfaktors zusammenfassen. Bei diesen Variablen sind die Erläuterungen in Anlage V besonders wichtig.

Beispiel:

Variable	<i>Individuelle wirtschaftliche Situation (G1.2)</i>
Minimum	sehr schlecht
Maximum	sehr gut
Initialisierungswert	mittel

Für Variablen, die ihre Werte aus Berechnungen im Teilmodell Infrastruktur erhalten, entfällt die Angabe eines Initialisierungswertes, da dieser durch das Ausgangs-Szenario festgelegt wird. Hier genügt für eine eindeutige Beschreibung die Festlegung der Grenzwerte.

Beispiel:

Variable	<i>Mittlere Zu- und Abgangszeit ÖPNV (U8)</i>
Minimum	4,0 min
Maximum	15,0 min
Initialisierungswert	(aus Infrastrukturmodell)

Für Variablen, die ihre Werte aus Berechnungen im Umlegungs- oder Nachfragemodell beziehen, gilt gleiches; jedoch werden für den ersten Berechnungsschritt des Wirkungsgefüges die Mittelwerte der Variablen angesetzt.

Die Grenzwerte der Variablen (Minimum und Maximum) werden nicht unter- bzw. überschritten. Dieses gewährleisten die Berechnungsansätze nach Abschnitt 2.4. Eine Ausnahme bilden allerdings die Variablen, die ihre Werte aus anderen Teilmodellen (Verkehrsnachfrage, Verkehrsumlegung) beziehen. Die angegebenen Grenzwerte werden dann wie folgt interpretiert:

Werte kleiner als der Minimalwert werden bezüglich ihrer Wirkung wie der Minimalwert behandelt.

Werte größer als der Maximalwert werden bezüglich ihrer Wirkung wie der Maximalwert behandelt.

Beispiel:

Variable	<i>Erschließungsqualität ÖPNV (M11)</i>
Minimum	sehr niedrig
Maximum	sehr hoch
Initialisierungswert	(aus Infrastrukturmodell)

Die Variable *Erschließungsqualität ÖPNV* wird unter anderem durch die o. g. Variable *Mittlere Zu- und Abgangszeit ÖPNV* beeinflusst¹.

- Hat die *Mittlere Zu- und Abgangszeit ÖPNV* einen Wert ≤ 4 min, so ist die *Erschließungsqualität ÖPNV* sehr hoch.
- Hat die *Mittlere Zu- und Abgangszeit ÖPNV* einen Wert ≥ 15 min, so ist die *Erschließungsqualität ÖPNV* sehr niedrig.

Insbesondere Infrastrukturmaßnahmen und Investitionen in neue Mobilitätskonzepte setzen sich im Spiel aus mehreren finanziellen Komponenten zusammen. Dabei finden nicht alle im Wirkungsmodell Berücksichtigung. Beispielsweise setzen sich Investitionen in eine *Mobilitäts-Informationszentrale* (K10) aus folgenden Komponenten zusammen:

- eine einmalige Investition in Gebäude mit technischer Infrastruktur
- laufende, auf die Anzahl der Nutzer bezogenen, Betriebskosten
- Ausgaben für Werbemaßnahmen
- Einnahmen aus Beratungsgebühren

Die Entscheidung des Spielers zum Bau einer Mobilitäts-Informationszentrale beinhaltet also auch die Festlegung der Nutzungsgebühren sowie ggf. die Festlegung der Ausgaben für Werbezwecke. Diese beiden finanziellen Komponenten werden im **Wirkungsmodell** als eine auf die Einwohnerzahl bezogene Größe wie folgt berücksichtigt:

Variable	<i>Mobilitäts-Informationszentrale (K10)</i>
Minimum	0,- DM/Einwohner
Maximum	200,- DM/Einwohner
Initialisierungswert	0,- DM/Einwohner

Die Höhe dieser bezogenen Investitionskosten ist das entscheidende Kriterium zur Berechnung der Nutzeranzahl der Mobilitäts-Informationszentrale und damit für die Größe der Wirkung auf die verknüpften Variablen:

- *Verkehrsmittelwahl ÖPNV (M1)*
- *Verkehrsmittel-Verknüpfung (P+R) (M2)*
- *Mobilität (M6)*

¹ Andere Variablen mit Einfluss auf die *Erschließungsqualität ÖPNV* wurden aus Gründen der Verständlichkeit hier im Beispiel nicht berücksichtigt.

Das **Finanzmodell** berücksichtigt alle o. g. finanziellen Komponenten; entsprechend wird der Stadthaushalt (des Spielers) belastet. Dabei hat er keinen Einfluss auf die Höhe der einmaligen Investition zum Bau des Gebäudes sowie die Höhe der Betriebskosten.

In vergleichbarer Art und Weise werden die anderen Mobilitätskonzepte innerhalb des Wirkungs- bzw. Finanzmodells behandelt. Unterschiedlich sind neben den Variablengrenzwerten insbesondere die Bezugsgrößen für die finanziellen Komponenten:

- Passive Routenführung (K1.1) [DM/Pkw]
- *Aktive* Routenführung (K2.1) [DM/Pkw]
- Stellplatzreservierung (K3.1) [DM/Pkw]
- Parkleitsystem (K4) [DM/Stellplatz]
- ÖPNV-Priorisierung (K5.1) [DM/Kreuzung]
- Subventionen Teleworking (K6.1) [DM/Arbeitsplatz]
- Verkehrsleitsystem (K7) [DM/Kreuzung]
- Personal Travel Assistent (K9.1) [DM/Einwohner]
- Marktunterstützende Maßnahmen Microcar (K12.1) [DM/Microcar]
- Dynamische *Fahrplananzeige* ÖPNV (K13) [DM/Haltestelle]

Zur Beschreibung der Wirkungsbeziehungen werden alle Variablen normiert angegeben. Hierzu wird dem Minimum jeder Variablen der Wert „0“ und dem Maximum jeder Variablen der Wert „1“ zugeordnet. Zwischenwerte werden linear interpoliert. Die Berechnung erfolgt im Regelfall, d. h. mit Ausnahme der Beziehungen Typ B3 (siehe hierzu Abschnitt 2.4.5), mit diesen normierten Werten.

In der Variablenliste (Anlage V) sind die Grenz- und Initialisierungswerte eingetragen (siehe hierzu insbesondere die grau hinterlegten Felder).

2.3 Qualitative Beschreibung der Wirkungsbeziehungen

Entsprechend ihrer Stellung im Netz werden **Quellvariablen** und **Zielvariablen** unterschieden. Unter Quellvariablen einer Beziehung sind Variablen zu verstehen, die andere Variablen beeinflussen; Zielvariablen sind Variablen, die durch andere Variablen beeinflusst werden. Die vernetzte Struktur des Wirkungsmodells bringt es mit sich, dass ein großer Teil der Variablen sowohl Quell-, als auch Zielvariablen sind. Ausnahmen sind die vom Spieler beeinflussbaren Größen, d. h. die **steuerbaren Variablen** (diese stehen am Anfang von Wirkungsketten und sind insofern ausschließlich Quellvariablen) sowie einige Schnittstellen-Variablen zum Verkehrsnachfragemodell (diese sind nur Zielvariablen).

Die Bestimmung der qualitativen Zusammenhänge der einzelnen Wirkungsbeziehungen ist durch folgende Schwerpunkte gekennzeichnet:

- Festlegung der vom Spieler steuerbaren Variablen
- Festlegung der Schnittstellen zu anderen Teilmodellen
- Auflistung der bilateralen Beziehungen in einer Wirkungsmatrix
- Kennzeichnung der Wirkungsrichtung innerhalb der Matrix

Bei der Erstellung der quadratischen Matrix und der Beurteilung der einzelnen Wirkungen werden ausschließlich **direkte Abhängigkeiten** berücksichtigt, um fehlerhafte Beurteilungen infolge der Überlagerung mehrerer indirekter Wirkungen zu vermeiden. Zur Operationalisierung im Modell ist es erforderlich, dass der Variablen-Name eine **Richtung** beinhaltet. Nur so ist es möglich, bilaterale Wechselwirkungen zwischen zwei Variablen durch Attribute *mehr* oder *weniger* bzw. *größer* oder *kleiner* zunächst qualitativ zu beschreiben. Beispielsweise verbirgt sich hinter der Variablen

Aufgrund der Vielzahl der identifizierten bilateralen Beziehungen entstehen zahlreiche Wirkungsketten (auch als Prozessketten bezeichnet) und insgesamt ein komplexes Wirkungsnetz. Dabei bilden sich teilweise Ringstrukturen aus, die Ursache für dynamische Rückkopplungen im System sind.

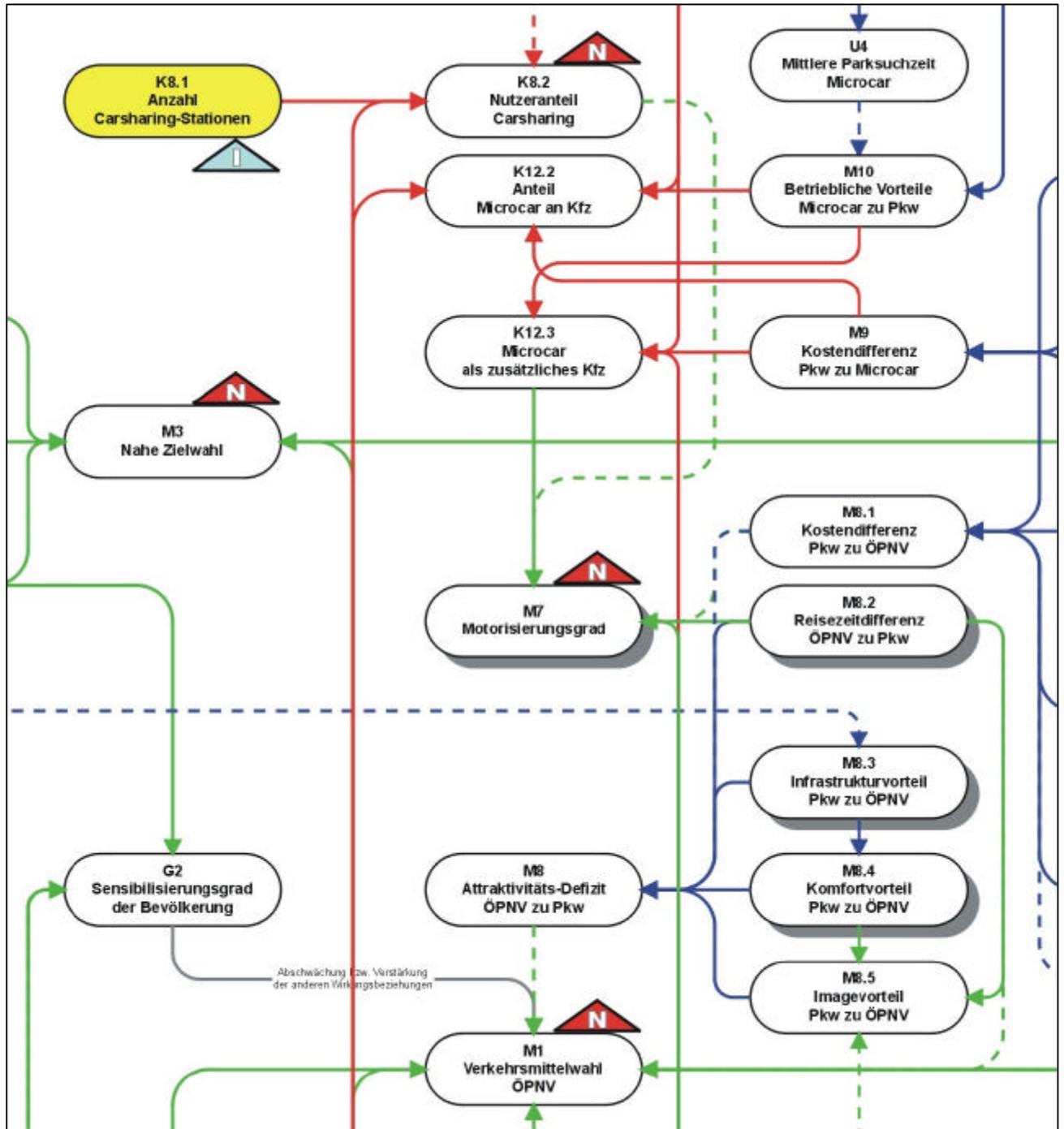


Abb. 2.2: Ausschnitt des Wirkungsgefüges

2.4 Quantitative Beschreibung der Wirkungsbeziehungen

2.4.1 Überblick

Das Systemmodell Wirkungsgefüge umfasst insgesamt **160 Wirkungsbeziehungen**. Jede dieser Wirkungsbeziehungen beschreibt die Abhängigkeit zweier Variablen voneinander. Die Bestimmung der quantitativen Abhängigkeiten der einzelnen Beziehungen ist durch folgende Schwerpunkte gekennzeichnet:

- Bestimmung der Gültigkeitsbereiche der einzelnen Variablen
- Festlegung der Initialisierungswerte für die Variablen
- Algorithmische Modellierung der Wirkungsbeziehungen

Aus Gründen der Operationalisierbarkeit wurden alle Beziehungen hinsichtlich gleich und unterschiedlich abzubildender Charaktermerkmale (Eigenschaften hinsichtlich der Modellierung) untersucht. Nach Art und Weise der Beschreibung der Wirkungsbeziehungen (Art und Weise der Beeinflussung einer Zielvariablen durch die zugehörigen Quellvariablen) werden **4 Beziehungstypen** unterschieden, denen die einzelnen Beziehungen zugeordnet werden:

- B1: Beziehungen mit Prozesscharakter
- B2a: Beziehungen mit Wichtung
- B2b: Beziehungen mit Wichtung unter Berücksichtigung von Haupt- und Nebenquellvariablen
- B3: Sonstige Beziehungen (Beziehungen, die nicht den Typen B1, B2a oder B2b zugeordnet werden können)

Da die Zielvariablen im Regelfall durch mehrere Quellvariablen beeinflusst werden, ist es zweckmäßig, alle Wirkungsbeziehungen, die ein und dieselbe Zielvariable beeinflussen, gleichzeitig zu betrachten. Die folgenden Abschnitte beschreiben die Wirkungsbeziehungen getrennt nach diesen Beziehungstypen. Zuvor folgt hier eine Zusammenstellung der zur quantitativen Beschreibung der Wirkungsbeziehungen **verwendeten Bezeichnungen** (Quell- und Zielvariablenwerte einheitslos):

Quellvariable (Q):

Q_{\min}	minimaler Quellvariablenwert	$Q_{\min} = 0$
Q_{\max}	maximaler Quellvariablenwert	$Q_{\max} = 0$
Q_{init}	Initialisierungswert der Quellvariable	$Q_{\min} \leq Q_{\text{init}} \leq Q_{\max}$
ΔQ_{\max}	max. Veränderung des Quellvariablenwertes ($Q_{\max} - Q_{\min}$)	$\Delta Q_{\max} = \pm 1$
Q_{akt}	aktueller Quellvariablenwert (vor der Berechnung)	$0 \leq Q_{\text{akt}} \leq 1$
Q_{neu}	neuer Quellvariablenwert (nach der Berechnung)	$0 \leq Q_{\text{neu}} \leq 1$
ΔQ	Veränderung des Quellvariablenwertes	$0 \leq \Delta Q \leq 1$
$Q_{\text{gew}_{Q,Z}}$	gewichteter Quellvariablenwert	
$Q_{0\dots}$	Wert einer Haupt-Quellvariablen	

Zielvariable (Z):

Z_{\min}	minimaler Zielvariablenwert	$Z_{\min} = 0$
Z_{\max}	maximaler Zielvariablenwert	$Z_{\max} = 0$
Z_{init}	Initialisierungswert der Zielvariable	$Z_{\min} \leq Z_{\text{init}} \leq Z_{\max}$
ΔZ_{\max}	max. Veränderung des Zielvariablenwertes	$\Delta Z_{\max} = \pm 1$
Z_{akt}	aktueller Zielvariablenwert (vor der Berechnung)	$0 \leq Z_{\text{akt}} \leq 1$
Z_{neu}	neuer Zielvariablenwert (nach der Berechnung)	$0 \leq Z_{\text{neu}} \leq 1$
$\Delta Z(t)$	Veränderung des Zielvariablenwertes, zeitabhängig	$0 \leq \Delta Z(t) \leq 1$

ΔZ_{nom}	Veränderung des Zielvariablenwertes, Nominalwert
$\Delta Z'$	wie ΔZ_{nom} unter Berücksichtigung des Verlaufs der Übergangsfunktion
$\Delta Z''$	wie $\Delta Z'$ unter Berücksichtigung von Z_{akt}

Anm.: In den im Text angeführten Beispielen werden die Bezeichnungen „Q“ für Quellvariable und „Z“ für Zielvariable durch die jeweilige Variablen-Kurzbezeichnung (siehe hierzu Anlage V) ersetzt.

Parameter und Funktionen:

$n_{Q,Z}$	Exponent Wirkungsfunktion	$n_{Q,Z} = [0,5; 1,0; 2,0]$
$f_{W_{Q,Z}}$	Wirkungsfaktor	$f_{W_{Q,Z}} = [0,1; 0,2; 0,3; 0,4; \dots; 0,9; 1,0]$
$f_{A_{Q,Z}}$	Anteilsfaktor	$f_{A_{Q,Z}} = [10\%; 20\%; 30\%; 40\%; \dots; 90\%]$
$f_{E_{Q,Z}}$	Endwert (nach Prozessablauf)	$f_{E_{Q,Z}} = [0\%; 25\%; 50\%; 75\% \text{ v. Maximalwert}]$
$f_{T_{Q,Z}}(t)$	Übergangsfunktion	$0 \leq f_{T_{Q,Z}}(t) \leq 1$
a, b	Koeffizienten der Übergangsfunktionen	
t	Zeit (ZE = Zeiteinheit)	$t = [0 \text{ ZE}; 1 \text{ ZE}; 2 \text{ ZE}; 3 \text{ ZE}; 4 \text{ ZE}; 5 \text{ ZE}; 6 \text{ ZE}]$
$t_{L_{Q,Z}}$	Latenzzeit	$t_{L_{Q,Z}} = [0 \text{ ZE}; 1 \text{ ZE}; 2 \text{ ZE}]$
$t_{D_{Q,Z}}$	Prozessdauer	$t_{D_{Q,Z}} = t_{D1_{Q,Z}} + t_{D2_{Q,Z}} \leq 6 \text{ ZE}$
$t_{D1_{Q,Z}}$	Prozessdauer bis zum Erreichen des Maximalwertes (aufsteigender Ast)	$t_{D1_{Q,Z}} = [0 \text{ ZE}; 1 \text{ ZE}; 2 \text{ ZE}; 3 \text{ ZE}; 4 \text{ ZE}]$
$t_{D2_{Q,Z}}$	Prozessdauer bis zum Erreichen des Endwertes (abfallender Ast)	$t_{D2_{Q,Z}} = [0 \text{ ZE}; 1 \text{ ZE}; 2 \text{ ZE}; 3 \text{ ZE}; 4 \text{ ZE}]$
i	Anzahl der Quellvariablen mit Wirkung auf <i>eine</i> Zielvariable	
j	Anzahl der Neben-Quellvariablen mit Wirkung auf <i>eine</i> Zielvariable	

2.4.2 Beziehungen mit Prozesscharakter

2.4.2.1 Abbildung der Beziehungen

Die Beschreibung der Wirkungsbeziehungen vom Typ B1 folgt dem Prinzip:

Die Veränderung eines Quellvariablenwertes um ΔQ bewirkt eine Veränderung des Zielvariablenwertes um ΔZ .

Der neue Wert einer Zielvariablen Z_{neu} ergibt sich aus ihrem aktuellen Wert Z_{akt} und der Veränderung des Zielvariablenwertes über die Zeit $\Delta Z(t)$.

$$Z_{\text{neu}} = Z_{\text{akt}} + \Delta Z(t) \quad (1)$$

Den entscheidenden Einfluss auf die Veränderung des Zielvariablenwertes ΔZ hat der **Wirkungsfaktor** f_w . Er beschreibt die Intensität einer Wirkungsbeziehung. Bei $f_w = 0,1$ ist ein sehr schwacher, bei $f_w = 1,0$ ein sehr starker Einfluss der Quellvariable auf die Zielvariable zu verzeichnen. Der Nominalwert einer Veränderung ΔZ infolge einer Veränderung ΔQ ergibt sich damit zu:

$$\Delta Z_{\text{nom}} = f_{W_{Q,Z}} * \Delta Q \quad (2)$$

Dies bedeutet, dass eine Veränderung des Quellvariablenwertes um $\Delta Q = 0,5$ bei einem Wirkungsfaktor von $f_w = 0,4$ eine Veränderung des Zielvariablenwertes um $\Delta Z_{\text{nom}} = 0,2$ bewirkt.

Beispiel (siehe Abb. 2.3):

Quellvariable	<i>Reisezeitdifferenz ÖPNV zu Pkw (M8.2)</i>	
Minimum (0)	$Q_{min} = M8.2_{min}$	$= 0,0 \text{ min/km}$
Maximum (1)	$Q_{max} = M8.2_{max}$	$= 2,0 \text{ min/km}$
max. Veränderung (± 1)	$\Delta Q_{max} = \Delta M8.2_{max}$	$= \pm 2,0 \text{ min/km (Differenz } Q_{max} - Q_{min})$
Zielvariable	<i>Motorisierungsgrad (M7)</i>	
Minimum (0)	$Z_{min} = M7_{min}$	$= 450 \text{ Pkw/1000Erw.}$
Maximum (1)	$Z_{max} = M7_{max}$	$= 800 \text{ Pkw/1000Erw.}$
max. Veränderung (± 1)	$\Delta Z_{max} = \Delta M7_{max}$	$= \pm 350 \text{ Pkw/1000Erw.}$
Ausgangswerte		
Wirkungsfaktor	$f_{W_{Q,Z}} = f_{W_{M8.2,M7}}$	$= 0,4$
Veränderung Quellvariablenwert	ΔQ	$= \Delta M8.2 = 0,5 \text{ (1,0 min/km)}$
Ergebnis		
Veränderung Zielvariablenwert	$\Delta Z_{nom} = \Delta M7_{nom}$	$= 0,2 \text{ (70 Pkw/1000Erw.)}$

Aus einer Veränderung der *Reisezeitdifferenz ÖPNV zu Pkw* um 1,0 min/km resultiert bei einem Wirkungsfaktor von $f_w = 0,4$ eine Veränderung des *Motorisierungsgrades* um 70 Pkw/1000 Erwachsene (nach Ablauf des gesamten Prozesses).

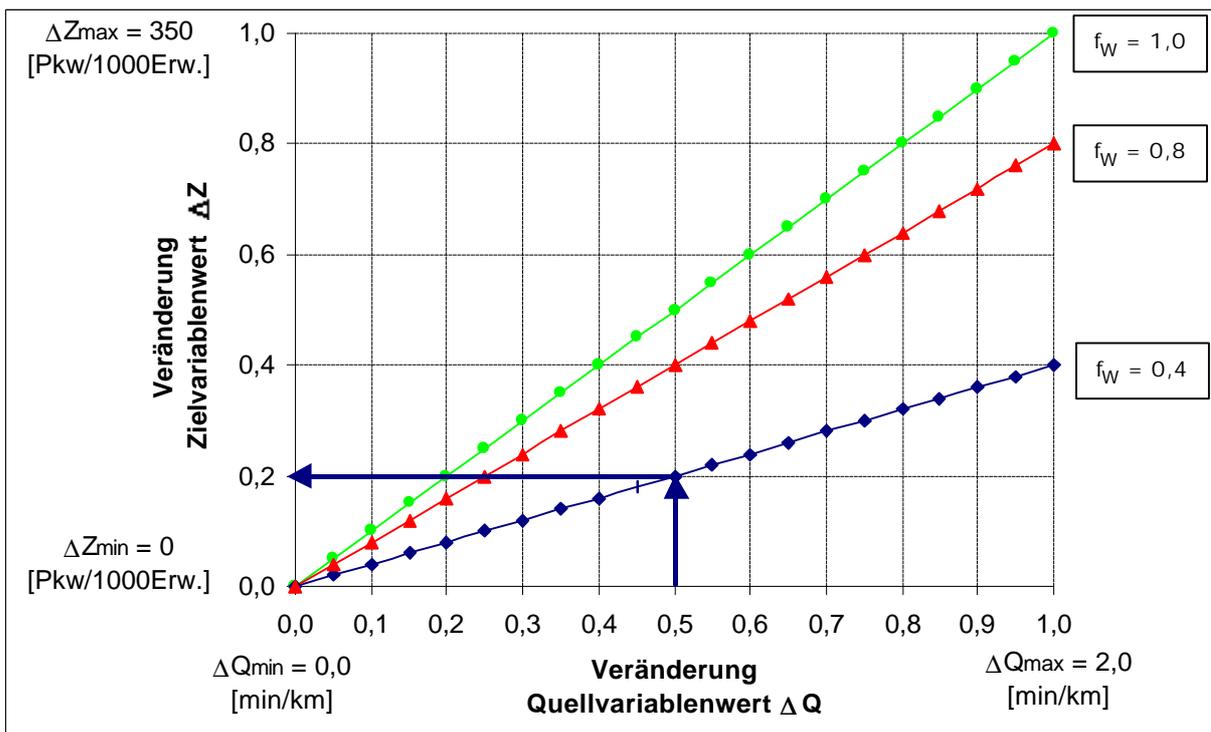


Abb. 2.3: Veränderung des Zielvariablenwertes ΔZ (Motorisierungsgrad) unter Berücksichtigung verschiedener Wirkungsfaktoren f_w infolge der Veränderung des Quellvariablenwertes ΔQ (Reisezeitdifferenz ÖPNV zu Pkw)

Bei der Berechnung der Veränderung ΔZ infolge der Veränderung ΔQ sind, neben dem Wirkungsfaktor, **vier weitere Einflüsse** zu berücksichtigen. Diese werden im folgenden beschrieben:

- der Verlauf der **Wirkungsfunktion** zwischen Quell- und Zielvariable (linear oder nichtlinear),
- der jeweils aktuelle **Zielvariablenwert**,
- die Zielvariablenänderung über die Zeit (**Übergangsfunktion**) sowie
- die **Wirkung mehrerer Quellvariablen** auf eine Zielvariable

a) Berücksichtigung des Verlaufs der Wirkungsfunktion

So wie beschrieben, führt eine einmalige Veränderung des Quellvariablenwertes um $\Delta Q = 0,4$ zur gleichen Zielvariablenänderung ΔZ wie eine zweimalige Änderung des Quellvariablenwertes um $\Delta Q = 0,2$. Damit können jedoch nicht alle Wirkungsbeziehungen realitätsnah beschrieben werden, wie folgende Fälle zeigen:

- Fall 1: Eine mehrmalige geringfügige Fahrpreiserhöhung im ÖPNV führt zu einem geringeren Fahrgastverlust im ÖPNV wie eine einmalige größere Fahrpreiserhöhung (gleiche Gesamtveränderung vorausgesetzt).
- Fall 2: Mit regelmäßigen kleineren Investitionsbeträgen im Rahmen der umweltbewussten Öffentlichkeitsarbeit ist möglicherweise ein größerer Fahrgastzuwachs im ÖPNV zu erreichen als mit einem einmaligen hohen Investitionsbetrag.

Um solche Sachverhalte berücksichtigen zu können, wird der Exponent n zur Beschreibung des Verlaufs der Wirkungsfunktion eingeführt, so dass Gl. (2) erweitert wird zu:

$$\Delta Z' = f_{W_{Q,Z}} * \Delta Q^{n_{Q,Z}} \quad (3)$$

Für die Umsetzung im Spiel sind die folgenden drei Verläufe der Wirkungsfunktion vorgesehen:

- W1: $n = 0,5$ - entspricht o. g. Fall 2
- W2: $n = 1,0$ - Standardfall
- W3: $n = 2,0$ - entspricht o. g. Fall 1

Beispiel (siehe Abb. 2.4):

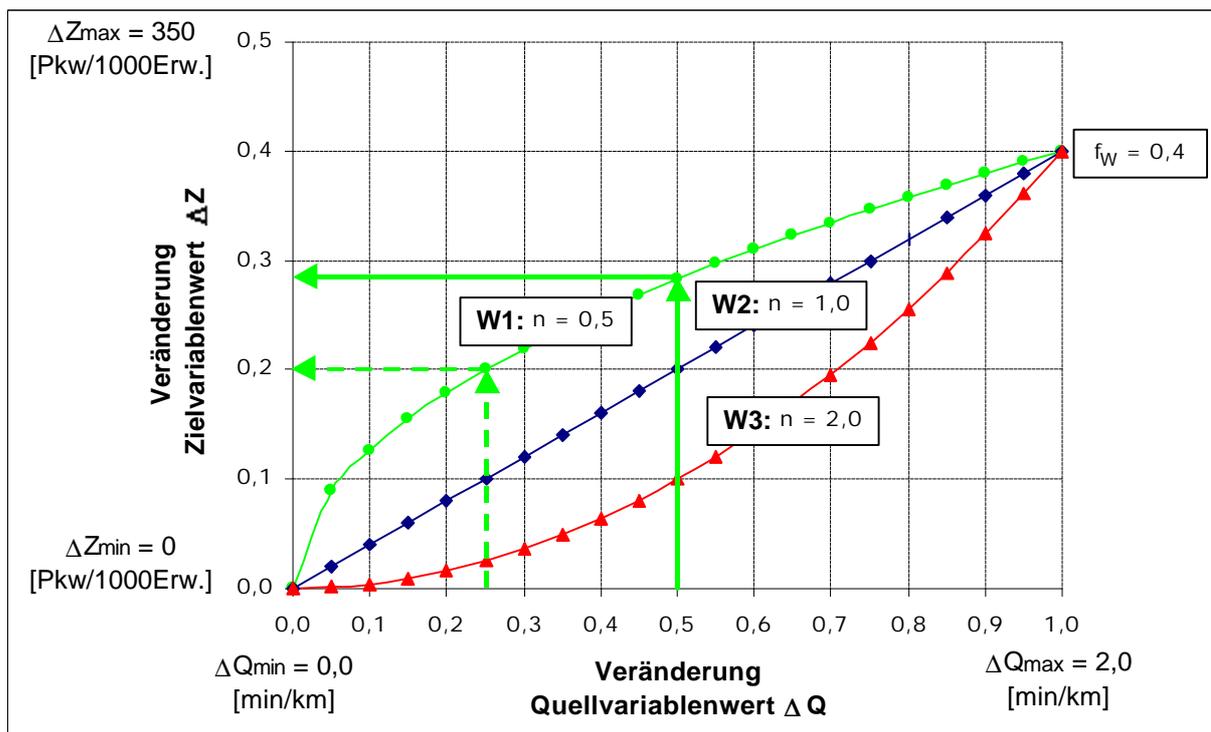


Abb. 2.4: Veränderung des Zielvariablenwertes ΔZ (Motorisierungsgrad) unter Berücksichtigung des Verlaufs der Wirkungsfunktion (Exponent n) infolge der Veränderung des Quellvariablenwertes ΔQ (Reisezeitdifferenz ÖPNV zu Pkw)

Bei einem Wirkungsfaktor von $f_W = 0,4$ und **Kurvenverlauf W1** bewirkt eine **einmalige Veränderung** des Quellvariablenwertes um $\Delta Q = 0,50$ eine Veränderung des Zielvariablenwertes

um $\Delta Z = 0,28$; eine **zweimalige Veränderung** des Quellvariablenwertes um $\Delta Q = 0,25$ bewirkt demgegenüber eine Veränderung des Zielvariablenwertes um $\Delta Z = 2 \cdot 0,20 = 0,40$.

b) Berücksichtigung des aktuellen Zielvariablenwertes

Um zu gewährleisten, dass die Variablen ihre vorgegebenen Grenzwerte nicht überschreiten (die Zielvariablen werden von mehreren Quellvariablen beeinflusst), wird bei der Berechnung der Zielvariablenänderung ΔZ zusätzlich der aktuelle Zielvariablenwert Z_{akt} berücksichtigt. Damit wird aus Gl. (3) unter Berücksichtigung des Vorzeichens der Quellvariablenänderung ΔQ :

$$\Delta Z'' = f_{W_{Q,Z}} \cdot \Delta Q^{n_{Q,Z}} \cdot (Z_{max} - Z_{akt}) \text{ für } \Delta Q > 0 \quad (4a)$$

$$\Delta Z'' = f_{W_{Q,Z}} \cdot \Delta Q^{n_{Q,Z}} \cdot (Z_{akt} - Z_{min}) \text{ für } \Delta Q < 0 \quad (4b)$$

mit $Z_{min} = 0$ und $Z_{max} = 1$ (normierte Werte)

Die Auswirkungen sollen anhand der beiden folgenden Fälle verdeutlicht werden:

- Fall 1: Quellvariablenänderung ΔQ , die zu einer Vergrößerung des Zielvariablenwertes Z_{akt} führt: Die volle Zielvariablenänderung $\Delta Z'' = \Delta Z'$ (nach Gl. 3) stellt sich nur ein, wenn der aktuelle Wert der Zielvariablen gleich dem Minimalwert ist ($Z_{akt} = Z_{min} = 0$). Je dichter der aktuelle Zielvariablenwert am Maximalwert liegt ($Z_{akt} \rightarrow Z_{max} = 1$), desto geringer fällt die Zielvariablenänderung ΔZ bei gleicher Quellvariablenänderung ΔQ aus.
- Fall 2: Quellvariablenänderung ΔQ , die zu einer Verringerung des Zielvariablenwertes Z_{akt} führt: Die volle Zielvariablenänderung $\Delta Z'' = \Delta Z'$ (nach Gl. 3) stellt sich nur ein, wenn der aktuelle Wert der Zielvariablen gleich dem Maximalwert ist ($Z_{akt} = Z_{max} = 1$). Je dichter der aktuelle Zielvariablenwert am Minimalwert liegt ($Z_{akt} \rightarrow Z_{min} = 0$), desto geringer fällt die Zielvariablenänderung ΔZ bei gleicher Quellvariablenänderung ΔQ aus.

Beispiel (siehe Abb.2.5):

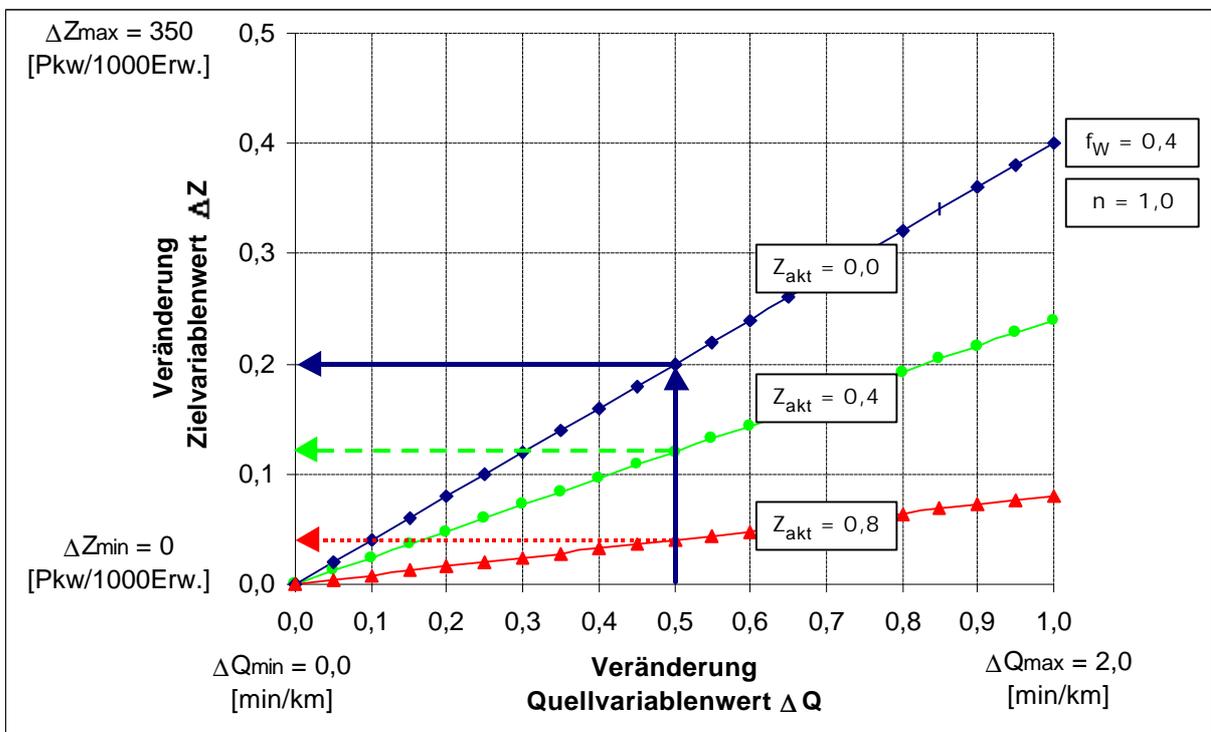


Abb. 2.5: Veränderung des Zielvariablenwertes ΔZ (Motorisierungsgrad) unter Berücksichtigung verschiedener aktueller Zielvariablenwerte Z_{akt} infolge der Veränderung des Quellvariablenwertes ΔQ (Reisezeitdifferenz ÖPNV zu Pkw)

Bei einem Wirkungsfaktor von $f_w = 0,4$ (Kurvenverlauf W2) bewirkt eine Veränderung des Quellvariablenwertes um $\Delta Q = 0,5$ folgende Veränderungen des Zielvariablenwertes ΔZ :

$$Z_{akt} = 0,00: \quad \Delta Z'' = 0,20 = \Delta Z_{nom}$$

$$Z_{akt} = 0,40: \quad \Delta Z'' = 0,12$$

$$Z_{akt} = 0,80: \quad \Delta Z'' = 0,04$$

Für das o. g. Beispiel bedeutet dies (siehe auch Abb. 2.3):

Aus einer Veränderung der *Reisezeitdifferenz ÖPNV zu Pkw* um 1,0 min/km können bei einem Wirkungsfaktor von $f_w = 0,4$ unter Berücksichtigung des aktuellen Zielvariablenwertes Z_{akt} folgende Veränderungen des *Motorisierungsgrades* resultieren:

$$Z_{akt} = M7_{akt} = 0,00 \text{ (450 Pkw/1000Erwachsene):}$$

$$\rightarrow \Delta Z'' = \Delta M7'' = 0,20 = \Delta M7_{nom} \text{ (70 Pkw/1000 Erwachsene)}$$

$$Z_{akt} = M7_{akt} = 0,40 \text{ (590 Pkw/1000Erwachsene):}$$

$$\rightarrow \Delta Z'' = \Delta M7'' = 0,12 = \Delta M7_{nom} \text{ (42 Pkw/1000 Erwachsene)}$$

$$Z_{akt} = M7_{akt} = 0,80 \text{ (730 Pkw/1000Erwachsene):}$$

$$\rightarrow \Delta Z'' = \Delta M7'' = 0,04 = \Delta M7_{nom} \text{ (14 Pkw/1000 Erwachsene)}$$

c) Berücksichtigung der Zielvariablenveränderung über die Zeit (Übergangsfunktion)

Die bisher berechneten Veränderungen des Zielvariablenwertes $\Delta Z''$ sind diejenigen Werte, die sich nach Ablauf des Prozesses einstellen. Die zeitliche Entwicklung dieser Veränderungen wird mit Hilfe

- der Latenzzeit t_L ,
- der Prozessdauer t_D mit den Abschnitten
 - t_{D1} (vom Ende der Latenzzeit bis zum Erreichen des Maximalwertes) und
 - t_{D2} (vom Erreichen des Maximalwertes bis zum Erreichen des Endwertes) sowie
- der eigentlichen Übergangsfunktion $f_T(t)$

beschrieben. Damit kann die Zielvariablenänderung ΔZ infolge einer Quellvariablenänderung ΔQ nun vollständig berechnet werden. Dies erfolgt durch Erweiterung der Gl. (4a) und (4b) zu:

$$\Delta Z(t) = f_{w_{Q,Z}} * \Delta Q^{n_{Q,Z}} * (Z_{max} - Z_{akt}) * f_{T_{Q,Z}}(t) \quad \text{für } \Delta Q > 0 \quad (5a)$$

$$\Delta Z(t) = f_{w_{Q,Z}} * \Delta Q^{n_{Q,Z}} * (Z_{akt} - Z_{min}) * f_{T_{Q,Z}}(t) \quad \text{für } \Delta Q < 0 \quad (5b)$$

Der Zeitfortschritt wird Zeiteinheiten (ZE) abgebildet. Eine ZE entspricht 4 Monaten. Die Latenzzeit t_L kann im Bereich $0 \leq t_L \leq 2$ ZE, die beiden Abschnitte der Prozessdauer $t_{D1/2}$ können jeweils im Bereich $0 \leq t_{D1/2} \leq 4$ ZE liegen. Ein Prozess insgesamt (vom Zeitpunkt der Veränderung der Quellvariablen ΔQ bis zum Erreichen des Endwertes der Zielvariablenänderung ΔZ) ist auf eine Dauer von maximal 6 ZE (2 Jahre) begrenzt.

Für die Übergangsfunktion $f_T(t)$ sind 6 (theoretische) Verläufe vorgesehen (siehe Abb. 2.6). Die Funktionen T1 bis T4 sind dabei für den Abschnitt bis zum Erreichen des Maximalwertes, die Funktionen T5 und T6 für den Abschnitt bis zum Erreichen des Endwertes vorgesehen. Die mathematische Beschreibung erfolgt mit Exponential- und Logarithmusfunktionen:

T1: große Zuwächse am Beginn der Prozessdauer; Annäherung an den Sättigungswert in kleinen Schritten

T2: gleichmäßiger (linearer) Verlauf über die gesamte Prozessdauer

- T3:** kleine Zuwächse am Beginn der Prozessdauer; großer Anstieg bei Annäherung an den Sättigungswert („umgekehrter“ Verlauf zu T1)
- T4:** kleine Zuwächse am Beginn der Prozessdauer und bei Annäherung an den Sättigungswert; großer Anstieg im mittleren Bereich
- T5:** abklingender Verlauf (in Anlehnung an T4)
- T6:** abklingender Verlauf (in Anlehnung an T1)

T1: $f_{T1}(t) = \ln\left(\frac{t - t_L}{b * t_D} + 1\right) / a$ mit $a = \ln\left(\frac{1}{b} + 1\right)$ und $b = 0,040$ (6a)

T2: $f_{T2}(t) = (t - t_L) / t_D$ (6b)

T3: $f_{T3}(t) = b * (e^{a*(t-t_L)/t_D} - 1)$ mit $a = \ln\left(\frac{1}{b} + 1\right)$ und $b = 0,065$ (6c)

T4: $f_{T4}(t) = \frac{1}{1 + b * e^{-a*(t-t_L)/t_D}}$ mit $a = -2 * \ln\left(\frac{1}{b}\right)$ und $b = 200$ (6d)
jeweils mit $t_D = t_{D1}$

T5: $f_{T5}(t) = 1 - f_{T4}(t) * (1 - f_E)$ (6e)

T6: $f_{T6}(t) = 1 - f_{T1}(t) * (1 - f_E)$ (6f)
jeweils mit $t_L = t_L + t_{D1}$ und $t_D = t_{D2}$

(Indizes Q und Z aus Gründen der Übersichtlichkeit weggelassen)

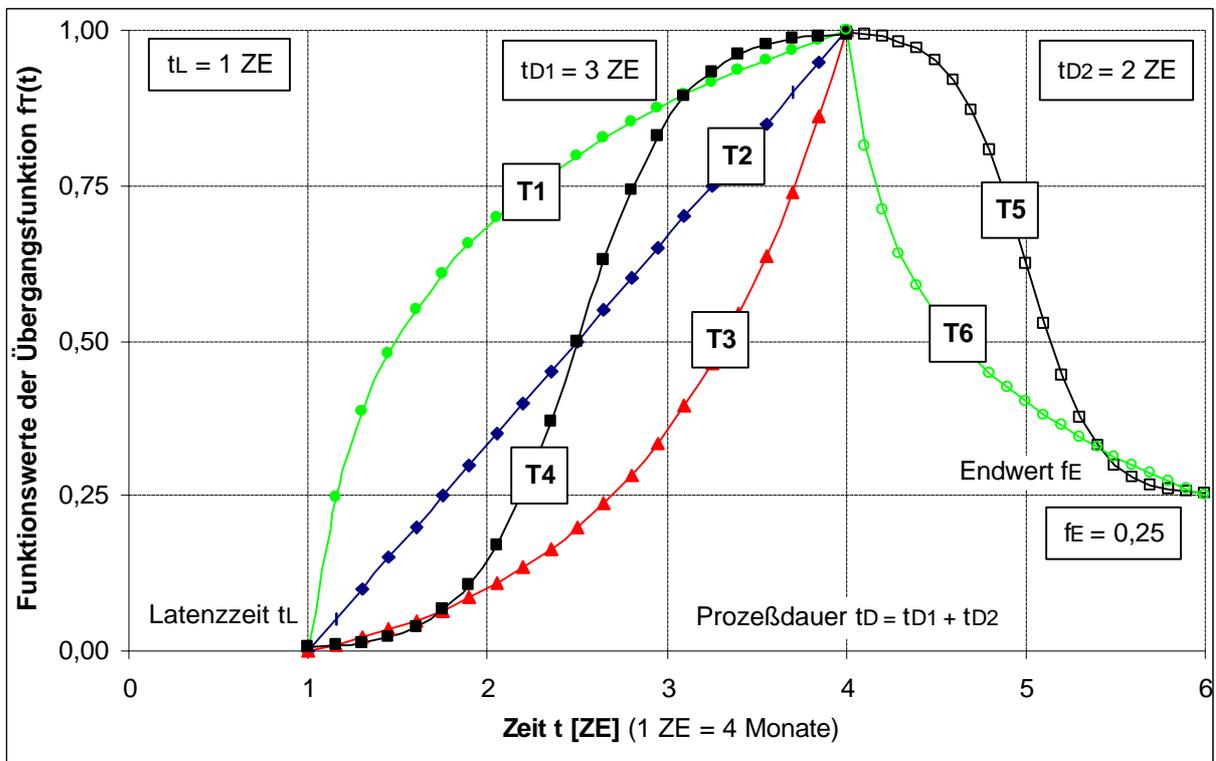


Abb. 2.6: Übergangsfunktionen $f_T(t)$ (Bsp.: Latenzzeit = 1 ZE; Prozessdauer = 3 ZE + 2 ZE)

Um einen stetigen Verlauf im Bereich des Maximalwertes zu gewährleisten, erfordert die Anwendung von Funktion **T5** für den abfallenden Ast die Funktion **T1** oder **T4** für den ansteigenden Ast; ebenso findet die Funktion **T6** nur Anwendung, wenn es keinen ansteigenden Ast gibt ($t_{D1} = 0$), d. h., wenn sich also (ggf. nach einer gewissen Latenzzeit) sofort die Maximalwirkung einstellt.

Da die Werte der Übergangsfunktion $f_T(t)$ in Abständen von 1 ZE benötigt werden, ist die Angabe des Verlaufs über die Zeit erst ab einer Prozessdauer $t_D \geq 2$ ZE (bei Funktionen T1, T2, T3, T6) bzw. $t_D \geq 3$ ZE (bei Funktionen T4, T5) sinnvoll. Für die einzelnen Verläufe wurden in Abhängigkeit von der Prozessdauer t_D die Übergangsfunktionen $f_T(t)$ ausgewertet. Sie sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt:

Zeit	Funktionswerte der Übergangsfunktionen $f_T(t)$					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
t [Anteil an t_{D1} ; t_{D2}]						
0	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00
1/4	0,61	0,25	0,07	0,07	in Anlehnung an T4 unter Berück- sichtigung von fE	in Anlehnung an T1 unter Berück- sichtigung von fE
1/3	0,69	0,33	0,10	0,15		
1/2	0,80	0,50	0,20	0,50		
2/3	0,88	0,67	0,36	0,85		
3/4	0,92	0,75	0,46	0,93		
1	1,00	1,00	1,00	1,00		

Tab. 2.1: Übergangsfunktionen $f_T(t)$

Beispiel:

Prozessdauer $t_{D1} = 4$ ZE, Übergangsfunktion $f_T(t)$ mit Verlauf T1:

Nach Ablauf von 2 ZE (8 Monate) hat die Übergangsfunktion einen Wert $f_T(2 \text{ ZE}) = 0,80$ erreicht, d. h. die Veränderung des Zielvariablenwertes ΔZ hat 80% desjenigen Wertes erreicht, der sich nach Ablauf des gesamten Prozesses einstellt (Endwert).

d) Berücksichtigung der Wirkung mehrerer Quellvariablen

Wird eine Zielvariable (gleichzeitig) von mehreren Quellvariablen beeinflusst (Regelfall), so ist der Berechnungsansatz nach den Gleichungen (5a), (5b) und (1) mehrfach anzuwenden.

Beispiel:

Die Zielvariable Z wird von zwei Quellvariablen Q_1 und Q_2 mit $\Delta Q_1 > 0$ und $\Delta Q_2 > 0$ beeinflusst. Im ersten Berechnungsschritt wird die Veränderung der Zielvariablen $\Delta Z(t)$ infolge der Veränderung der Quellvariablen ΔQ_1 ermittelt. Es ergibt sich ein neuer Zielvariablenwert Z_{neu} , dieser wird zum aktuellen Zielvariablenwert Z_{akt} .

- $\Delta Z(t) = f_{W_{Q_1,Z}} * \Delta Q_1^{n_{1,Z}} * (Z_{\text{max}} - Z_{\text{akt}}) * f_{T_{Q_1,Z}}(t)$
- $Z_{\text{neu}} = Z_{\text{akt}} + \Delta Z(t)$
- $Z_{\text{neu}} \rightarrow Z_{\text{akt}}$ für Quellvariable Q_1

Im zweiten Schritt wird die Veränderung der Zielvariablen $\Delta Z(t)$ infolge der Veränderung der Quellvariablen ΔQ_2 - aufbauend auf der Veränderung aus ΔQ_1 , die im aktuellen Zielvariablenwert Z_{akt} bereits berücksichtigt ist - ermittelt.

- $\Delta Z(t) = f_{WQ2,Z} * Q_{2n2,Z} * (Z_{max} - Z_{akt}) * f_{TQ2,Z}(t)$
- $Z_{neu} = Z_{akt} + \Delta Z(t)$
- $Z_{neu} \rightarrow Z_{akt}$ für Quellvariable Q_2

Die Reihenfolge der Berechnung, d. h. der Berücksichtigung der einzelnen Quellvariablenänderungen hat dabei keinen Einfluss auf den berechneten Wert der Zielvariablen.

2.4.2.2 Zusammenfassung und Darstellung der Beziehungen

Zur eindeutigen Beschreibung jeder Wirkungsbeziehung vom Typ B1 zwischen einer Quell- und einer Zielvariablen sind, wie in Abschnitt 2.4.1.1 ausgeführt, 8 Angaben notwendig:

Intensität

- Wirkungsfunktion (Exponent $n_{Q,Z}$) [W1; W2; W3]
- Wirkungsfaktor $f_{W_{Q,Z}}$ [0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0]
- Endwert $f_{E_{Q,Z}}$ (ggf.) [0%; 25%; 50%; 75% vom Maximalwert]

Zeitlicher Verlauf

- Übergangsfunktion $f_{T_{Q,Z}}(t)$
 - aufsteigender Ast [T1; T2; T3; T4]
 - abfallender Ast (ggf.) [T5; T6]
- Latenzzeit $t_{L_{Q,Z}}$ [0 ZE; 1 ZE; 2 ZE]
- Prozessdauer $t_{D_{Q,Z}}$
 - aufsteigender Ast $t_{D1_{Q,Z}}$ [0 ZE; 1 ZE; 2 ZE; 3 ZE; 4 ZE]
 - abfallender Ast $t_{D2_{Q,Z}}$ (ggf.) [0 ZE; 1 ZE; 2 ZE; 3 ZE; 4 ZE]

Insgesamt werden 46 Wirkungsbeziehungen mit **12 Zielvariablen** nach diesem Berechnungsansatz behandelt. Diese sind in **Anlage B1** in Formularen dargestellt. Zusätzlich wurden die beiden o. g. Angaben zur Beschreibung der Intensität der Wirkungsbeziehungen grafisch aufbereitet (siehe Anlage B1). Die Darstellungen geben den Nominalwert einer Veränderung ΔZ infolge einer Veränderung ΔQ nach Gl. (2) wieder.

Beispiel:

→ Anlage B1, Seite 12 und 25

Quellvariable: *Reisezeitdifferenz ÖPNV zu Pkw* (M8.2)

Zielvariable: *Motorisierungsgrad* (M7)

Die zu den Variablen angegebenen Grenzwerte (Minimum und Maximum) sind für die Berechnung nicht relevant, entscheidend ist die angegebene **max. Veränderung** des Quell- bzw. Zielvariablenwertes ΔQ bzw. ΔZ .

Die max. Veränderung des Quellvariablenwertes *Reisezeitdifferenz ÖPNV zu Pkw* (M8.2) mit 2,0 min/km entspricht also dem im Diagramm auf der Abszisse angegebenen normierten Wert 1,0. Ebenso entspricht die max. Veränderung des Zielvariablenwertes *Motorisierungsgrad* (M7) mit 350 Pkw/1000 Erwachsene dem auf der Ordinate angegebenen normierten Wert 1,0.

Aus einer Veränderung der *Reisezeitdifferenz ÖPNV zu Pkw* um 1,0 min/km (normiert 0,5) resultiert also eine Veränderung des *Motorisierungsgrades* von 70 Pkw/1000 Erwachsene (normiert 0,2).

Zur Festlegung der einzelnen Parameter der Wirkungsbeziehungen hat sich folgende Vorgehensweise als zweckmäßig erwiesen:

Beschreibung der Intensität (Anlage B1: Formular bzw. Diagramm)

1. Festlegung des Wirkungsfaktors f_w
Durch die Festlegung unterschiedlicher Wirkungsfaktoren für die einzelnen Beziehungen von **unterschiedlichen Quellvariablen** zur **gleichen Zielvariable** ($Q_1 \rightarrow Z$, $Q_2 \rightarrow Z$, $Q_3 \rightarrow Z$, ...) kann eine **Wichtung** vorgenommen werden. Als Orientierung kann hier gelten:
 - Festlegung des Wirkungsfaktors für die Beziehung mit dem **größten Einfluss** auf die Zielvariable mit $f_w = 1,0$ (ggf. auch für mehrere Beziehungen)
 - Festlegung der Wirkungsfaktoren aller anderen Beziehungen in entsprechendem Verhältnis
2. Festlegung der **Wirkungsfunktion** (Verlauf W1, W2 oder W3)

Beschreibung des zeitlichen Verlaufs (Anlage B1: Formular)

1. Festlegung der Latenzzeit t_L
2. Festlegung der Prozessdauer $t_D = t_{D1} + t_{D2}$
3. Festlegung der **Übergangsfunktion** (Verlauf T1, T2, T3, T4 sowie T5, T6)

2.4.3 Beziehungen mit Wichtung

2.4.3.1 Abbildung der Beziehungen

Zahlreiche (Quell-) Variablen innerhalb des Wirkungsgefüges werden zu „übergeordneten“ (Ziel-) Variablen zusammengefasst, um deren Wirkungen gemeinsam weiterzuerfolgen. Beispielsweise setzt sich der Wert der Variablen *Attraktivitäts-Defizit ÖPNV zu Pkw* aus den Werten 5 anderer Variablen zusammen (s. u.) und wirkt auf die *Verkehrsmittelwahl ÖPNV* (Anteil des ÖPNV am Modal Split).

Beispiel:

Quellvariablen

- Kostendifferenz Pkw zu ÖPNV (M8.1)
- Reisezeitdifferenz ÖPNV zu Pkw (M8.2)
- Infrastrukturvorteil Pkw zu ÖPNV (M8.3)
- Komfortvorteil Pkw zu ÖPNV (M8.4)
- Imagevorteil Pkw zu ÖPNV (M8.5)

Zielvariable

- Attraktivitäts-Defizit ÖPNV zu Pkw (M8)

Im Gegensatz zu den Wirkungsbeziehungen vom Typ B1 stellen diese Beziehungen direkte Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Quellvariablenwerten und dem Zielvariablenwert her. Im Regelfall sind die betreffenden Wirkungsbeziehungen keine Prozesse (d. h. kein Zeiteinfluss), dies bedeutet:

Der aktuelle Zielvariablenwert Z_{akt} ergibt sich aus den aktuellen Werten aller die Zielvariable beeinflussenden Quellvariablen Q_{akt} .

Dabei wird zwischen den einzelnen Beziehungen der Quellvariablen auf die Zielvariable ($Q_1 \rightarrow Z$, $Q_2 \rightarrow Z$, $Q_3 \rightarrow Z$, ...) eine Wichtung vorgenommen. Diese wird durch den **Anteilsfaktor** f_A festgelegt. Bei $f_A = 10\%$ ist ein sehr schwacher, bei $f_A = 90\%$ ein sehr starker Einfluss der Quellvariablen auf die Zielvariable zu verzeichnen. Die Summe der Anteilsfaktoren aller auf eine Zielvariable wirkenden

Beziehungen ist dabei 100%. Der neue Zielvariablenwert Z_{neu} (im Gegensatz zu den Beziehungen Typ B1 identisch mit dem aktuellen Zielvariablenwert Z_{akt}) ergibt sich damit zu:

$$Z_{\text{akt}} = Z_{\text{neu}} = \sum_i Q_{\text{gew}_{Q,Z}} \quad (7)$$

$$\text{mit } Q_{\text{gew}_{Q,Z}} = (Q_{\text{akt}} - Q_{\text{min}}) * f_{A_{Q,Z}} * f_{T_{Q,Z}}(t) \quad \text{für gleichgerichtete Wirkung (+)} \quad (8a)$$

$$\text{mit } Q_{\text{gew}_{Q,Z}} = (Q_{\text{max}} - Q_{\text{akt}}) * f_{A_{Q,Z}} * f_{T_{Q,Z}}(t) \quad \text{für gegensätzliche Wirkung (-)} \quad (8b)$$

Da mit normierten Werten gearbeitet wird, können die Variablen auch unterschiedliche Einheiten besitzen.

Beispiel: (siehe Anlage B2a, Seite 6 und 11)

Quellvariablen

Kostendifferenz Pkw zu ÖPNV (M8.1)

$$\text{Minimum (0)} \quad Q_{\text{min}} = M8.1_{\text{min}} = 0,10 \text{ DM/km}$$

$$\text{Maximum (1)} \quad Q_{\text{max}} = M8.1_{\text{max}} = 0,60 \text{ DM/km}$$

Reisezeitdifferenz ÖPNV zu Pkw (M8.2)

$$\text{Minimum (0)} \quad Q_{\text{min}} = M8.2_{\text{min}} = 0,0 \text{ min/km}$$

$$\text{Maximum (1)} \quad Q_{\text{max}} = M8.2_{\text{max}} = 2,0 \text{ min/km}$$

Infrastrukturvorteil Pkw zu ÖPNV (M8.3)

$$\text{Minimum (0)} \quad Q_{\text{min}} = M8.3_{\text{min}} = \text{sehr niedrig}$$

$$\text{Maximum (1)} \quad Q_{\text{max}} = M8.3_{\text{max}} = \text{sehr hoch}$$

Komfortvorteil Pkw zu ÖPNV (M8.4)

$$\text{Minimum (0)} \quad Q_{\text{min}} = M8.4_{\text{min}} = \text{sehr niedrig}$$

$$\text{Maximum (1)} \quad Q_{\text{max}} = M8.4_{\text{max}} = \text{sehr hoch}$$

Imagevorteil Pkw zu ÖPNV (M8.5)

$$\text{Minimum (0)} \quad Q_{\text{min}} = M8.5_{\text{min}} = \text{sehr niedrig}$$

$$\text{Maximum (1)} \quad Q_{\text{max}} = M8.5_{\text{max}} = \text{sehr hoch}$$

Zielvariable

Attraktivitäts-Defizit ÖPNV zu Pkw (M8)

$$\text{Minimum (0)} \quad Q_{\text{min}} = M8_{\text{min}} = \text{sehr niedrig}$$

$$\text{Maximum (1)} \quad Q_{\text{max}} = M8_{\text{max}} = \text{sehr hoch}$$

Ausgangswerte

Anteilsfaktoren, Wirkungsrichtung und Quellvariablenwerte

$$f_{A_{M8.1,M8}} = 20\% \quad (0,2) \quad (-) \quad M8.1_{\text{akt}} = 0,8 \quad (0,50 \text{ DM/km})$$

$$f_{A_{M8.2,M8}} = 40\% \quad (0,4) \quad (+) \quad M8.2_{\text{akt}} = 0,3 \quad (0,6 \text{ min/km})$$

$$f_{A_{M8.3,M8}} = 10\% \quad (0,1) \quad (+) \quad M8.3_{\text{akt}} = 0,5 \quad (\text{mittel})$$

$$f_{A_{M8.4,M8}} = 20\% \quad (0,2) \quad (+) \quad M8.4_{\text{akt}} = 1,0 \quad (\text{sehr hoch})$$

$$f_{A_{M8.5,M8}} = 10\% \quad (0,1) \quad (+) \quad M8.5_{\text{akt}} = 1,0 \quad (\text{sehr hoch})$$

Ergebnis

Zielvariablenwert

$$M8_{\text{akt}} = M8_{\text{neu}} = (1,0 - 0,8) * 0,2 + 0,3 * 0,4 + 0,5 * 0,1 + 1,0 * 0,2 + 1,0 * 0,1 = \mathbf{0,51} \rightarrow \mathbf{\text{mittel}}$$

Eine hohe Kostendifferenz Pkw zu ÖPNV führt, verbunden mit einer niedrigen Reisezeitdifferenz ÖPNV zu Pkw, einem mittleren Infrastrukturvorteil Pkw zu ÖPNV sowie einem sehr hohen Komfort- und Imagevorteil Pkw zu ÖPNV, zu einem mittleren Attraktivitäts-Defizit ÖPNV zu Pkw.

2.4.3.2 Zusammenfassung und Darstellung der Beziehungen

Zur Beschreibung jeder Wirkungsbeziehung zwischen einer Quell- und einer Zielvariablen ist, wie in Abschnitt 2.4.2.1 ausgeführt, im Regelfall nur eine Angabe erforderlich:

Wichtung

- Anteilsfaktor $f_{A_{Q,Z}}$ [5%; 10%; 15%; 20%; 25%; 30%; ... ; 80%; 90%]

Insgesamt werden 31 Wirkungsbeziehungen mit **9 Zielvariablen** nach diesem Ansatz abgebildet. Diese sind in **Anlage B2a** in Formularen dargestellt. Zusätzlich wurden die Anteilsfaktoren für die einzelnen Beziehungen grafisch aufbereitet und in Kreisdiagrammen dargestellt (siehe Anlage B2a). Hinsichtlich der beschriebenen Abbildung der Wirkungsbeziehungen vom Typ B2a gibt es Ausnahmen für 2 Zielvariablen: Hier erfolgt die zusätzliche Berücksichtigung der zeitlichen Entwicklung der einzelnen Prozesse in analoger Weise zu den Beziehungen vom Typ B1 mit Hilfe der Übergangsfunktion $f_T(t)$:

2.4.4 Beziehungen mit Wichtung unter Berücksichtigung von Haupt- und Nebenquellvariablen

2.4.4.1 Abbildung der Beziehungen

Die Wirkungsbeziehungen vom Typ B2b stellen eine Erweiterung der oben beschriebenen Beziehungen vom Typ B2a dar. Prinzipiell wird wieder eine Wichtung zwischen den einzelnen Beziehungen der Quellvariablen auf die Zielvariable mit Hilfe der bereits erwähnten **Anteilsfaktoren** f_A vorgenommen.

Zusätzlich wird der aktuelle Wert der Zielvariablen Z_{akt} an den aktuellen Wert **einer** Quellvariablen, der sog. **Haupt-Quellvariablen** QO_{akt} gekoppelt. Dies ist aus folgendem Grund notwendig:

Beispiel:

Quellvariablen

- Anzahl der Carsharing-Stationen (K8.1)
- Benutzungsgebühren Carsharing (E14)
- Umweltorientierte Öffentlichkeitsarbeit (G3)

Zielvariable

- Nutzeranteil Carsharing (K8.2)

Jede der o. g. Quellvariablen hat einen bestimmten Einfluss auf die Zielvariable, der mit einer bestimmten Wichtung festgelegt ist; soweit entsprechen die Beziehungen noch dem Typ B2a.

Wenn die *Anzahl der Carsharing-Stationen* allerdings kleiner wird bzw. im Grenzfall keine vorhanden sind, muss der *Nutzeranteil Carsharing* ebenfalls Null sein, unabhängig davon, wie hoch die *Benutzungsgebühren Carsharing* sind und wie hoch die Investitionen in die *Umweltorientierte Öffentlichkeitsarbeit* sind.

Die Anteile der einzelnen Quellvariablen an der Zielvariablen werden also abhängig vom Wert der **Haupt-Quellvariablen** QO_{akt} aufsummiert, d. h. der Wert der Zielvariablen ist dem Wert der Haupt-Quellvariablen proportional; der Proportionalitätsfaktor variiert in Abhängigkeit von den Werten der **Neben-Quellvariablen** zwischen $f_{A_{QO,Z}}$ und 1,0.

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass bei einigen Beziehungen auch die zeitliche Entwicklung des Zielvariablenwertes berücksichtigt wird. Dies geschieht in analoger Weise zu den Beziehungen vom Typ B1 mit Hilfe der Übergangsfunktion $f_T(t)$.

$$Z_{akt} = Z_{neu} = QO * (f_{A_{QO,Z}} + \sum_j Q_{gew_{Q,Z}}) \quad (9)$$

mit $QO = (QO_{akt} - QO_{min}) * f_{T_{QO,Z}}(t)$ für gleichgerichtete Wirkung (+) von $QO \rightarrow Z$ (10a)

mit $QO = (QO_{max} - QO_{akt}) * f_{T_{QO,Z}}(t)$ für gegensätzliche Wirkung (-) von $QO \rightarrow Z$ (10b)

mit $Q_{gew_{Q,Z}} = (Q_{akt} - Q_{min}) * f_{A_{Q,Z}} * f_{T_{Q,Z}}(t)$ für gleichgerichtete Wirkung (+) (11a)

mit $Q_{gew_{Q,Z}} = (Q_{max} - Q_{akt}) * f_{A_{Q,Z}} * f_{T_{Q,Z}}(t)$ für gegensätzliche Wirkung (-) (11b)

Beispiel: (siehe Anlage B2b, Seite 1 und Seite 12)

Quellvariablen

Anzahl der Carsharing-Stationen (K8.1) - **Haupt-Quellvariable**

Minimum (0) $Q_{min} = K8.1_{min} = 0,0 \text{ Stck/km}^2$

Maximum (1) $Q_{max} = K8.1_{max} = 2,0 \text{ Stck/km}^2$

Benutzungsgebühren Carsharing (E14) - **Neben-Quellvariable**

Minimum (0) $Q_{min} = E14_{min} = 0,40 \text{ DM/km}$

Maximum (1) $Q_{max} = E14_{max} = 1,00 \text{ DM/km}$

Umweltorientierte Öffentlichkeitsarbeit (G3) - **Neben-Quellvariable**

Minimum (0) $Q_{min} = G3_{min} = 0 \text{ DM/Jahr}$

Maximum (1) $Q_{max} = G3_{max} = 1.000.000 \text{ DM/Jahr}$

Zielvariable

Nutzeranteil Carsharing (K8.2)

Minimum (0) $Q_{min} = K8.2_{min} = 0 \text{ Nutzer/1000 Einwohner}$

Maximum (1) $Q_{max} = K8.2_{max} = 100 \text{ Nutzer/1000 Einwohner}$

Ausgangswerte

Anteilsfaktoren, Wirkungsrichtung und Quellvariablenwerte

$f_{A_{K8.1,K8.2}} = 30\% (0,3) (+)$ $K8.1_{akt} = 0,8 (1,6 \text{ Stck/km}^2)$ - für **Fälle 1 und 2**

$f_{A_{E14,K8.2}} = 40\% (0,4) (-)$ $E14_{akt} = 1,0 (1,00 \text{ DM/km})$ - für **Fall 1**

$f_{A_{G3,K8.2}} = 30\% (0,3) (+)$ $G3_{akt} = 0,0 (0 \text{ DM/Jahr})$ - für **Fall 1**

$E14_{akt} = 0,0 (0,40 \text{ DM/km})$ - für **Fall 2**

$G3_{akt} = 1,0 (1 \text{ Mio. DM/Jahr})$ - für **Fall 2**

Ergebnis

Zielvariablenwert für **Fall 1**

$K8.2_{akt} = K8.2_{neu} = 0,8 * (0,3 + 0,0 * 0,4 + 0,0 * 0,3) = 0,24 \rightarrow 24 \text{ Nutzer/1000 Einw.}$

Zielvariablenwert für **Fall 2**

$K8.2_{akt} = K8.2_{neu} = 0,8 * (0,3 + 1,0 * 0,4 + 1,0 * 0,3) = 0,80 \rightarrow 80 \text{ Nutzer/1000 Einw.}$

Bei Vorhandensein von durchschnittlich 1,6 *Carsharing-Stationen* je km^2 stellt sich im „ungünstigen“ Fall (Fall 1: hohe *Benutzungsgebühren Carsharing*; keine *Umweltorientierte Öffentlichkeitsarbeit*) ein *Nutzeranteil Carsharing* von 24 Nutzer je 1000 Einwohner ein; im „günstigen“ Fall (Fall 2: niedrige *Benutzungsgebühren Carsharing*; maximale *Umweltorientierte Öffentlichkeitsarbeit*) kann dieser auf 80 Nutzer je 1000 Einwohner gesteigert werden (siehe gekennzeichnete Bereich in der grafischen Darstellung). Der o. g. Proportionalitätsfaktor, der den Anstieg der Geraden im Diagramm beschreibt, liegt im vorliegenden Beispiel zwischen 0,3 und 1,0.

2.4.4.2 Zusammenfassung und Darstellung der Beziehungen

Zur Beschreibung jeder Wirkungsbeziehung zwischen einer Quell- und einer Zielvariablen sind, wie in Abschnitt 3.3.1. ausgeführt, folgende Angaben erforderlich (allgemeiner Fall für Beziehungen mit Zeiteinfluss):

Wichtung

- Anteilsfaktor $f_{A_{Q,Z}}$ [5%; 10%; 15%; 20%; ...; 50%; 60%; 70%; 80%; 90%]
- Endwert $f_{E_{Q,Z}}$ (ggf.) [0%; 25%; 50%; 75% vom Maximum]

Zeitlicher Verlauf

- Übergangsfunktion $f_{T_{Q,Z}}(t)$
 - aufsteigender Ast [T1; T2; T3; T4]
 - abfallender Ast (ggf.) [T5; T6]
- Latenzzeit $t_{L_{Q,Z}}$ [0 ZE; 1 ZE; 2 ZE]
- Prozessdauer $t_{D_{Q,Z}}$
 - aufsteigender Ast $t_{D1_{Q,Z}}$ [0 ZE; 1 ZE; 2 ZE; 3 ZE; 4 ZE]
 - abfallender Ast $t_{D2_{Q,Z}}$ (ggf.) [0 ZE; 1 ZE; 2 ZE; 3 ZE; 4 ZE]

Insgesamt werden 29 Wirkungsbeziehungen mit **8 Zielvariablen** nach diesem Berechnungsansatz abgebildet. Diese sind in **Anlage B2b** in Formularen dargestellt. Zur Veranschaulichung wurde die Funktion $Z_{akt} = f(QO_{akt})$ in Abhängigkeit von den Anteilsfaktoren f_A für die einzelnen Beziehungen grafisch aufbereitet und in Diagrammen dargestellt (siehe Anlage B2b). Der gekennzeichnete Bereich stellt dabei die mögliche Lage der Geraden in Abhängigkeit von den aktuellen Werten der Neben-Quellvariablen dar.

2.4.5 Sonstige Wirkungsbeziehungen

Alle in den folgenden Abschnitten beschriebenen Beziehungen sind Einzelfälle. Sie lassen sich aufgrund ihrer Spezifika nicht mit den bisher erläuterten Beziehungstypen B1, B2a oder B2b abbilden und werden aus diesem Grund in den folgenden Abschnitten, zusammengefasst nach inhaltlichen Gesichtspunkten, gesondert abgehandelt.

Dabei werden die Ansätze zur Berechnung der **verkehrsmittelspezifischen Kostenkomponenten** und der Nutzeranteile für die **neuen Mobilitätskonzepte** im Detail dargestellt; für alle darüber hinaus noch verbleibenden Wirkungsbeziehungen werden die Berechnungsansätze im Überblick dargestellt, da sie im Sinne der Modellierung Sonderfälle sind und nicht „typische Wirkungsbeziehungen“ darstellen.

Am Anfang eines jeden Abschnitts zeigt einen Überblick die jeweils betrachteten Wirkungsbeziehungen. Dabei sind die Zielvariablen und die jeweils zugehörigen Quellvariablen aufgeführt. Die zusätzlich in der Berechnung berücksichtigten Parameter (diese sind nicht Variablen des Wirkungsmodells) sind ebenso wie die Grenz- und Initialisierungswerte der Quell- und Zielvariablen in Anlage B3 aufgeführt.

2.4.5.1 Verkehrsmittelspezifische Kostenkomponenten

Die Berechnung der einzelnen Kostenkomponenten (Fixkosten, Betriebskosten, Park- und Roadpricinggebühren) umfasst folgende Beziehungen des Wirkungsmodells.

- *Fixkosten Pkw / Fixkosten Microcar (S4/S5)*
Quellvariablen:
 - *Kfz-Steuer Pkw / Kfz-Steuer Microcar (E5/E6)*
 - *Anschaffungskosten Pkw (S1)*
 - *Anschaffungskosten Microcar (S2)*
 - *Versicherungskosten Pkw / Microcar (S3)*
- *Betriebskosten Pkw / Betriebskosten Microcar (S6/S7)*
Quellvariablen:
 - *Mineralölsteuer (E7)*
- *Parkgebühren Pkw / Parkgebühren Microcar (E9/E10)*
Quellvariablen:
 - *Parkgebühren Pkw (Kurzzeit/Langzeit; je Parkplatz)*
 - *Parkgebühren Microcar (Kurzzeit/Langzeit; je Parkplatz)*
- *Roadpricinggebühren Pkw / Roadpricinggebühren Microcar (E11/E12)*
Quellvariablen:
 - *Roadpricinggebühren Pkw / Microcar (Jahresvignette)*
In den MOBILITY-Versionen 1.x wird Roadpricing nicht berücksichtigt, modellintern wird mit 0 DM/(Pkw*Jahr) gerechnet.
- *Benutzungsgebühren ÖPNV (E13)*
Quellvariablen:
 - *Benutzungsgebühren ÖPNV (Einzelkarte/Zeitkarte)*

Unter Berücksichtigung der genannten (Quell-)Variablen und Parameter können nun die einzelnen Kostenanteile (Zielvariablen) berechnet werden. Dabei werden alle Anteile in [DM/km] ausgedrückt.

Verwendete Bezeichnungen:

KfzSt	Kfz-Steuer	DM/Jahr
AK	Anschaffungskosten	DM
ND	Nutzungsdauer	Jahre
RW	Restwert nach Nutzungsdauer	%
MWSt	Mehrwertsteuer	%
FL	Fahrleistung	km/Jahr
VK	Versicherungskosten	DM/Jahr
FK, FK'	Fixkosten	DM/Jahr, DM/km
MÖSt	Mineralölsteuer	DM/Liter Benzin
RBP	Rohbenzinpreis	DM/Liter
VTP	Vergütung Tankstellen-Pächter	DM/Liter
BV	Benzinverbrauch	Liter/100 km
RK	Reparaturkosten	DM/Jahr
SK	Sonstige Kosten (HU, AU, Reifen etc.)	DM/Jahr
BK, BK'	Betriebskosten	DM/Jahr, DM/km

PGK, PGL	Parkgebühren Kurzzeit, Langzeit	DM/h
APDK, APDL	Anteil Parkdauer Kurzzeit, Langzeit	%
PD	Mittlere jährliche Parkdauer	h/(Pkw*Jahr)
PG, PG'	Parkgebühren	DM/Jahr, DM/km
RG, RG'	Roadpricinggebühren	DM/Jahr, DM/km
BGE	Benutzungsgebühren ÖPNV, Einzelkarte	DM/Fahrt
BGZ	Benutzungsgebühren ÖPNV, Zeitkarte	DM/Monat
FZ	Anzahl Fahrten mit Zeitkarte	Fahrten/Monat
AFE, AFZ	Anteil Fahrten Einzelkarte, Zeitkarte	%
EF	Mittlere Entfernung ÖPNV-Fahrt	km
BG, BG'	Benutzungsgebühren ÖPNV	DM/Fahrt, DM/km
KDPkw-ÖPNV	Kostendifferenz Pkw zu ÖPNV	DM/km
KDPkw-Microcar	Kostendifferenz Pkw zu Microcar	DM/km

Berechnung der Kostenkomponenten:

- *Fixkosten*
 $FK = KfzSt + AK * (1 - RW) / ND * (1 + MWSt) + VK$
 $FK' = FK / FL$
- *Betriebskosten*
 $BK = ((MÖSt + RBP + VTP) * BV/100 * FL + RK + SK) * (1 + MWSt)$
 $BK' = BK / FL$
- *Parkgebühren*
 $PG = (PGK * APDK + PGL * APDL) * PD$
 $PG' = PG / FL$
- *Roadpricinggebühren*
 $RG' = RG / FL$
- *Benutzungsgebühren ÖPNV*
 $BG = BGE * AFE + BGZ / Fz * AFZ$
 $BG' = BG / EF$

Aus den einzelnen Kostenanteilen werden die Zielvariablen *Kostendifferenz Pkw zu ÖPNV* (M8.1) und *Kostendifferenz Pkw zu Microcar* (M9) berechnet.

$$KDPkw-ÖPNV = (FK' + BK' + PG' + RG')_{Pkw} - (BG')_{ÖPNV} = M8.1$$

$$KDPkw-Microcar = (FK' + BK' + PG' + RG')_{Pkw} - (FK' + BK' + PG' + RG')_{Microcar} = M9$$

Beispiel:

Auf Grundlage der angesetzten Initialisierungswerte ergeben sich rechnerisch folgende verkehrsmittelbezogene Kosten und Kostendifferenzen:

- *Kosten*
Pkw: 0,62 DM/km
Microcar: 0,42 DM/km
ÖPNV: 0,25 DM/km
- *Kostendifferenzen*
Pkw - ÖPNV: 0,37 DM/km (Minimum: -0,09 DM/km; Maximum: 0,87 DM/km)
Pkw - Microcar: 0,20 DM/km (Minimum: 0,14 DM/km; Maximum: 0,44 DM/km)

2.4.5.2 Neue Mobilitätskonzepte

Die Ermittlung der Nutzeranteile für die einzelnen Mobilitätskonzepte erfolgt auf Basis der jeweils getätigten Investitionen. Die Entscheidungsmöglichkeiten des Spielers reichen hier neben Maßnahmen der technischen Infrastruktur (z. B. für die Einrichtung eines Parkplatzreservierungssystems) über die Festlegung von Preisen und marktunterstützenden Maßnahmen bis zum Einsatz von Werbung (jeweils in vorgegebenen Grenzen). Im Einzelnen werden hier folgende Mobilitätskonzepte abgebildet (Mobilitäts-Informationszentrale und Carsharing wurden bereits bei den Wirkungsbeziehungen B1 bzw. B2b abgehandelt):

- Passive Routenführung (K1.1/K1.2)
- Aktive Routenführung (K2.1/2.2)
- Stellplatzreservierung (K3.1/3.2)
- Teleworking-Arbeitsplätze (K6.1/6.2)
- Personal Travel Assistant (K9.1/9.2)

Entscheidend für die Intensität der Wirkung auf andere Variablen ist die Höhe des Nutzeranteils für die einzelnen Mobilitätskonzepte. Im folgenden wird beispielhaft der Berechnungsansatz für die Passive Routenführung gezeigt. Die Berechnung des Nutzeranteils für die passive Routenführung erfolgt dabei unter Berücksichtigung des Preises, der marktunterstützenden Maßnahmen sowie der Werbung. Die Angleichung des aktuellen Nutzeranteils an diesen berechneten Wert erfolgt dabei über einen bestimmten Zeitraum, der wiederum von der Höhe der marktunterstützenden Maßnahmen und der Werbung abhängig ist (schnellstens innerhalb einer Zeiteinheit, d. h. 4 Monate).

Verwendete Bezeichnungen:

P	Preis, aktuell (veränderbare Anschaffungs- und Update-Kosten)
P _{min} /P _{max}	Preis, minimal/maximal (vorgegebene Grenzwerte)
M	marktunterstützende Maßnahmen, aktuell (veränderbar)
M _{min} /M _{max}	marktunterstützende Maßnahmen, minimal/maximal (vorgegebene Grenzwerte)
W	Werbequote ($0 \leq W \leq 1$)
NA	Nutzeranteil für das System in Abhängigkeit von P, M und W (% der Pkw)
NA _{max}	Nutzeranteil, maximal (vorgegebener Grenzwert)
NA _{akt}	Nutzeranteil, aktuell (unter Berücksichtigung der zeitlichen Entwicklung)

Berechnung des Nutzeranteils:

$$\begin{aligned}
 NA &= [0,5 \cdot (P - P_{\min}) / (P_{\max} - P_{\min}) + 0,4 \cdot (M - M_{\min}) / (M_{\max} - M_{\min}) + 0,1 \cdot W] \cdot NA_{\max} \\
 NA_{\text{akt}} &= [NA_{\text{akt}} + (NA - NA_{\text{akt}})] \cdot [1 / (1 + (3 \cdot (1 - (M - M_{\min}) / (M_{\max} - M_{\min}))) + (1 \cdot (1 - W)))]
 \end{aligned}$$

2.4.5.3 Weitere Berechnungsansätze

Für alle bisher noch nicht vorgestellten Beziehungen des Wirkungsmodells, die in einer Übersicht in Anlage B3 zusammengestellt sind, werden die Berechnungsansätze im folgenden überblicksmäßig dargestellt, dies betrifft die Bereiche:

- Geschwindigkeiten und Reisezeiten
- Parkraumauslastung, Parksuchzeiten und Parksuchverkehr
- Schwerverkehr
- Öffentlicher Personennahverkehr

Geschwindigkeiten und Reisezeiten:

Die zur Berechnung der Geschwindigkeiten und Reisezeiten erforderlichen Größen sind einerseits Ergebnisse der Verkehrsumlegung (z. B. Fahrzeiten), andererseits aber auch Daten aus dem Infrastrukturmodell (z. B. Zu- und Abgangszeiten). Im Einzelnen betrifft dies die Zielvariablen:

- Mittlere Reisezeit MIV (U1)
- Mittlere Reisezeit ÖPNV (U6)
- Mittlere Geschwindigkeit MIV (U10.2)
- Mittlere Beförderungsgeschwindigkeit ÖPNV (U11.2)
- Reisezeitdifferenz ÖPNV zu Pkw (M8.2)

Alle Daten aus anderen Teilmodellen (Fahr- und Parksuchzeiten, Zu-, Abgangs- und Umsteigezeiten, MIV-Streckenlängen, ÖPNV-Beförderungsstrecken) werden dabei zur Integration in das Wirkungsmodell über die gesamte Stadt aggregiert und stellen somit Mittelwerte dar (vgl. Kapitel 3).

Parkraumauslastung, Parksuchzeiten und Parksuchverkehr:

Die Berechnung der Parksuchzeiten und des Parksuchverkehrs erfolgt auf Grundlage der im Verkehrsnachfragemodell ermittelten Zielverkehre für die einzelnen Verkehrsbezirke. Dazu werden die Zielverkehre (entsprechend des Parkplatzangebotes) auf die einzelnen Parkplätze verteilt. Die Berechnung erfolgt dabei auf Grundlage eines im Rahmen der Entwicklung des Verkehrssimulationsspiels MOBILITY erarbeiteten Ansatzes [Conr99]. Im Einzelnen betrifft dies die Zielvariablen:

- Mittlere Parksuchzeit MIV (U3)
- Bußgelder StVO (E15)
- Mittlere Parksuchzeit Microcar (U4)
- Betriebliche Vorteile Microcar zu Pkw (M10)
- Parksuchverkehr (U15)

Dabei gibt es für den Übergang einer Quelle (hier: Parkplatzsucher im Zielbezirk) zu einer Senke (hier: Parkplätze im Zielbezirk) eine bestimmte Attraktivität, die die Entfernung und die mit dem Übergang (Parkplatzsuche) verbundenen Kosten berücksichtigt.

Zur Bestimmung der Attraktivität einer Senke werden folgende Faktoren berücksichtigt:

- Grundattraktivität, die sich aus Größe und Preis ergibt
- Verhältnis von tatsächlicher zu maximaler Auslastung (getrennt nach Pkw und Microcar)
- Entfernung der Senke von der Quelle
- Ausstattung des Parkhauses (Parkleitsystem, Parkplatzreservierungssystem)

Jeder Bezirk besitzt zwei Quellen, d. h. eine für „normale“ Pkw und eine für Microcars, da das Parkplatzangebot getrennt nach diesen beiden Fahrzeugtypen erfolgt.

Ebenso besitzt jeder Bezirk zwei Senken, wobei zusätzlich zwei Arten unterschieden werden: die Parkhäuser bzw. Parkplätze (werden durch den Spieler explizit gebaut) und die Parkflächen entlang von Straßen bzw. in Gebäuden (werden entsprechen der Flächennutzung und der Bebauungsdichte nur rechnerisch berücksichtigt). Dabei wird jeder Parkplatz beschrieben durch die Anzahl der Stellplätze sowie die Parkgebühren (jeweils getrennt nach Pkw und Microcar).

Die Berechnung der Auslastungsgrade der einzelnen Parkplätze erfolgt über einen differentiellen Ansatz, d. h. die Quellen werden langsam gefüllt, die Füllung der Senken erfolgt dabei simultan entsprechend der aktuellen Attraktivitäten. Über die differentiellen Zunahmen des Parkstundenbedarfs wird über die Attraktivitäten berechnet, in welche Senken dieser Bedarf abfließt.

Auf Grundlage der berechneten Auslastung der einzelnen Parkplätze und der damit verbundenen Ermittlung der Verteilung der Parkplatzsucher u. U. auch auf umliegende Parkplätze wird die Parksuchzeit für jeden Bezirk berechnet.

Zur Berechnung der Bußgelder wird davon ausgegangen, dass bis zu einer Auslastung der Parkstände von 100% ein bestimmter Anteil von Parkvorgängen regelwidrig erfolgt, wovon wiederum ein bestimmter Anteil geahndet wird. Bei Auslastungen der Parkstände von 100%...125% parken bis zu 25% der Fahrzeuge regelwidrig. Auslastungen über 125% werden nicht berücksichtigt, da davon ausgegangen werden kann, dass sich die Anzahl der Fahrten in das Zielgebiet entsprechend reduziert (Ausweichen auf andere Gebiete, Verkehrsmittel oder Tageszeiten).

Parkleitsysteme können die Parksuchzeit um bis zu 35% senken. Vereinfacht wurde angenommen, dass die Nutzer der Stellplatzreservierung prinzipiell keine Parksuchzeit haben.

Die betrieblichen Vorteile der Microcars gegenüber dem „normalen“ Pkw resultieren aus dem Vorhandensein entsprechender Stellplätze für diese Fahrzeuge und werden durch das Verhältnis der Parksuchzeiten zueinander beschrieben.

Schwerverkehr:

Der *Anteil Schwerverkehr* (M4) ist als (zusätzlicher) Verkehr zum umgelegten MIV hinsichtlich der Fahrleistungen zu verstehen. Der Ansatz basiert auf der vereinfachenden Annahme, dass der Schwerverkehrsanteil, in Abhängigkeit von der Variable *Nachfrage nach Transport von Gütern* (M5), zwischen 5% und 20% liegt.

Öffentlicher Personennahverkehr:

Die Berechnung der erforderlichen *Anzahl der ÖPNV-Fahrzeuge Bus / Stadtbahn* (I6) erfolgt auf Grundlage der *Taktzeiten* (I5) und Streckenlängen für die einzelnen Linien sowie der Geschwindigkeiten unter Berücksichtigung der Verkehrsbelastung durch den MIV. Dabei werden evtl. vorhandene Busspuren und sofern eingerichtet die *ÖPNV-Priorisierung* (K5.1) an Kreuzungen berücksichtigt.

Die *mittlere Zu- und Abgangszeit ÖPNV* (U8) ergibt sich vereinfacht als Luftlinienentfernung aus der *Haltestellendichte* (I4) unter Berücksichtigung einer mittleren Geschwindigkeit der Fußgänger von 4 km/h. Für PTA-Nutzer wird eine pauschale Reduzierung der die Zu- und Abgangszeiten um 20% angenommen.

Die *mittlere Umsteigezeit ÖPNV* (U9) wird auf Basis der umgelegten Fahrtwünsche, d. h. unter Berücksichtigung der Anzahl Umsteigevorgänge je Fahrt, sowie der *Taktzeiten* (I5) der beteiligten Linien ermittelt. Dabei wird zusätzlich ein Umsteigeaufwand von 1 min angesetzt.

2.5 Funktionsweise

Nachdem in den vorangegangenen Abschnitten die einzelnen Elemente des Wirkungsmodells einschließlich deren Quantifizierung vorgestellt wurden, wird hier deren Zusammenwirken im gesamten Wirkungsmodell auf Basis einiger Aspekte zur Implementierung erläutert werden:

Das Wirkungsmodell ist ein gerichteter Graph mit Quell- und Zielrelationen. Es kann als **zeitdiskretes, deterministisches, ereignisorientiertes Sender-Empfänger-Modell** bezeichnet werden, in dessen Knoten abschnittsweise diskretisierte Prozesse mit individueller Prozessdynamik ablaufen. Jeder Knoten ist i. d. R. zugleich Sender (d. h. Quellvariable) als auch Empfänger (d. h. Zielvariable). Ausnahmen sind die Start- und Endpunkte von Wirkungsketten.

Die (Zustands-)Variablen des Systems, die in der Regel reale Größen mit unterschiedlichen Einheiten repräsentieren, werden für die Simulation sinnvoll begrenzt (Festlegung von Minimal- und Maximalwert) und einheitlich auf einen Wertebereich zwischen *null* und *eins* normiert. Der begrenzte Wertebereich aller Variablen ermöglicht die Modellierung eines dynamischen Sättigungsverhaltens der Variablen, d. h. mit Annäherung an die Grenzwerte werden die Wirkungen bei gleicher Intensität der Ursache geringer. Auf diese Weise kann realitätsnah eine situationsabhängige Dämpfung der Reaktionen im Modell erreicht werden. Die Normierung dient außerdem der geschlossenen Beschreibung von Wirkungsbeziehungen mit unterschiedlichen Dimensionen.

Veränderungen der (Zustands-)Variablen des Modells werden über eine Dynamisierung des Netzes erreicht. Qualitative und/oder quantitative Änderungen der Eingangsgrößen (Startpunkte der Wirkungsketten) führen nach Art eines „Schneeballsystems“ zur Ausbreitung der Wirkungen im gesamten Netz und münden schließlich in einem neuen determinierten Folgezustand des Systems. Dabei treten mehrfach Rückkoppelungen über Ringstrukturen auf. Auf diese Weise entstehen Zustandsfolgen, die über die Zeit abgebildet die Entwicklung verkehrlicher Größen einer Stadt auf makroskopischer Ebene ermöglichen.

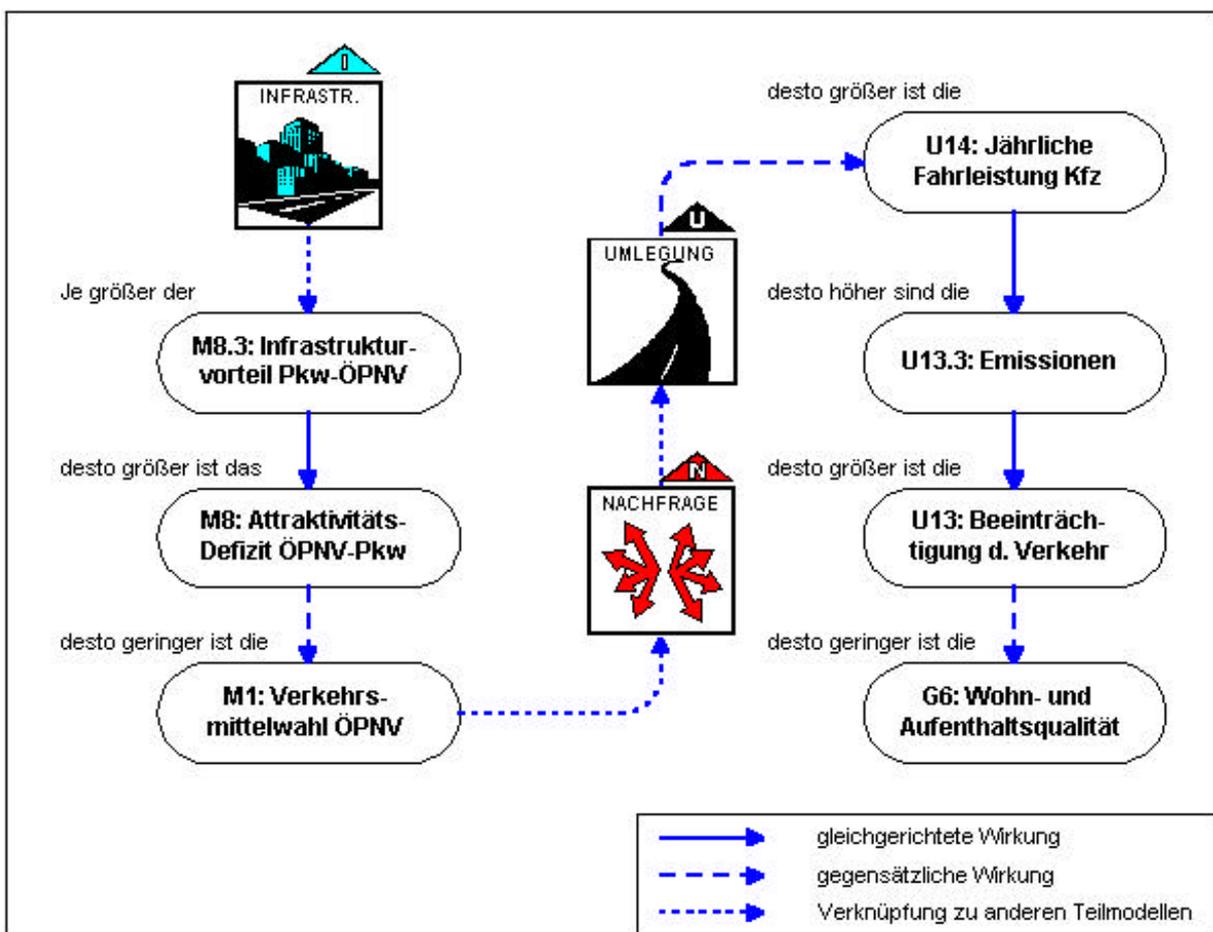


Abb. 2.7: Beispiel einer Wirkungskette

Da nicht nur einzelne Wirkungsketten, sondern ein komplexes Wirkungsnetz existiert, entsteht ein Geflecht paralleler Prozesse. Die Abbildung und Dynamisierung solcher Strukturen erfordert den Einsatz spezieller Modellierungsmethoden und -werkzeuge, die insbesondere eine Zeitmodellierungskomponente besitzen und parallele Abläufe berechnen können. Die Autoren haben sich für das Modellierungstool *PACE* entschieden, das auf der Theorie erweiterter Petri-Netze basiert und eine Zeitmodellierung zulässt. Dabei erfolgt der Austausch von Informationen zwischen kausal

verbundenen Prozessen über attributierte Informationsträger (sogenannte *Token* nach Petri-Netz-Terminologie).

Die kleinste Dauer eines Prozesses beträgt eine Zeiteinheit (ZE). Prozesse mit größeren Prozessdauern verlaufen über entsprechend viele ZE mit gleich vielen Prozessabschnitten. Die Intensität des gestarteten Prozesses ergibt sich aus der Stärke der Ursache (hier: Spielereingriff) und wird nach einem typischen Verlauf des initiierten Prozesses (Übergangsfunktion) auf dessen Abschnitte verteilt. Die Prozessabschnitte werden modellintern gekennzeichnet und können so auf ihren Wegen durch das Wirkungsnetz identifiziert werden, sofern der gestartete Prozess weitere Folgeprozesse auslöst.

Ergebnis eines jeden Prozessabschnittes sind die Wertveränderungen einer oder mehrerer mit diesem Prozess verbundener Quellvariablen, die wiederum Folgeprozesse auslösen und zugehörige Zielvariablen verändern. Intensität und Ende einer Ursache bestimmen den Beginn und die Stärke eines Folgeprozesses, dessen allgemeine Dynamik als empirisch ermittelter Verlauf bekannt ist und im Modell mit aktuellen Werten versehen konkret generiert wird.

2.6 Validierung

Gegenstand der Validierung ist das in den vorangegangenen Abschnitten beschriebene Wirkungsmodell, sowohl in der PACE-Implementierung (als Referenz) als auch in der C++ - Implementierung im Verkehrssimulationsspiel MOBILITY, hier sozusagen als autonomes Teilmodell (ohne Berücksichtigung der Rückkopplungen über das Verkehrsnachfrage- und Umlegungsmodell).

Die Validierung des Modells erfolgte dabei unter dem Aspekt seiner Zweckbestimmung, möglicher Nutzungsformen unter Beachtung der verwendeten Entwicklungsmethoden und -verfahren, in erster Linie aber aus der Forderung nach Abbildung und Dynamisierung von unabhängigen, dem Gegenstand innewohnenden, objektiven, inhaltlichen, gesetzmäßigen Zusammenhängen.

Die Validierung des Wirkungsgefüges erfolgte in 3 Stufen:

- Validierung der Menge aller Modellelemente im Sinne einer Überprüfung der Auswahl aller einbezogenen Modellvariablen
- Bewertung ihrer bilateralen Beziehungen:
 - Qualitative, tendenzielle Bewertung von Prozessabschnitten mit direkter Kausalität
 - Quantitative Bewertung des unmittelbaren funktionalen Zusammenhangs und die
- Validierung des komplexen Wirkungsmodells (als Gesamtsystem)
 - Strukturelle Verflechtungen der Modellelemente
 - Dynamisches Gesamtverhalten des Modells inkl. Rückkopplungen

Formal methodisch wurden dazu Expertenbefragungen und -diskussionen auf der Grundlage des gesicherten Wissens anerkannter Fachliteratur [Boss94; Gaus96; Vest96] durchgeführt, Trendsituationen, Extremwerte, Grenzzustände, Szenarien, Zustandsfolgen u. ä. als Varianten simulativ erzeugt, verglichen und auf Widerspruchsfreiheit, Konvergenz, Konsistenz (konsistente Startsituationen, dynamische Zustandsfolgen und Endzustände der Simulation) und Plausibilität hin getestet und bewertet.

Kausale Wirkungskreise wurden zunächst aufgetrennt und als baumartige Strukturen ohne Rückkopplung behandelt, um so vereinfacht (von jeweils einer unabhängigen Variablen ausgehend) Impulse auf die Vielzahl abhängiger Variablen tendenziell verfolgen und teilweise quantitativ vorhersagen und bewerten zu können. Die Ergebnisse dieser *simple-forward-simulations* dienen der

Abschätzung des Gesamtsystemverhaltens unter vollständiger Kausalität inklusive Rückkopplungen und kontraproduktiver Wirkungen.

Die Bewertung der Simulationsergebnisse erfolgte zum einen an zuvor aufgestellten Hypothesen zu erwartender Werte einzelner Modellausgänge und an Vorhersagen komplexen Verhaltens des Gesamtmodells infolge Änderung einzelner oder aber auch gezielt ausgewählter Mengen von Modelleingängen mit thematischer Orientierung und szenarischer Gestalt. Im Falle der Übereinstimmung von Hypothese und Simulationsergebnis konnte eine geplante, subjektiv gewollte Modelldynamik als modelliert angesehen werden. Insofern gleiche Zustände des Modells mit unterschiedlichen Strategien erreichbar schienen, wurde diese erzeugt und verglichen. Damit ergaben sich größere Sicherheiten hinsichtlich widerspruchsfreier und inhaltlich homogener Abbildung der Realität und ihrer Dynamik.

Zum anderen lieferten formale Untersuchungsmethoden, wie die schrittweise Änderung von Modellein- und -ausgängen, letztere als kausale Wirkung gemessen und in Relation zu den veränderten Eingängen gesehen, Hinweise auf Kontinuität, Stabilität, Tendenztreue und Abbildung korrelativer Zusammenhänge im Modell. Damit waren Aussagen über die Qualität und Sicherheit des Modells bezüglich seiner Ergebnisse bis in Bereiche nichtlinearen Grenzverhaltens möglich. Im Brainstorming intuitiv konstruierte Hypothesen von Systementwicklungen oder zu erwartender Änderungen von Ausgangszuständen infolge variiertener Eingangsgrößen des Modells basieren auf der Menge aller plausibel nachvollziehbaren direkten und indirekten Wirkungen, die mit einer ausgewählten Zielstellung korrelierten und für die zu erwartende Tendenzen von Bedeutung schienen.

Der Nachweis realitätsnahen Verhaltens eines solchen Modells in seiner komplexen Gesamtheit gestaltet sich erfahrungsgemäß schwierig. Er ist ansatzweise an kurzfristig wirkenden Systemzusammenhängen und damit für isoliert betrachtete Wirkungsmechanismen, nicht aber in voller Ausprägung und zeitlicher Ausdehnung, im Vergleich mit realen ablaufenden Prozessen möglich. Die Validierung des Wirkungsmodells als Gesamtsystem lieferte folgende Resultate:

- **Konsistenztest des Gesamtsystems**

Ergebnis: Alle Variablen bleiben in den vorgegebenen Grenzen. Die Wirkungen klingen nach praxishen Zeiträumen ab und führen relativ schnell zu stabilen Systemzuständen.

- **Überprüfung des Einflussbereiches und der Wirkungstiefen von Einzelursachen**

Ergebnis: Die im Modell angesprochenen Wirkungsbereiche spiegeln reale Zusammenhänge wider.

Beispiel: In der Abb. 2.8 sind die Reaktionen der beeinflussten Variablen auf die stufenweise Veränderung der Quellvariablen *Umweltorientierte Öffentlichkeitsarbeit (G3)* von ihrem Initialisierungswert ($G3_{init} = 0,0$) bis zu ihrem Maximalwert ($G3_{max} = 1,0$) dargestellt.

- **Gegenüberstellung des tendenziellen Verhaltens von Einzelursachen und deren Wirkungen**

Ergebnis: Die Wirkungen von Einzelursachen sind qualitativ richtig abgebildet. Die schrittweise Veränderung von Einzelvariablen hat adäquate Veränderungen des angesprochenen Wirkungsbereiches ergeben.

- **Untersuchungen zum Grenzverhalten einzelner (Ziel-)Variablen**

Ergebnis: Das Modell zeigt ein gewünschtes Sättigungsverhalten in grenznahen Bereichen. Die Maximal- bzw. Minimalwerte werden jedoch kaum erreicht.

- **Überprüfung von Verhaltenshypothesen**

Ergebnis: Die Untersuchung formaler Extremzustände mit Hilfe von Szenarien führte zu plausiblen Werten der jeweils betrachteten Zielgrößen.

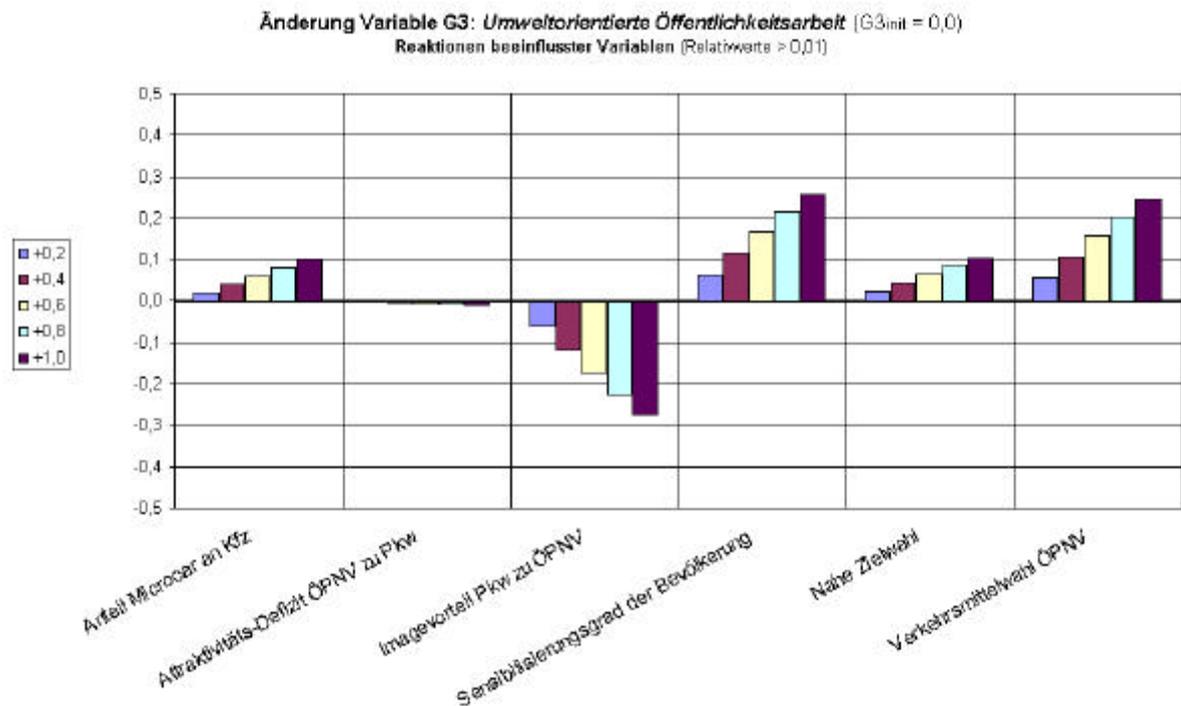


Abb. 2.8: Einzelursachen und ihre Wirkungen (Beispiel)

Aus der Definition aller bilateraler Wirkungsbeziehungen des Modells auf dem Wege der Expertendiskussion mit dem Ziel größtmöglicher Objektivität und Praxisbezogenheit in der Modellierung ihrer inhaltlichen und wertmäßigen funktionalen Zusammenhänge folgt zwar nicht zwangsläufig reales Systemverhalten des gesamten Modells, ergeben sich aber wesentliche Momente relativer Sicherheit bezüglich der Abbildung annähernd realen Verhaltens des komplexen Gesamtsystems.

Die Szenariomethode liefert zu diesem Thema einige Möglichkeiten und Ansätze, um Modelldynamik in ihrer Komplexität zu testen und zu bewerten. So wurden Szenarien formaler Extremzustände und inhaltlich orientierter Endzustände mit realem Hintergrund und thematischen Zielstellungen im Sinne von best- und worstcase auf explorativem Wege erzeugt und bewertet. Die simulative Entwicklung solcher Szenarien bzw. ganzer Szenariofolgen basiert auf dem Wege der einmaligen oder mehrfachen Veränderung unabhängiger steuerbarer Variablen in sich homogener Startsituationen, in denen alle Modellvariablen, wie in der Momentaufnahme eines realen widerspruchsfreien Systems aufeinander abgestimmte Werte besitzen und zueinander konsistent sind.

Die Berechnung widerspruchsfreier Startsituationen erfolgt in einem speziellen Iterationsprogramm, in dem die frei gewählten Ausgangswerte aller Variablen so oft zyklisch wiederholt aufeinander abgestimmt werden, so lange sich wegen offener Widersprüche Veränderungen in der Stadt vollziehen (siehe Abb. 2.9).

Jede theoretisch konstruierte Startsituation des Modells muss deshalb zunächst widerspruchsfrei eingestellt und, initialisiert werden, um auf dem Wege ihrer simulativen Fortschreibung homogene bzw. konsistente Folgezustände erzeugen zu können. Die Simulation realer Systemveränderungen kann dann als die zeitbehaftete oder zeitverbrauchende Initialisierung von Ausgangssituationen verstanden werden und garantiert, wie die Initialisierung selbst, gleichermaßen dynamische Konsistenz des Modells und zulässige Ergebnisse. Alle aus einer konsistenten Ausgangssituation

hergeleiteten Modellderivate sind wegen des stets gleichbleibenden funktionalen Zusammenhangs seiner Modellelemente folgerichtig wieder konsistent.

Die Berechnung der Variablenwerte erfolgt, wie in der Ringstruktur des o. g. Beispiels angegeben, gemäß des durch die Pfeilrichtung ausgewiesenen und in den Berechnungsvorschriften definierten strukturellen und funktionalen Zusammenhangs.

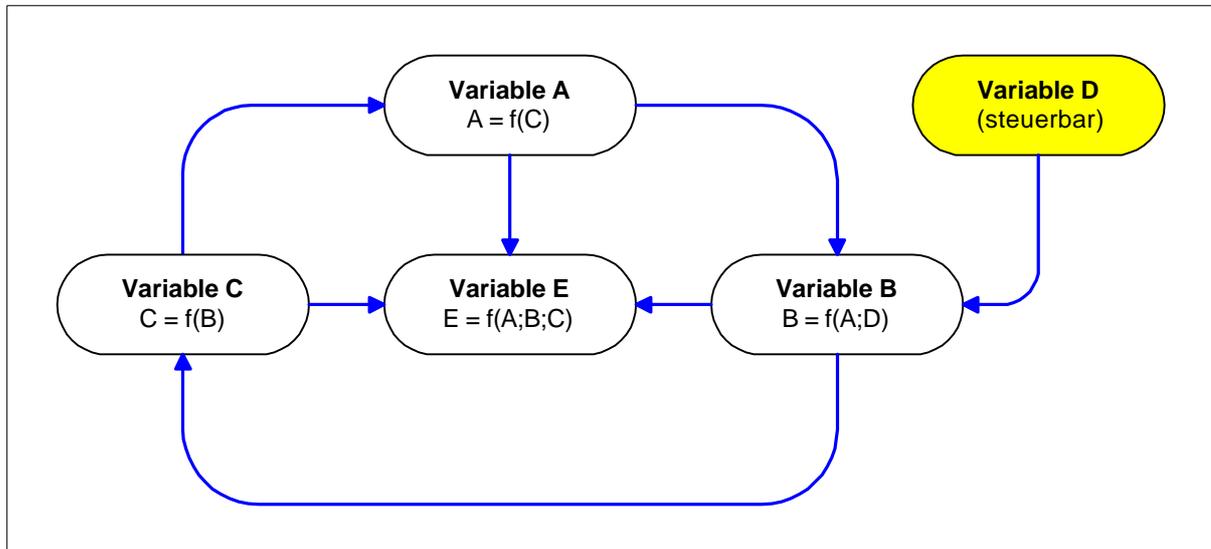


Abb. 2.9: Bestimmung der Initialisierungswerte (Prinzipbeispiel)

Die Werte der abhängigen Variablen des Beispiels (A, B und C) ergeben sich dabei in direkter bzw. indirekter wechselseitiger Abhängigkeit ihrer selbst und in Abhängigkeit des Variablenwertes von D, der einzigen unabhängigen (steuerbaren) Variablen des Beispiels mit ihrem dafür zur Verfügung stehenden Wertevorrat (normiert: $W(D) = \{0, 1\}$). Die Variable E, wird als Senke des Netzes in Abhängigkeit von A und B ermittelt.

Eine Änderung des Variablenwertes von D stört zunächst das Gleichgewicht des Beispielmodells, das durch mehrfach wiederholte, iterative Neuberechnungen aller anderen Variablenwerte, auf verändertem Niveau wieder hergestellt wird. Damit ist die dynamische Konsistenz nach Abschluss jeder Iteration (d. h. nach Stabilisierung aller Variablenwerte) gesichert.

Den normierten Grenzwerten *null* und *eins* aller unabhängigen Modelleingänge wurden per Expertendiskussion reale Absolutwerte praxisnah so zugeordnet, dass das zugehörige Gleichungssystem stets eine Lösung hat. Die nichtnormierten Wertebereiche aller abhängigen Variablen ergeben sich, wie die Initialisierungswerte, über deren funktionalen Zusammenhang und konnten an den normierten Grenzen *null* und *eins* getestet werden.

Das Wirkungsmodell selbst und das Lösungsverfahren zur Simulation von Folgezuständen des Systems wurden auf zwei unterschiedlichen Wegen voneinander unabhängig rechentechnisch implementiert. Der anschließende Vergleich der Simulationsergebnisse erbrachte stets zulässige, praxisnahe, wiederhol- und nachvollziehbare gleiche plausible Lösungen beider Programme, so dass der Schluss einer in sich logischen, realitätsnahen Abbildung und Simulation des Wirkungsmodells mit Einschränkungen bezüglich beabsichtigter Vereinfachungen und Verallgemeinerungen, gewählter Grenzen und Detaillierung bzw. angestrebter Vollständigkeit und Komplexität zulässig ist.

Gleiche Ausgangssituationen und gleiche Modelleingänge führten in beiden Implementierungen stets zu gleichen Ergebnissen. Insofern konnte das Kriterium der Konvergenz des Modells als erfüllt angesehen werden, auch wenn nicht alle möglichen Lösungen ermittelt wurden. Die Anzahl der

Lösungen (Folgezustände) ist wegen der Stetigkeit des Problems unendlich, der Wertebereich jedoch begrenzt.

Das Wirkungsmodell bildet den zentralen Kern des Verkehrssimulationsspiels MOBILITY und liefert in Wechselwirkung mit allen weiteren enthaltenen Teilmodellen (Verkehrsnachfrage, Verkehrsumlegung, Stadtentwicklung, Finanzen) ebenfalls annähernd gleiche Ergebnisse, die sich proportional zu den *stand-alone-Berechnungsergebnissen* des Wirkungsmodells selbst verhalten. Unterschiede zwischen den verglichenen Lösungen ergeben sich insbesondere durch die Rückkopplungen aus dem in MOBILITY integrierten Verkehrsumlegungsmodell, und der damit verbundenen iterativen Berechnungen.

In beiden unabhängig von einander implementierten Lösungen (PACE und MOBILITY) blieben jedoch alle Variablenwerte während der Tests in ihren vorgegebenen Grenzen und die Wirkungsketten klangen immer in akzeptablen Zeiträumen ab.

Die Überprüfung der Einflussbereiche, Eindringtiefe, Ausbreitungsgeschwindigkeit, Trägheit und Wirkungsintensität von Ursachen ergab ebenfalls praxistypisches Verhalten des Modells mit nichtlinearer Wertentwicklung aller Variablen in ihren Randbereichen. Auf komplexe Zielsituationen orientierte Einstellungen mehrerer Variablen (Szenarien) lieferten stets plausible, nachvollziehbare Ergebnisse.

3 Gesamtmodell MOBILITY

In diesem Kapitel wird die Modellstruktur der Verkehrssimulation MOBILITY vorgestellt. Neben der inhaltlichen, funktionalen Beschreibung der einzelnen Modelle wird im besonderen die Interaktion der Teilmodelle untereinander beschrieben. Der Fokus liegt dabei in der Integration des Wirkungsgefüges (siehe Kapitel 2) und die damit verbundenen gegenseitigen Beeinflussungen.

3.1 Modellstruktur

Die Struktur der Verkehrssimulation MOBILITY besteht aus sechs Teilmodellen (siehe Abb. 3.1):

1. Wirkungsgefüge
2. Verkehrsnachfragemodell
3. Verkehrsumlegungsmodell
4. Infrastrukturmodell
5. Finanzmodell
6. Stadtentwicklungsmodell

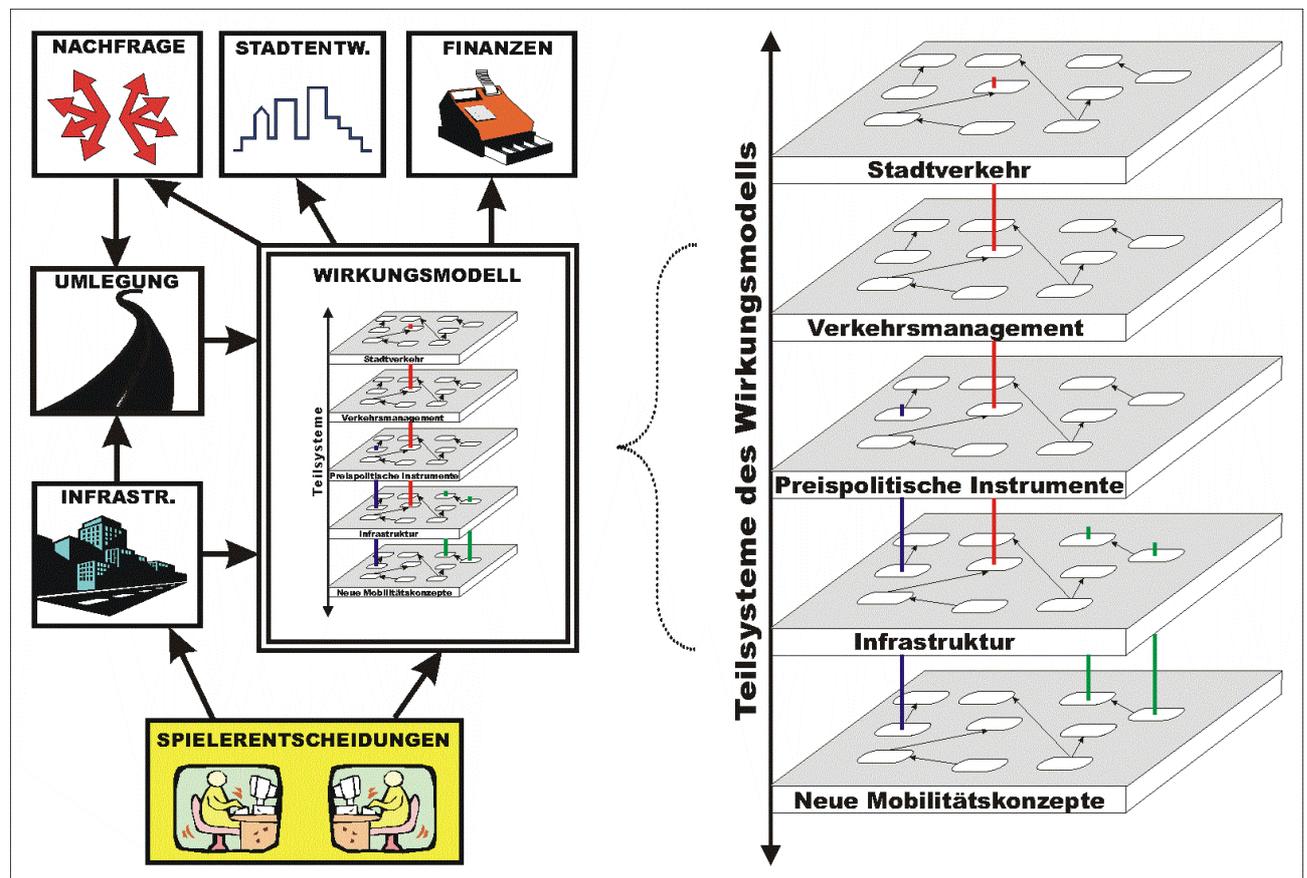


Abb. 3.1: Modellstruktur der Verkehrssimulation MOBILITY

Kern des Gesamtsystems ist das Wirkungsmodell, das insbesondere die Auswirkungen der Spielereingriffe mittels Simulation ermittelt und verantwortlich für die, den Spieler bewertenden Indikatoren ist. Aus verkehrlicher Sicht sind des weiteren die Modelle Verkehrsnachfrage und Verkehrsumlegung relevant. Die anderen Teilmodelle sind in erster Linie für das *Gameplay* bedeutsam.

3.2 Eingriffsmöglichkeiten des Spielers

Der Spieler hat vielfältige Möglichkeiten auf das Geschehen seiner Modellstadt einzuwirken. Sein Handeln beeinflusst dabei unmittelbar den Ablauf und die Qualität des Verkehrs. Die Aktionsmöglichkeiten werden von seinem Finanzbudget begrenzt, das sich aus allen Einnahmen und Ausgaben – resultierend aus seinem individuellen Handeln – zusammensetzt.



Abb. 3.2: Screenshot der Verkehrssimulation MOBILITY

Im wesentlichen hat der Spieler folgende Möglichkeiten „seine“ Stadt zu steuern:

- Bestimmung der Flächennutzung (Wohnbebauung, Gewerbe, Industrie)
- Aufbau der Infrastruktur (Straßennetz, ÖPNV-Netz)
- Management des Verkehrsbetriebes für den ÖPNV (Organisation, Personal, Fuhrpark, Liniennetz, Taktzeiten, Fahrpreise)
- Auf- und Ausbau von „neuen Mobilitätskonzepten“ (Telematik, Carsharing, Mobilitätszentrale, Microcars)
- Parkraummanagement (Bau von Anlagen des ruhenden Verkehrs, Parkgebühren, Berücksichtigung von Microcars)
- Finanzpolitische Entscheidungen (Mineralölsteuer, Mehrwertsteuer, Investitionen in Forschung und Marketing)

3.3 Teilmodelle

3.3.1 Verkehrsnachfragemodell

Die Verkehrsnachfrage wird mit einem Modell für verhaltenshomogene Gruppen abgebildet. Das Modell bestimmt neben Quellen und Zielen des Verkehrs auch das für den jeweiligen Weg gewählte Verkehrsmittel. Die Berechnungen lehnen sich eng an das von Sparmann entwickelte Modell Orient [Spar80] an. Jedoch wurden an einigen Stellen, für die Integration in MOBILITY notwendige,

Anpassungen vorgenommen. Das Modell liefert als Ergebnis stündliche, verkehrsmittelbezogene Fahrtenmatrizen, d. h., es beinhaltet die Verkehrserzeugung, die Verkehrsverteilung, die Verkehrsaufteilung und die tageszeitliche Verteilung. Die für MOBILITY festgelegten Kenngrößen sind der Anlage N zu entnehmen.

3.3.2 Verkehrsumlegungsmodell

Das Modell für die Verkehrsumlegung bestimmt die Fahrtroute für die von der Verkehrsnachfrage ermittelten Wege. Da der nichtmotorisierte Individualverkehr (zu Fuß, Fahrrad) in der Regel die wegekürzeste Verbindung wählt, wird bei den Berechnungen einer Verkehrsumlegung in erster Linie der motorisierte Individualverkehr und ggf. der öffentliche Verkehr berücksichtigt. Dabei ist die Fahrzeit auf einer Strecke eine Funktion von Kapazität und Auslastung der Strecke. Bei Kreuzungen werden die Verlustzeiten aus Abbiegebeziehung, Vorfahrtsregelung und ggf. Steuerung der Lichtsignalanlage berechnet.

Folgende Strecken- und Knotenpunktstypen sind in MOBILITY integriert:

- Streckentypen (Kapazität je Fahrrichtung)
 - Nebenstraße (600 Kfz/24h)
 - Hauptstraße (1200 Kfz/24h)
 - Vierstreifige Hauptstraße (2400 Kfz/24h)
- Knotenpunktstypen:
 - Kreuzung mit Lichtsignalsteuerung
 - Kreuzung „Rechts-vor-Links“
 - Kreuzung mit Vorfahrtsregelung

Für die Integration des MIVs in MOBILITY wurde als Umlegungsverfahren ein *Sukzessives Best-Weg-Verfahren* mit Berücksichtigung von Kapazitätsbeschränkungen gewählt, dass die Fahrtenmatrix in drei Schritten (50%, 30%, 20%) auf das Netz umlegt. Die Berücksichtigung von Kapazitätsbeschränkungen ist in der begrenzten Durchlassfähigkeit von Verkehrsanlagen begründet. Bei hohen Verkehrsstärken kommt es zu Verlagerungen der Verkehrsströme auf weniger belastete Netzabschnitte. Grundlage für die verwendeten Kapazitätsbeschränkungen für die in MOBILITY verwendeten Streckentypen und Abbiegebeziehungen sind die Forschungsergebnisse von Ueberschaer [Uebe69].

Als Routensuchverfahren, also für die Berechnung der kürzesten Wege zwischen je zwei Knoten, wurde ein Algorithmus von Floyd-Warshall implementiert [Floy62] [Wars62]. Die Umlegungsberechnungen werden vierzehnmals je Simulationstag, d. h. für jede Stunde von 6 bis 20 Uhr, ausgeführt.

Die Umlegung der ÖPNV-Fahrten erfolgt in nur einem Schritt anhand des festgelegten Liniennetzes, der Umsteigemöglichkeiten und der Taktzeiten. Weitere Umlegungsschritte sind nicht erforderlich, da zum einen nur selten Alternativrouten vorhanden sind und zum anderen die Fahrzeiten des ÖPNV auch bei starker Auslastung der Fahrzeuge nicht wesentlich zunehmen. Für den nicht-motorisierten Verkehr (NMV) werden lediglich die Luftlinien als Grundlage für den kürzesten Weg benutzt.

3.3.3 Weitere Teilmodelle

Infrastrukturmodell

Das Infrastrukturmodell erfasst alle Informationen zur Qualifizierung der Bebauungsflächen und beschreibt die Verkehrsnetze des Individual- und des öffentlichen Verkehrs. Sämtliche flächenbezogenen Strukturdaten (Anzahl Einwohner, Arbeitsplätze, etc.) werden vom Modell ebenso erfasst wie die Typisierung der Straßen sowie Anlagen des ÖPNV und des ruhenden Verkehrs. Entsprechend den Anforderungen der anderen Teilmodelle werden die erfassten Informationen aufbereitet und zur Verfügung gestellt.

Stadtentwicklungsmodell

In Abhängigkeit von verschiedenen Spiel-Indikatoren berechnet das Stadtentwicklungsmodell das Wachstum der Stadt. Das in MOBILITY verwendete stochastische Migrationsmodell beruht auf einem dynamischen und nichtlinearen Entscheidungsmodell, das über die Vielzahl individueller Wohnortentscheidungen der Bevölkerung das Migrationsgeschehen auf der Makroebene unter Berücksichtigung des Verkehrsgeschehens abbildet, d. h. die zeitliche Entwicklung der Bevölkerungszahlen einzelner Wohnorte oder Regionen wird unter Einbeziehung von Interaktionen der Bevölkerung untereinander modelliert. Die theoretischen Grundlagen für das Stadtentwicklungsmodell wurden vom Steinbeis-Transferzentrum Angewandte Systemanalyse entwickelt [Haag98].

Finanzmodell

Im Finanzmodell werden alle Ein- und Ausgaben bilanziert. Hier werden bspw. Kosten für die Infrastruktur, Erträge aus der Parkraumbewirtschaftung oder Einnahmen des Verkehrsbetriebes berücksichtigt. Im folgenden werden wichtige Ein- und Ausgabepositionen beispielhaft aufgeführt:

Ausgaben	Einnahmen
Bau Verkehrswege	Allgemeine Steuer
Unterhaltung Verkehrswege	Mehrwertsteuer
Erschließung Bebauungsgebiete (Flächen)	Kfz-Steuer (Pkw/Microcar)
Bau besonderer Gebäude (Einkauf, Freizeit, ...)	Mineralölsteuer
Bau Verkehrsanlagen (Parkplatz, LSA, ...)	Bewirtschaftung des ruhenden Verkehrs
Abriss (Gebäude, Verkehrswege, ...)	Fahrpreise ÖPNV
ÖPNV: Liniennetz, Haltestellen, Fuhrpark, Personal, Betriebskosten, Unterhaltungskosten, attraktivitätssteigernde Maßnahmen	Benutzungsgebühren Carsharing
Infrastruktur Telematikdienste	Nutzung von Telematikdiensten

Tab. 3.1: Auswahl wichtiger Bilanzierungspositionen des Finanzmodells

3.4 Zusammenwirken der Teilmodelle

3.4.1 Schnittstellen

Zwischen den einzelnen Teilmodellen gibt es Schnittstellen, die den Austausch von Eingabedaten, Informationen oder Ergebnissen ermöglichen. Im Mittelpunkt des Im- und Exports steht das Wirkungsmodell als Kernmodul der Verkehrssimulation MOBILITY. Im folgenden werden einige Details des Datenaustauschs erläutert:

Schnittstelle Wirkungsmodell - Verkehrsnachfragemodell

Einige Variablen des Wirkungsmodells haben direkten Einfluss auf Kenngrößen des Nachfragemodells. Die Variable *Motorisierungsgrad* (M7) beeinflusst bspw. die prozentualen Anteile der fünf verhaltenshomogenen Gruppen. Steigt der Motorisierungsgrad vergrößern sich die Anteile der Gruppen mit Pkw-Verfügbarkeit. Eine andere bedeutende Variable für das Nachfragemodell ist die *Verkehrsmittelwahl ÖPNV* (M1). Veränderungen dieser Variablen haben direkte Auswirkungen auf die Verkehrsmittelwahlwahrscheinlichkeiten bei der Verkehrsnachfragemodellierung. Die Steigerung des Wertes der Variablen *Nahe Zielwahl* (M3) verändert die Zielpotentiale der einzelnen Verkehrszellen zugunsten kürzerer Entfernungen.

Schnittstelle Verkehrsnachfragemodell - Verkehrsumlegungsmodell

Die aus der Verkehrsnachfrageberechnung gewonnenen verkehrsmittelbezogenen Fahrtenmatrizen gehen als Eingangsgrößen in das Umlegungsmodell ein. Insbesondere die Fahrtenmatrix für den MIV bestimmt die Verkehrsbelastung auf den Straßen der Stadt, deren Länge und Typisierung das Infrastrukturmodell liefert.

Schnittstelle Verkehrsumlegungsmodell - Wirkungsmodell

Aus den berechneten Verkehrsbelastungen der Umlegung werden Durchschnittswerte für das gesamte Straßennetz der Stadt gebildet, die wiederum in das Wirkungsmodell eingehen. Zu nennen sind hier die Variablen *Mittlere Fahrzeit MIV* (U5), *Mittlere Fahrzeit ÖPNV* (U7), *Mittlere Streckenlänge MIV* (U10.1), *Mittlere Beförderungsstrecke ÖPNV* (U11.1), *Jährliche Fahrleistung Kfz* (U14) und *Raumwiderstände* (U12).

Schnittstelle Wirkungsmodell - Finanzmodell

Wie bereits im Abschnitt 3.2 beschrieben, sind nahezu alle Aktivitäten des Spielers monetär behaftet. Viele dieser Aktivitäten werden zunächst vom Wirkungsmodell erfasst, das die entsprechenden finanziellen Konsequenzen an das Finanzmodell weitergibt.

Schnittstelle Infrastrukturmodell - Wirkungsmodell

Das Infrastrukturmodell gibt Auskunft über die Größe und Qualität der Verkehrsnetze. Aus diesen Angaben werden aggregierte Werte für das Wirkungsmodell erzeugt. Unter anderem werden folgende Variablen ganz oder teilweise vom Infrastrukturmodell bestimmt: *Nutzungsdichte* (I8), *Nutzungsmischung* (I9), *verkehrsbedingter Flächenverbrauch* (U13.2), *Wohn- und Aufenthaltsqualität* (G6).

Schnittstelle Wirkungsmodell - Stadtentwicklungsmodell

Die Variablen aus dem Wirkungsmodell *Standortkosten Wirtschaft* (G8), *Wirtschaftskraft* (G9), *Wohn- und Aufenthaltsqualität* (G6) und *Standortqualität für Arbeitsgelegenheiten* (G7) sind wichtige Indikatoren für das Wachstum einer Stadt und nehmen deshalb direkten Einfluss auf das Stadtentwicklungsmodell.

3.4.2 Zeitmodellierung und Simulationsablauf

In MOBILITY ist ein Jahr vergangen, wenn drei Simulationstage abgelaufen sind. Ein Simulationstag beginnt morgens um 6.00 Uhr und endet nach 14 Stunden um 20.00 Uhr. Zwischen zwei Simulationstagen wird zunächst die Simulation des Wirkungsmodells gestartet. Unter Berücksichtigung des o. g. Austauschs von Ergebnissen wird im Anschluss die Verkehrsnachfrage berechnet. Hier werden sogenannte Agenten „ausgelost“, denen auf Grund der festgelegten Wahrscheinlichkeiten erst der Wohnbezirk, dann die verhaltenshomogene Gruppe, die Aktivitätenkette, der Zeitpunkt der einzelnen Aktivitäten und schließlich die Zielbezirke zugeteilt werden. Unter Berücksichtigung der Verkehrsmittelwahrscheinlichkeiten, die tabellarisch in Abhängigkeit der festgelegten Entfernungs- und ÖPNV-Erschließungsklassen definiert wurden, werden den einzelnen Wegen Verkehrsmittel zugeteilt.

Nachdem für alle Einwohner (Agenten) der Stadt auf diese Weise ein verkehrlicher Tagesablauf erstellt wurde, werden stündlich (von 6.00 bis 20.00 Uhr) mit Hilfe des Verkehrsumlegungsmodelle die einzelnen Verkehrsnetze belastet. Am Ende des Simulationstages werden die Veränderungen der Variablenwerte des Wirkungsgefüges gegenüber des vorherigen Simulationstages festgestellt und für die Neuberechnung des Wirkungsmodells verwendet.

3.5 Indikatoren

Die Bewertung der Stadt - uns somit die Bewertung des Spielers - obliegt den drei Kriterien Effektivität, Qualität und Mobilität [Glam99]. Diese Kriterien werden durch dreizehn Indikatoren repräsentiert, die in folgender Tabelle namentlich aufgeführt sind.

Effektivität	Qualität	Mobilität
Kilometer pro Person und Tag	Emissionen pro Person	Erreichbarkeit
Fortbewegungsgeschwindigkeit	Lärm	Komfort/Bequemlichkeit
Staus	Energieverbrauch pro Person	Verkehrssicherheit
Mobilitätskosten pro Kilometer	Verkehrsflächenverbrauch pro Person	
Energieverbrauch pro Kilometer	Raumtrennung innerhalb der Stadt	

Tab. 3.2: Indikatoren zur Bewertung des Spielers

Die Indikatoren sind wie die Variablen des Wirkungsmodells normierte Werte zwischen 0 und 1. Die Indikatoren sind untereinander gleichgewichtet und bestimmen zusammen mit der Steuerquote, die sich aus den Steuern für Energie und Kfz, der Mehrwert- und einer allgemeinen Steuer zusammensetzt, das Stadtwachstum. Die 13 Indikatoren müssen im Durchschnitt mindestens den Wert 6,5 erreichen, damit das Stadtentwicklungsmodell positive Wachstumsraten ermittelt.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Simulation mobilitätsbezogener Wirkungszusammenhänge konnte mit Hilfe eines Modells auf makroskopischer Ebene im Programm PACE verwirklicht werden. Neben bekannten Abhängigkeiten des Stadtverkehrs wurden erstmalig auch neue, teilweise noch in der Entwicklung befindliche, Mobilitätskonzepte in das Modell integriert. Aufgrund des modularen Aufbaus des Wirkungsmodells ist eine Erweiterungsmöglichkeit gegeben. Thematische Erweiterungen in Richtung Wirtschafts- und Regionalverkehr sind angedacht.

Es hat sich gezeigt, dass die gewählte Vorgehensweise geeignet ist, komplexe Zusammenhänge der Stadtentwicklung und des Stadtverkehrs in ein Mobilitätsspiel zu integrieren. Die (für die Anforderungen an ein Computerspiel notwendige) Modifikation bekannter Algorithmen für die Modelle Verkehrsumlegung und Verkehrsnachfrage haben sich als zweckmäßig erwiesen. Ebenso hat sich die Ausgestaltung und Definition der Schnittstellen für die Integration in das Gesamtmodell MOBILITY als günstig herausgestellt.

Die umfangreichen Berichterstattungen in Tageszeitungen, Computerzeitschriften und im Internet verhalfen MOBILITY zu einer unerwartet hohen Popularität. Innerhalb der ersten Monate nach Veröffentlichung wurde MOBILITY über 100.000 mal über das Internet heruntergeladen, wurden etwa 50.000 CD-ROMs verschickt und in Verbindung mit auflagestarken Zeitschriften-CD-ROMs weiteren 500.000 potentiellen Nutzern zur Verfügung gestellt.

Durch seinen multimedialen Charakter ist MOBILITY in besonderer Weise für das Lernen bzw. bessere Verstehen von Verkehr und Mobilität geeignet. Mit großem Interesse wird die Einführung von MOBILITY in den Schulen im kommenden Schuljahr in Nordrhein-Westfalen und Hessen erwartet. Hierfür wurden eigens Schulungsunterlagen erstellt, die sich zum einen allgemein mit den Themen Verkehrsmittelvergleich, Stadt und Verkehr, Stadtmodelle sowie Verkehrsplanung und Zukunftsszenarien befassen und zum anderen an geeigneten Stellen den Einsatz von MOBILITY mit einbeziehen.

Darüber hinaus bietet MOBILITY hervorragende Voraussetzungen als Bildungssoftware erweitert zu werden. Dies würde die Simulation und Visualisierung komplexer verkehrswissenschaftlicher Inhalte, insbesondere die detaillierte Darstellung von Daten- und Simulationsergebnissen in 2D/3D, verbunden mit der didaktischen Aufbereitung der umfangreichen verkehrlichen Modellansätzen, ermöglichen.

Literaturverzeichnis

- [Albr94] Albrecht; Dölger; Sigler:
MOBIT.
Universität Frankfurt, 1994
- [Bons94] Bonsall:
PLUTO. Planning Urban Transport Options.
Universität Leeds, 1994
- [Boss94] Bossel, H.:
Modellbildung und Simulation. Konzepte, Verfahren und Modelle zum Verhalten
dynamischer Systeme.
2. Aufl., Vieweg-Verlag, Braunschweig/Wiesbaden, 1994
- [Bran92] Brannolte, U.; Leutzbach, W.:
Entwicklung von Planspieltechniken und Implementierung auf Microcomputern für den
Ausbildungsbereich Verkehr und Raumplanung.
Universität Karlsruhe, Institut für Verkehrswesen, 1992
- [Bran98] Brannolte, U.; Kraus, Th.:
Situationsanalyse über den Stand der Simulationsmodelle im Verkehrswesen
Forschungsprojekt im Auftrag des BMBF (19 K 9706 1), Schlussbericht, Weimar, 1998
- [Bran99] Brannolte, U.; Griesbach, W.; Harder, R.; Kraus, Th.:
Aktualisierung und Erweiterung von Planspielansätzen im Verkehrswesen im Hinblick auf
die Erstellung von Mobilitätsspielen.
Forschungsprojekt im Auftrag des BMBF (19 K 9801 4), Zwischenbericht, Weimar, 1999
- [Conr99] Conradi, Th.:
Abbildung des Parkraums in MOBILITY.
GLAMUS GmbH, Bonn, 1999 (interne Entwicklerdokumentation)
- [Eich98] Eichenauer, B.:
PACE. Ein Verfahren zur einheitlichen Bearbeitung von Analyse und
Entwicklungsvorhaben.
IBE Ingenieurbüro, Glonn, 1998
- [Floy62] Floyd, R. W.:
Algorithm 97 (shortest path).
Journal of the Association of Computing Machinery 5, 345, 1962
- [Gaus96] Gausemeier, J.; Fink, A.; Schlake, O.:
Szenario-Management. Planen und Führen mit Szenarien.
2. Aufl., Hanser Verlag, München/Wien, 1996
- [Glam99] Benutzerhandbuch MOBILITY.
Glamus GmbH, Bonn, 1999

- [Grie99] Griesbach, W.; Harder, R.; Kraus, Th.:
Simulation eines mobilitätsbezogenen Wirkungsgefüges für den Einsatz in
Mobilitätsspielen
In: Tagungsband 13. Symposium Simulationstechnik (ASIM), Hrsg.: G. Hohmann,
Weimar, 1999
- [Haag95] Haag, M.; Hupfer, Chr.:
Wirkungen von Verkehrsmanagement.
Universität Kaiserslautern, Fachgebiet für Verkehrswesen, 1995
- [Haag98] Haag, G.:
Darstellung der Bevölkerungsentwicklung im Rahmen von Mobility.
Steinbeis-Transferzentrum Angewandte Systemanalyse, Stuttgart, 1998 (interne
Entwicklerdokumentation)
- [Hard99] Harder, R.:
Simulation of a mobility-related network of interactions
In: Conference Modelling and Management in Transportation, Poznan-Krakow 1999
- [Prog99] Prognos - Europäisches Zentrum für Wirtschaftsforschung und Strategieberatung:
Einfluss der Liberalisierung von Verkehrsmärkten in den Europäischen Gemeinschaften
(EG) auf die volkswirtschaftliche Rentabilität erwogener Maßnahmen an der verkehrlichen
Infrastruktur für die Eisenbahn, den Kraftfahrzeugverkehr und die Binnenschifffahrt in
Deutschland.
Untersuchung im Auftrag des BMV, Endbericht, Bonn, 1999
- [Spar80] Sparmann, U.:
ORIENT. Ein verhaltensorientiertes Simulationsmodell zur Verkehrsprognose.
Schriftenreihe des IfV der Universität Karlsruhe, Heft 20, 1980
- [Uebe69] Ueberschaer, M.:
Die Aufteilung der Verkehrsströme auf verschiedene auf verschiedene Fahrtwege
(Routen) in Stadtstraßennetz auf Grund der Straßen- und Verkehrsbedingungen beim
morgendlichen Berufspendelverkehr.
Forschungsberichte Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, H. 85, Bonn, 1969
- [Vest90] Vester, F.:
Ausfahrt Zukunft. Strategien für den Verkehr von morgen.
Heyne-Verlag, München, 1990
- [Wars62] Warshall, S.:
A Theorem on Boolean matrices.
Journal of the Association of Computing Machinery 9, 11-12, 1962
- [Will80] Willumsen; Ortuzar:
GUTS. Game of Urban Transport System.
Universität Leeds, 1980
- [Wils70] Wilson:
Entropy in urban and regional modelling.
London, 1970