

Hesse, Claudia; Bohne, Simon; Evangelinos, Christos; Püschel, Ronny

Working Paper

Erreichbarkeitsmessung: Theoretische Konzepte und empirische Anwendungen

Diskussionsbeiträge aus dem Institut für Wirtschaft und Verkehr, No. 3/2012

Provided in Cooperation with:

Technische Universität Dresden, "Friedrich List" Faculty of Transport and Traffic Sciences, Institute of Transport and Economics

Suggested Citation: Hesse, Claudia; Bohne, Simon; Evangelinos, Christos; Püschel, Ronny (2012) : Erreichbarkeitsmessung: Theoretische Konzepte und empirische Anwendungen, Diskussionsbeiträge aus dem Institut für Wirtschaft und Verkehr, No. 3/2012, Technische Universität Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften, Dresden

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/57627>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“

DISKUSSIONSBEITRÄGE AUS DEM INSTITUT FÜR WIRTSCHAFT UND VERKEHR

NR. 3/2012

**CLAUDIA HESSE, SIMON BOHNE, CHRISTOS EVANGELINOS,
RONNY PÜSCHEL**

ERREICHBARKEITSMESSUNG: THEORETISCHE KONZEPTE UND EMPIRISCHE ANWENDUNGEN

**HERAUSGEBER: DIE PROFESSOREN DES
INSTITUTS FÜR WIRTSCHAFT UND VERKEHR
ISSN 1433-626X**

In den Diskussionsbeiträgen aus dem Institut für Wirtschaft und Verkehr der TU Dresden erscheinen in zeitlich loser Folge verkehrswirtschaftliche Arbeiten von allgemeinem Interesse. Die Diskussionsbeiträge enthalten Vorträge, Auszüge aus Diplomarbeiten, interessante Seminararbeiten, verkehrswirtschaftliche Thesenpapiere, Übersichtsarbeiten, ebenso wie Beiträge, die zur Veröffentlichung in referierten Zeitschriften vorgesehen sind. Allen Beiträgen gemeinsam ist wissenschaftliche Fundierung und wissenschaftlicher Anspruch, jedoch je nach Zweck des jeweiligen Beitrages in unterschiedlichem Maße. Die in diesem Diskussionsbeitrag vertretenen Standpunkte liegen ausschließlich in der Verantwortung der Autoren und decken sich nicht zwingend mit denen der Herausgeber.

Als Herausgeber fungieren die Professoren des Instituts für Wirtschaft und Verkehr der TU Dresden.

Erreichbarkeitsmessung: Theoretische Konzepte und empirische Anwendungen

Claudia Hesse^{1*}, Simon Bohne^{1}, Christos Evangelinos^{1*}, Ronny Püschel^{1*}**

* Professur für Verkehrswirtschaft und internationale Verkehrspolitik,
Institut für Wirtschaft und Verkehr, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“,
Technische Universität Dresden

**Rapp Trans AG, Verkehrs- und Transportberatung, Zürich

Abstract

Die Erreichbarkeitsforschung beschäftigt sich mit der Bewertung von Mobilität von Individuen zwischen Orten im Raum. Zur Quantifizierung der Erreichbarkeit von Städten und Regionen existieren zahlreiche theoretische und empirische Messkonzepte, welche in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich weiterentwickelt wurden, um realitätsnahe Bewertungen generieren zu können. Dabei gibt es keine einheitliche Definition von Erreichbarkeit. Im allgemeinen Sprachgebrauch wird Erreichbarkeit zumeist als Lagegunst verstanden, welche bspw. die Ausstattung an Infrastruktur auszudrücken versucht und sich damit vom wissenschaftlichen Begriff der Erreichbarkeit abgrenzt. Dieser Beitrag rückt zunächst das grundsätzliche Konzept der Erreichbarkeit im Personenverkehr mit den wesentlichsten konventionellen Partialindikatoren sowie deren Synthese in den Fokus, bevor sich der individuellen und gleichwohl nutzenbasierten Erreichbarkeitsmessung gewidmet wird. Dabei werden rein physische Indikatoren zur Beschreibung der Verkehrsinfrastrukturausstattung (wie Netzdichte u. a.) ausdrücklich nicht betrachtet.

¹ Korrespondenzadressen: Claudia.Hesse@tu-dresden.de, Simon.Bohne@gmail.com, Christos.Evangelinos@tu-dresden.de, Ronny.Pueschel@tu-dresden.de

Die in diesem Diskussionsbeitrag vertretenen Standpunkte liegen ausschließlich in der Verantwortung der Autoren und decken sich nicht zwingend mit denen der Herausgeber.

1. Einleitung

Ein viel diskutierter und allgemein akzeptierter Effekt der Verkehrsinfrastruktur ist ihre positive Wirkung auf die Wirtschaftsleistung und damit die Lebensqualität einer Volkswirtschaft (vgl. Frey, 1994, S. 1). Dementsprechend kann sie für einen höheren Wohlstand dieser sorgen. Schon Adam Smith (1776) bemerkte, dass sinkende Transportkosten in Form des Baus einer neuen Straße den Handel erleichtern und aufgrund zunehmender Arbeitsteilung Größenvorteile auslösen können. Er führte somit den höheren Wohlstand von Hafenstädten auf niedrigere Transportkosten zurück.² Doch in unserem modernen Wirtschaftssystem existiert eine Vielzahl von weiteren Gründen, die die Verkehrsinfrastruktur unerlässlich macht. Die zunehmende Arbeitsteilung in der Industrie verursacht ein verändertes Muster der Warenströme. Menschen sind immer mehr bereit, längere Distanzen für ihren täglichen Weg zur Arbeit in Kauf zu nehmen, da höhere Reisegeschwindigkeiten diese größeren Entfernungen in einem für das Individuum konstanten Zeitbudget bewältigen lassen. Die Transformation von einer Produktions- in eine Dienstleistungs- und Informationsgesellschaft bedingt ein neues individuelles Mobilitätsverhalten; neue individuelle Bedürfnisse entstehen aufgrund des wachsenden Wohlstands, z. B. verstärkte touristische Aktivitäten. Es besteht kein Zweifel, dass eine gute Qualität der Verkehrsinfrastruktur all diese Aktivitäten unterstützt bzw. sogar auslösen kann. Dies wurde bereits auch auf europäischer Ebene erkannt. Die EU unterstreicht die Wichtigkeit einer leistungsfähigen Transportinfrastruktur und damit der räumlichen Erreichbarkeit (vgl. u. a. EU Kommission, 1999, S. 74). Dieser Beitrag beschäftigt sich deswegen mit der Erreichbarkeit als Konzept und beleuchtet ihre Messmethoden kritisch.

Um in den nachfolgenden Abschnitten auf die Messbarkeit der verkehrlichen Anbindungsqualität einzugehen, ist es zuvor erforderlich, die Erreichbarkeit begrifflich zu definieren.

Zur Definition von Erreichbarkeit gibt es inzwischen zahlreiche Ansätze. Einige zentrale Begriffe treten in der Literatur besonders häufig hervor. Weibull (1980, S. 54) fasst diese in Schlagwörtern zusammen: *„nearness, proximity, ease of spatial interaction, potential of opportunities for interaction.“*

Diese Aufzählung zeigt, dass es nicht einfach ist, eine einheitliche Wortwahl zu treffen, aber im Kern wird eine Beschreibung von Potentialen zur räumlichen Interaktionen durch den Begriff der Erreichbarkeit ausgedrückt. Diese Definition verfolgen auch Rietveld und Bruinsma (1998, S. 352), wobei die Erreichbarkeit besonders durch die Eigenschaften des betrachteten Netzwerkes und die räumliche Aufteilung von Aktivitäten beeinflusst werden kann.

Neben der Begriffsbestimmung der Erreichbarkeit ist besonders deren Messung in einem definierten Konzept von Interesse. Dies ist über die letzten 60 Jahre zu einer Herausforderung in der Forschung geworden. Es ist zunächst schwer, sich durch die Vielzahl an Definitionen und Messversuchen einen Ein-

² In diesem Zusammenhang wird auf eine Abhandlung der viel diskutierten Beziehung zwischen Erreichbarkeit und Handel bzw. Produktivität verzichtet. Für einen Überblick vgl. Feige (2007).

druck zu verschaffen, welche Ansätze theoretisch fundiert und praktisch umsetzbar sind. Dieser Beitrag soll demzufolge bei der Aufarbeitung der theoretischen Erreichbarkeitskonzepte ansetzen, unter anderem auch, um den Begriff der Erreichbarkeit im üblichen Sprachgebrauch von der wissenschaftlichen Definition abzugrenzen.³ Dazu wird in Abschnitt zwei zunächst ein kurzer Überblick über die Entwicklung und die Motivation der Ansätze gegeben. Konventionelle Indikatoren werden im dritten Kapitel diskutiert. Dabei ist besonderes Augenmerk auf die vielfältigen Formen und restriktiven Annahmen der einzelnen Indizes gerichtet. Im Gegensatz zu den konventionellen Ansätzen bietet Abschnitt vier eine Einführung in die individuelle und damit nutzenbasierte Erreichbarkeitsmessung. Im Schlussteil (Kapitel fünf) werden die erarbeiteten Ergebnisse kurz zusammengefasst und ein Ausblick auf nützliche Erweiterungen der Untersuchungen zur Erreichbarkeit gegeben.

2. Erreichbarkeit als Konzept

Zur Einführung in die Thematik ist es sinnvoll, einen Überblick über die Entwicklung der Erreichbarkeitsindikatoren zu erhalten. Die Entstehungsgeschichte kann helfen, die unterschiedlichen Konzepte der Erreichbarkeit besser in einen Kontext zu bringen und nachzuvollziehen, welche die zentralen Elemente und Aussagen sind.

2.1. Die Entwicklung der Konzepte der Erreichbarkeit

Für die Thematik der Erreichbarkeit besteht inzwischen seit Mitte des 20. Jahrhunderts ein großes Interesse. Anfangs sollte sie noch zur Erklärung von sozialer Interaktion dienen und wurde häufig im Fachgebiet der Sozialphysik angesiedelt (vgl. Stewart, 1947 und 1948 sowie Pooler, 1987). Durch das steigende Interesse von Geographen (vgl. Ingram 1971) und Ökonomen (vgl. Vickerman et al., 1999), rückte auch die mathematische Spezifizierung der Ansätze weiter in den Mittelpunkt. Weibull (1976, 1980) formulierte einen bis heute gültigen axiomatischen Rahmen für Erreichbarkeitsmodelle. In Folge wurden viele mögliche Indikatoren zur Messung der Erreichbarkeit aufgestellt und anhand von exemplarischen Studien angewandt, ohne dass sich eine einheitliche Formulierung ergeben hätte, was zukünftig zudem einen Spielraum für erweiterte Indikatoren birgt. Häufig handelte es sich zunächst um Potentialindikatoren (siehe Abschnitt 3.2.1), die aus den sozialen Gravitationsmodellen hervorgingen (vgl. Hansen, 1959 sowie Pooler, 1987). Die Indikatoren wurden argumentativ in verschiedene Elemente unterteilt (siehe Abschnitt 3.1.1 sowie 3.1.2), die nach und nach untersucht und verändert wurden (vgl. u. a. Ingram, 1971 sowie Kwan, 1998).

Weiterhin existieren individuelle Erreichbarkeitskonzepte, welche maßgeblich durch den Eingang psychologischer und nutzenbasierter Entscheidungsmodelle in die ökonomische Forschung geprägt wurden (vgl. McFadden, 1974 und 1978 sowie Ben-Akiva und Lerman, 1979 und 1985). Dabei ist es mithilfe mik-

³ Dabei wird in dieser Studie ausschließlich der Personenverkehr betrachtet.

roökonomisch fundierter Modelle möglich, das Verhalten von Individuen bei der Verkehrsmittelwahl durch den Ansatz der Nutzenmaximierung zu erklären. Dieses Vorgehen wurde von McFadden (1974) erstmals für die Einführung des Bay Area Rapid Transit (BART) in der San Francisco Bay Area angewandt. Hägerstrand (1970) versuchte des Weiteren in seiner Arbeit, welche als Grundlage der Zeitgeographie angesehen werden kann, die Rolle der Individuen in regionalwissenschaftlichen Untersuchungen zu stärken und entwarf ein Modell, das individuelle Mobilität realitätsnah und trotzdem modellhaft beherrschbar machte (vgl. auch Pred, 1977). Auf dieser theoretischen Grundlage und den Modellen von McFadden sowie Ben-Akiva und Lerman wurden Erreichbarkeitsmodelle zur Erfassung von räumlichen und zeitlichen Komponenten entwickelt (vgl. Miller, 1999, Kwan und Weber, 2003 sowie Dong et al., 2006).

2.2. Ansätze der Erreichbarkeitsmessung

Üblicherweise wird mit Erreichbarkeit die Thematik der Lagegunst bzw. Zugänglichkeit assoziiert, welche sich in Ausstattung an Infrastruktur, Entfernung und Zentralität der Orte oder Frequenz der zwischen den Regionen verkehrenden Verkehrsmittel widerspiegelt. Der Begriff „Erreichbarkeit“ geht in der Wissenschaft jedoch über den gewöhnlichen Sprachgebrauch sehr weit hinaus und verfolgt eine aggregierte räumliche Betrachtung. Dabei werden die Attraktivitäten einzelner Orte anhand von Strukturdaten, üblicherweise in Form von Wirtschaftskraft oder Bevölkerung, in die Bewertung der Erreichbarkeit miteinbezogen. Grundlegend sollte zwischen der nach außen (sog. outbound accessibility) und der nach innen gerichteten Erreichbarkeit (inbound accessibility) unterschieden werden. Erstere untersucht dabei, wie gut man von einer Region alle anderen betrachteten Regionen erreichen kann, während letztere analysiert, wie gut der Ursprungsort von den übrigen Zentren aus erreichbar ist. Letztlich spiegelt das wissenschaftliche Konzept der Erreichbarkeit wider, wie gut Regionen in das vorhandene Infrastrukturnetz eingebunden sind und beschreibt demnach als objektives und nachprüfbares Maß die (momentane) Qualität eines Verkehrsnetzwerkes, jeweils betrachtet von einem bestimmten Ort im Raum. Des Weiteren können die Auswirkungen geplanter Infrastrukturmaßnahmen (Ausbau bzw. Neubau) auf diese Regionen anhand eines Vorher-Nachher-Vergleichs der Erreichbarkeitsindikatoren dargestellt werden.⁴

Es liegt nahe, dass bei einer Vielzahl von Ansätzen zur Bestimmung von Erreichbarkeit verschiedene spezifische Untersuchungshintergründe vorlagen. Wie bereits erwähnt (Abschnitt 2.1), entstanden viele Ansätze aus dem Zweck heraus, geographische und ökonomische Fragestellungen zu beantworten. Frühe Untersuchungen wurden aus der Perspektive der Geographie erstellt. Hierbei ging es im Groben um die Kernfrage, wie gut Regionen erreichbar sind, d. h. wie gut die Verbindungen untereinander sind und

⁴ Der Zusammenhang zwischen Wirtschaftswachstum und Wettbewerbsfähigkeit der Regionen wird durch Erreichbarkeitsindikatoren jedoch nicht dargestellt. Da es sich um ein reines Messkonzept handelt, sollten auch nicht notwendigerweise Handlungsimplicationen für Regionen mit schlechten Erreichbarkeitsergebnissen abgeleitet werden.

in welcher Form sich regionale Muster herausbilden (vgl. Pooler, 1987, S. 269ff.). Dies führte dazu, dass diese Untersuchungen zunächst auf kleine Untersuchungsgebiete wie einzelne Städte und Gemeinden (Ingram, 1971 sowie Kwan, 1998) begrenzt waren und vorwiegend Bevölkerungszahlen und qualitative Variablen der Infrastruktur in die Indikatoren eingingen (vgl. Pooler, 1987, S. 273 ff.). Das ökonomische Interesse am Konzept der Erreichbarkeit bezieht sich vielfach auf die Bewertung von Infrastrukturprojekten auf einer größeren Ebene oder auf den Vergleich der Erreichbarkeit von einzelnen Städten (vgl. u. a. Gutiérrez et al., 1996, Gutiérrez, 2001, Martín et al., 2004 sowie Martín und Reggiani, 2007). Dabei werden die Verkehrsnetze auf ihr Potential zur Erreichbarkeitssteigerung von Städten und Regionen untersucht. Dies geschieht jedoch nur in einem abgesteckten Rahmen von ex ante spezifizierten Partialindikatoren⁵ als objektive Maße der aktuell vorherrschenden Infrastrukturausstattung ohne eine Nutzen-Kosten-Analyse zu realisieren. Ein weiterer Kritikpunkt aus der raumwirtschaftlichen Theorie betrifft die Nichtberücksichtigung von regionalen Verteilungseffekten der Infrastrukturprojekte. Vickerman et al. (1999, S. 10 ff.) zeigen auf, dass der Neu- bzw. Ausbau von Verkehrsinfrastruktur für die Verschärfung des Gefälles zwischen bedeutenden Agglomerationen und schwachen Peripherien verantwortlich sein kann. Die Disparitäten zwischen Regionen könnten so verstärkt und gesamtwirtschaftliche Effekte nicht prognostiziert werden. Die verwendeten Indikatoren würden wenig zur Erklärung solcher Wirkungen beitragen und der Aufwand für Erreichbarkeitsmessungen sollte umgangen werden, solange keine Prognosen über alle relevanten Aspekte (Kosten, Nutzen, externe Effekte und Verteilung) möglich sind (vgl. Vickerman et al., 1999, S. 12 f.). Dies bezeichnet ein häufiges Urteil: Es sollte hinterfragt werden, ob erstellte Indikatoren auch in einem anderen bzw. allgemeineren Kontext Gültigkeit und relevante Aussagekraft behalten können. Handy und Niemeier (1997, S. 1192) haben hierzu eine deutliche Meinung: *„It is important that accessibility measures used in practice are theoretically and behaviorally sound and that innovative approaches to measuring accessibility are made practical.“*

In dieser Arbeit werden zuerst konventionelle und anschließend individuelle Ansätze unterschieden. Beide werden nachfolgend getrennt analysiert. Es soll dabei diskutiert werden, wie umfangreich und allgemeingültig die bekannten Erreichbarkeitsindikatoren die Erreichbarkeit darstellen und ob es einen praktikablen Ansatz gibt, der unabhängig von zweckgebundenen Parametern gültig sein kann.

3. Konventionelle Ansätze zur Messung von Erreichbarkeit

Die konventionellen Studien befassen sich mit der Erreichbarkeit einer bestimmten Raumeinheit. Die dabei betrachtete Größe des Raumes kann verschiedene Dimensionen (alle abgrenzbaren Raumeinheiten, z. B. NUTS-Regionen) annehmen oder auch nur einen Knotenpunkt der Verkehrsanbindung umfassen. Die ermittelte Kennzahl für eine solche Raumeinheit (als Ausgangsort) bezieht sich auf alle Individuen innerhalb der festgelegten Grenze des Raumes oder im festgelegten Maximalabstand zum untersuch-

⁵ Die üblichen konventionellen Partialindikatoren werden in Abschnitt 3.2 vorgestellt.

ten Knoten. Die individuelle Wahrnehmung von möglichen Aktivitäten durch einzelne Haushalte wird somit eliminiert und durch einen formalen, allgemeingültigen Rahmen ersetzt. Es erfolgt keine Gegenüberstellung von individuellem Nutzen für Aktivitäten der Haushalte mit den assoziierten Kosten für den Transport dorthin. Ebenso werden mögliche Ziele als Orte verstanden, an denen Aktivitäten stattfinden können. Auch hier wird also auf eine personenbezogene Betrachtung verzichtet (vgl. Pirie, 1979, S. 299 ff. sowie Kwan und Weber, 2003, S. 345).

3.1. Grundlagen

Für die konventionellen Ansätze zur Messung der Erreichbarkeit gibt es in der wissenschaftlichen Diskussion viele verschiedene Indikatoren, welche unterschiedliche Parameter und Einflussgrößen beinhalten. Wie im Folgenden dargestellt, setzen die verschiedenen Indikatoren, so differenziert ihre Aussagekraft auch zu sein scheint, meist bei ähnlichen Grundprinzipien der Verrechnung von wenigen Elementen an. Schon die zuvor erörterte Definition der Erreichbarkeit machte deutlich, dass bei der Messung zwei Elemente zentralen Charakter aufweisen: Potential und Widerstand (vgl. Handy und Niemeier, 1997, S. 1176 ff.). Nach der prinzipiellen Diskussion der konventionellen Messansätze in Abschnitt 3.1.1 und 3.1.2 stellt das Kapitel 3 bestehende konventionelle Erreichbarkeitsindikatoren vor und diskutiert bestehende Kritikpunkte.

3.1.1. Aktivitäten und Potential

Die Verkehrsnachfrage ist bekannterweise eine abgeleitete Nachfrage, d. h. sie ergibt sich gewöhnlich nicht aus einem Selbstzweck heraus, sondern vielmehr weil ein Bedürfnis nach Aktivitäten wie Einkaufen, Arbeit und Freizeit besteht, für deren Befriedigung Raum überwunden werden muss (vgl. u. a. Button 2010, S. 48). Die Menge der möglichen Aktivitäten an einem Ort erlaubt somit Rückschlüsse auf die Nachfrage nach Verkehrsdienstleistungen und das entstehende Verkehrsaufkommen zu diesem Ort.

Diese Gegebenheit führt dazu, dass im Konzept der Erreichbarkeit die Erfassung von Aktivitäten eine zentrale Komponente bildet. Dabei ist die Frage, wie Aktivitäten erfasst und auf welchem Level sie aggregiert werden, von zentraler Bedeutung (vgl. Handy und Niemeier, 1997, S. 1179). Es muss zur Generierung von Kennzahlen ein Niveau der Aggregation gewählt werden, welches erlaubt, die Erreichbarkeit von Aktivitäten realitätsnah darzustellen und gleichzeitig einen nachvollziehbaren Wert zu bilden.

Ein häufig gewählter Ansatz ist die Darstellung von möglichen Aktivitäten durch ein Potentialmaß (vgl. Rietveld und Bruinsma, 1998, S.36). In diesem werden häufig regionalspezifische Daten, z. B. die Population, Einkommen in der Region als BIP oder Beschäftigungszahlen, als Proxy für die Attraktivität und die Summe der möglichen Aktivitäten dargestellt. Dabei ist es ein entscheidender Unterschied, ob tatsächlich nachgefragte Aktivitäten erfasst werden oder nur die Möglichkeit, Aktivitäten nachzukommen (vgl. Handy und Niemeier, 1997, S. 1179). Dieser Unterschied wird auch in der Differenzierung zwischen konventionellen und individuellen Erreichbarkeitsansätzen ausgedrückt.

3.1.2. Raumwiderstand

Handy und Niemeier (1997, S. 1179) postulieren, dass es zu einer Überschätzung der Erreichbarkeit kommt, wenn die Untersuchung allein auf die Potentialwerte beschränkt wird, da es sich beim Verkehr um einen Trade-Off zwischen dem Nutzen aus den angestrebten Aktivitäten am Ziel und den Kosten der Raumüberwindung handelt (vgl. Handy und Niemeier, 1997, S. 1176 sowie Kummer, 2006, S.59). Somit sind die Kosten für die Überwindung des Raums zwischen Ausgangs- und Zielort das zweite zentrale Element bei der Ermittlung von Erreichbarkeitskennzahlen. Die entsprechenden Kosten sind nicht nur monetärer Art, sondern können auch durch die investierte Zeit oder zu überwindende Distanz ausgedrückt werden.

Das Konzept der konventionellen Erreichbarkeitsindikatoren fasst genau diesen Wirkungszusammenhang auf und bietet die Möglichkeit, mit der Nutzung von erfassbaren Daten eine Bewertung der Summe der Anbindungen von Untersuchungseinheiten (Land, Region, Stadt oder anders abgegrenzte räumliche Einheit) zu erstellen. Die Verrechnung von Potential und Widerstand ist abhängig vom benutzten Erreichbarkeitsansatz sowie der Größe der verwendeten Parameter, welche in den Indikatoren implementiert sind.

3.2. Konventionelle Erreichbarkeitsindikatoren

Rietveld und Bruinsma (1998, S.33ff) geben einen breiten Überblick über vorhandene Erreichbarkeitskonzepte, die im weitesten Sinne den konventionellen Ansätzen entsprechen. Sie vermerken elf verschiedene Definitionen, die von einer binären Definition⁶ bis zur Betrachtung der Potentialindikatoren (siehe Abschnitt 3.2.1) reichen. Evangelinos und Ebert (2011) liefern einen enger gefassten Überblick über die heute am gebräuchlichsten Erreichbarkeitsindikatoren. Sie stellen heraus, dass Ansätze mit niedriger Komplexität durchaus wesentliche Aspekte der Erreichbarkeit aufgreifen und verständlich aufzeigen können. Durch den fehlenden Bezug zu wichtigen Größen genügen jedoch die simpleren Ansätze häufig nicht mehr dem wissenschaftlichen Anspruch, eine umfassende Messgröße für die Erreichbarkeit zu erstellen. Somit lässt sich die Entwicklung der sogenannten Partialindikatoren begründen, die in den nachfolgenden Teilabschnitten vorgestellt und diskutiert werden.

In Anhang 1 befindet sich des Weiteren ein Überblick über ausgewählte empirische Studien, welche sich für die Quantifizierung der Erreichbarkeit u. a. auf die konventionellen Indikatoren stützen.

3.2.1. Potentialindikatoren

Die Form der Potentialindikatoren geht zurück auf das Newtonsche Gravitationsmodell, wenn auch mit einigen empirisch begründeten Modifikationen (vgl. Pooler, 1987, S. 270 ff.). Hieraus kann eine allgemeine und dadurch flexibel gehaltene Formulierung einer gravitationsbasierten Potentialindikatorfunktion abgeleitet werden (nach Spiekermann und Neubauer, 2002, S. 9):

⁶ Beispielsweise: Ist eine Erreichbarkeit (i. S. v. Zugänglichkeit) vorhanden, ja oder nein?

$$A_i = \sum_{j=1}^n g(P_j) * f(d_{ij}). \quad (1)$$

A_i bezeichnet dabei die Erreichbarkeit (Accessibility) des Ausgangsortes i . Die Funktion $g(P_j)$ gibt Auskunft über das Potential des Zielortes j , in dieser generellen Form auch als Potentialfunktion bezeichnet. Hier soll die Summe der möglichen Aktivitäten bewertet und somit die Attraktivität eines Zielortes zum Ausdruck gebracht werden. Diese Funktion kann zur Darstellung des Potentials verschiedene Ausprägungen annehmen, je nachdem, ob die Erreichbarkeit bspw. für Unternehmen oder Haushalte (Arbeitspendler, potentielle Konsumenten, Touristen oder Geschäftsreisende) bestimmt werden soll.

Das Element $f(d_{ij})$ kann als allgemein formulierte Widerstandsfunktion bezeichnet werden. Der Term d_{ij} bezeichnet dabei die Distanz zwischen Ausgangsort i und Zielort j und kann in verschiedenen Formen, u. a. mittels Luftliniendistanz oder Großkreismethode, ermittelt und anschließend in Reisekosten angegeben werden. Die potenzielle Attraktivität aller Zielregionen wird durch ihre Distanz zum Ausgangsort durch die Widerstandsfunktion negativ beeinflusst. Die Stärke des Einflusses wird aber maßgeblich durch die Form der Widerstandsfunktion vorgegeben.

In der Mehrzahl der Studien wird das Potential meist aggregiert ausgegeben und zur vereinfachenden Rechnung mit einer einzigen Dimension, z. B. dem BIP oder der Einwohnerzahl der betrachteten Raumeinheit, gleichgesetzt. Für Erreichbarkeitsanalysen mit einem spezielleren Hintergrund sind aber ebenso andere Einflussgrößen wie bspw. das potentielle Absatzvolumen oder die Menge an verfügbaren Produktionsinputs, Krankenhäuser, Schulen, Arbeitsplätze etc. denkbar (vgl. Rietveld und Bruinsma, 1998, S.37). Die Summation der Potentiale sollte im konventionellen Sinne sowohl die Attraktivität der Zielregionen als auch die der Ausgangsregionen beinhalten (siehe hierzu Abschnitt 3.3.1).

Spiekermann und Neubauer (2002, S. 30) merken an, dass die Einwohnerzahlen und das BIP einer Region hohe Korrelationswerte, zumindest innerhalb der EU-Staaten, aufweisen. Daher sei die Entscheidung, welche Komponente innerhalb eines Potentialindikators verwendet wird, nicht so relevant wie zunächst anzunehmen wäre. Unterschiede sind aber in Bezug auf die regionale Disparität zu erkennen. Wenn Studien strukturelle Differenzen aufzeigen sollen, so bietet die Verwendung des BIP pro Kopf ein klareres Bild. Insbesondere in den peripheren Regionen der EU und anderen europäischen Ländern ist die Diskrepanz zwischen Einwohnerzahl und BIP pro Kopf etwas größer (höhere Einwohnerzahlen bei niedrigerem BIP pro Kopf) als bei den zentralen Regionen (vgl. Spiekermann und Neubauer, 2002, S. 30).

Durch den Widerstand, der durch die nötige Überwindung des Raumes zwischen Ziel- und Ausgangsort entsteht, nimmt der mögliche Beitrag von Orten j zu der Erreichbarkeit A_i der Ausgangsregion i mit steigender Entfernung ab. Möglich sind hier sowohl räumliche als auch zeitliche Entfernungen.

Die Verwendung der Reisezeit als Distanzvariable ist am verbreitetsten. Handy und Niemeier (1997, S. 1179) geben einen Überblick über verschiedene Formen für die Distanz und kritisieren die Verwendung der räumlichen Entfernung als Variable. Reisezeiten stünden im engeren Verhältnis mit der realen Rei-

seentscheidung⁷. Fraglich bleibt, wie Staus und Verspätungen innerhalb des Widerstands berücksichtigt werden sollen. Hier schlagen Handy und Niemeier (1997, S. 1179) eine generalisierte Transportkostenfunktion vor. Die Verwendung von Opportunitätskosten der Zeit (*Value of Time*) könnte hier einen guten Ansatz liefern. Eine Implementierung von multimodalen Zeit-Kosten-Ansätzen in konventionelle Modelle würde die Komplexität aber enorm steigern (vgl. Kwan 1998, S. 196); bei nutzenbasierten Indikatoren sollte hingegen eine Berücksichtigung leichter fallen.

Wie bereits erwähnt, hängt die Stärke des Widerstandes eng mit der verwendeten funktionalen Form zusammen. Auch die Steigung und mögliche Nullstellen, also der Ausschluss des Potentialbeitrags einer Zielregion zur Erreichbarkeit der Ausgangsregion, werden hiervon beeinflusst. Kwan (1998, S. 200 ff.) identifiziert in ihrer Arbeit die drei gängigsten Formen der Widerstandsfunktion in Potentialindikatoren: die inverse Potenzfunktion, die negative Exponentialfunktion und die modifizierte Gaußsche Funktion.

Widerstand mit der inversen Potenzfunktion

Die inverse Potenzfunktion in Gleichung 2 setzt den Parameter s als negative Potenz der Distanz zur Modellierung des Raumwiderstands ein:

$$f(d_{ij}) = d_{ij}^{-s}. \quad (2)$$

Pooler (1987, S. 272 ff.) veröffentlichte einen Überblick über die Verwendung von Potentialfunktionen und sieht dort die einfache Verwendung der Funktion mit $s = 1$ noch als am weitesten verbreitet (ebenso Gutiérrez et al., 1996, S. 230). Aberle argumentiert dagegen, dass für die „ökonomische Distanz“ ein Wert von $s = 2$ ermittelt wäre (vgl. Aberle, 2009, S. 457). Idealerweise sollte der Parameter für die Distanzsensibilität s jedoch aus beobachtbaren individuellen Zielentscheidungen anhand von Quelle-Ziel-Matrizen (bspw. Berufspendlermatrizen) empirisch geschätzt werden (vgl. Schulz und Bröcker, 2007, S. 6 sowie Kwan, 1998, S. 198). Dabei wird der Parameter s in einem Gravitationsmodell⁸ geschätzt, welches eben diese Pendlerentscheidungen abzubilden versucht (vgl. Schulz und Bröcker, 2007, S. 9). Diese Methodik stellt sich allerdings bei großräumigen Untersuchungsgebieten mit aggregierten Daten als recht aufwendig heraus und ist daher besonders bei innerregionalen Betrachtungen vorteilhaft. Bröcker (2006, S. 13 ff.) stellt darüber hinaus einen nicht-parametrischen Erreichbarkeitsindex vor, welcher sich Ideen der Preisindextheorie zu eigen macht und damit der willkürlichen Parameterwahl entgegensteht. Dabei können Erreichbarkeitsbilder generiert werden, welche denen des Logsum-Indikators⁹ ähnlich

⁷ Zudem ist über die Jahrzehnte eine Beschleunigung des Personenverkehrs zu beobachten. Entfernungen werden mit zunehmender Reisegeschwindigkeit unwichtiger, die dafür benötigte Zeit umso bedeutender.

⁸ Räumliche Interaktionen (z. B. Arbeitspendlerströme) können anhand von Gravitationsmodellen, welchen wiederum das diskrete Entscheidungsmodell (Logit-Modell) zugrunde liegt, dargestellt werden. Zur Schätzung solcher Modelle und damit der Parameter, wird lediglich ein stochastischer Störterm hinzugefügt.

⁹ Der Logsum-Indikator stellt eine monoton sinkende Transformation des Potentialindikators dar, um eine interpretierbare Dimension zu erhalten (vgl. Schulz und Bröcker, 2007, S. 9).

sind (vgl. Schulz und Bröcker, 2007, S.19). Bei einer Funktionsform nach Gleichung 2 tritt das Problem auf, dass bei der Betrachtung des Potentials der Ausgangsregion i (also $i = j$ mit $d_{ij} = 0$) durch Null dividiert wird. Somit muss entweder eine geeignete Berechnungsgrundlage für die interne Erreichbarkeit festgelegt oder die Distanz in diesem Spezialfall auf Eins normiert werden.

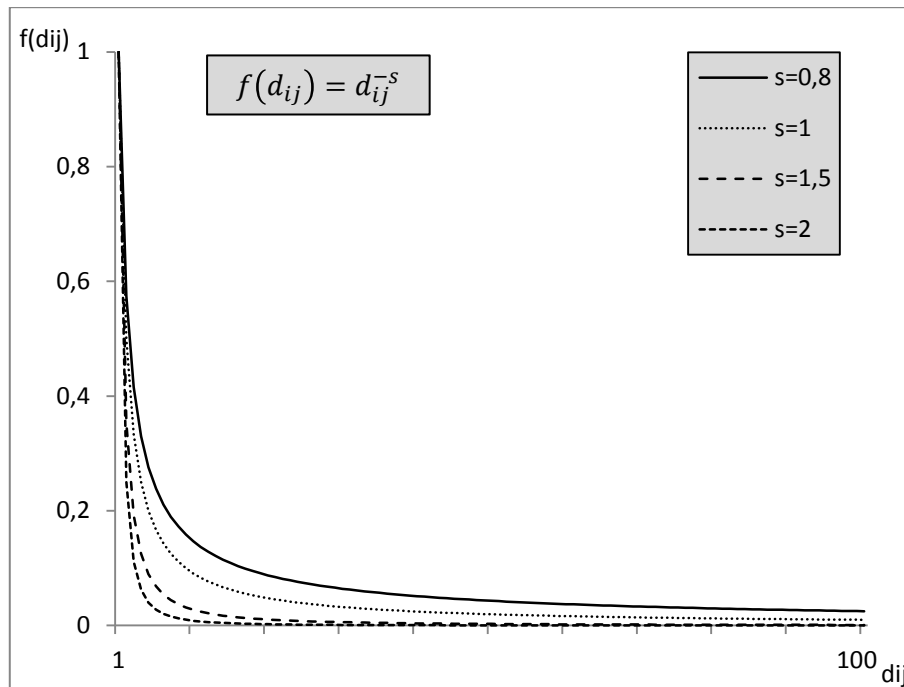


Abbildung 1: Widerstand mit inverser Potenzfunktion
(Quelle: eigene Darstellung, nach Kwan, 1998, S. 200)

In Abbildung 1 ist die Widerstandsfunktion als inverse Potenzfunktion grafisch dargestellt. Die Distanzvariable d_{ij} ist für einen Wertebereich zwischen 1 und 100 definiert, welcher exemplarisch für verschiedene denkbare Distanzen in Kilometern (km) oder in Reisezeit, z. B. Minuten (min) oder Stunden (h) angesehen werden kann.¹⁰ Bei der Überlegung, welche Größe übernommen werden sollte, können auch Vielfache der einzelnen Einheiten verwendet werden¹¹, um die Größenordnungen den betrachteten Daten anzupassen. Die Funktionsform des Widerstands ist für verschiedene Ausprägungen des kritischen Parameters s dargestellt, um eine Veranschaulichung der Einflussstärke zu erreichen. Der Funktionswert von $f(d_{ij})$ gibt Auskunft, mit welchem Wert das ermittelte Potential eines Zielortes innerhalb des Potentialindicators multipliziert wird.

Wie in Abbildung 1 zu erkennen ist, wird bei Verwendung einer inversen Potenzfunktion als Widerstandsfunktion der Beitrag von weiter entfernten Orten mit steigendem Wert des Parameters s abnehmen.

¹⁰ Bei einer Distanz von Null bzw. von kleiner Eins wird d_{ij} auf Eins normiert.

¹¹ Z. B. die Skalierung von $1 * 10$ km bis $100 * 10$ km.

Widerstand mit der Exponentialfunktion

Das Problem der Erreichbarkeitsberechnung bei einer Distanz gleich Null besteht bei den Exponentialfunktionen mit negativem Exponenten nach Gleichung 3 nicht¹²:

$$f(d_{ij}) = \exp(-\beta d_{ij}). \quad (3)$$

Zur Festlegung der Funktionsform wird die Exponentialfunktion mit dem Parameter β kalibriert, um fallende Funktionswerte bei steigender Distanz zu erhalten. Eine aktuelle empirische Kalibrierung des Koeffizienten für die Distanzsensibilität β liegt nicht vor. Ältere empirische Studien deuten auf einen ungefähren Wert von 0,2, welcher vielfach in empirischen Studien¹³ angewendet wird, bspw. von Tschopp et al. (2006, S. 6) für die Erreichbarkeitsanalyse der Schweiz.¹⁴ Abbildung 2 zeigt die Exponentialfunktion mit unterschiedlich kalibriertem β .

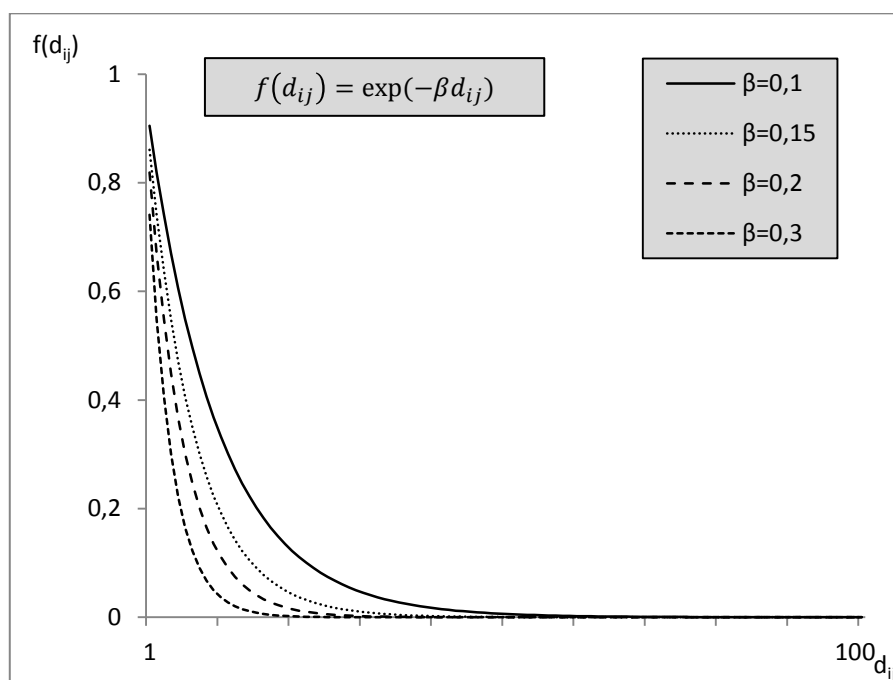


Abbildung 2: Widerstand mit negativer Exponentialfunktion
(Quelle: eigene Darstellung, nach Kwan, 1998, S. 200)

Hier nimmt die Fläche unter der Funktion mit steigendem β ab und der Beitrag von weiter entfernten Orten wird weniger stark gewichtet.

Sowohl die inverse Potenzfunktion als auch die Exponentialform diskontieren die Erreichbarkeit von nahegelegenen Orten viel stärker ab als in den Potentialmodellen zweckdienlich, da der Beitrag von nahe gelegenen Orten zur Erreichbarkeit eines Ausgangsortes weniger stark abfallen sollte. Nach Ingram

¹² Dies wird verhindert, da $e^0 = 1$.

¹³ Kwan (1998, S. 198 ff.) untersucht einen Wertebereich für β von 0,12 bis 0,25, kommt aber zu keiner schlüssigen Empfehlung.

¹⁴ Wie bereits erwähnt, kann in kleinteiligen Betrachtungsgebieten der Parameter für die Distanzsensibilität β aus Quelle-Ziel-Matrizen empirisch geschätzt werden.

(1971, S. 104 ff.) und Kwan (1998, S. 194) müsste die Widerstandsfunktion bei größere Distanzen stärker abnehmen. Es ist anzumerken, dass sich in den vorgestellten Formen der Funktionen keine Nullstelle einstellt und somit jeder Ort einen theoretisch marginalen Einfluss auf die Erreichbarkeit der Ausgangsregion ausübt.

Widerstand mit der Gaußschen Funktion

Ingram (1971, S. 105) schlägt die in Gleichung 4 aufgezeigte modifizierte Gaußsche Funktion bzw. „Normalfunktion“ zur Implementierung des Widerstands vor.

$$f(d_{ij}) = \exp(-d_{ij}^2/z). \quad (4)$$

Die Steigung der vorgeschlagenen Exponentialfunktion wird durch die Aufnahme des Parameters z gesteuert, für dessen Ermittlung verschiedene Verfahren vorgeschlagen werden. Ingram (1971, S. 106) schlägt u. a. die Verwendung des Quadrats der durchschnittlichen Entfernung zwischen allen Punkten vor.¹⁵ Zur Visualisierung der Auswirkungen der Größenordnungen von z dient Abbildung 3.

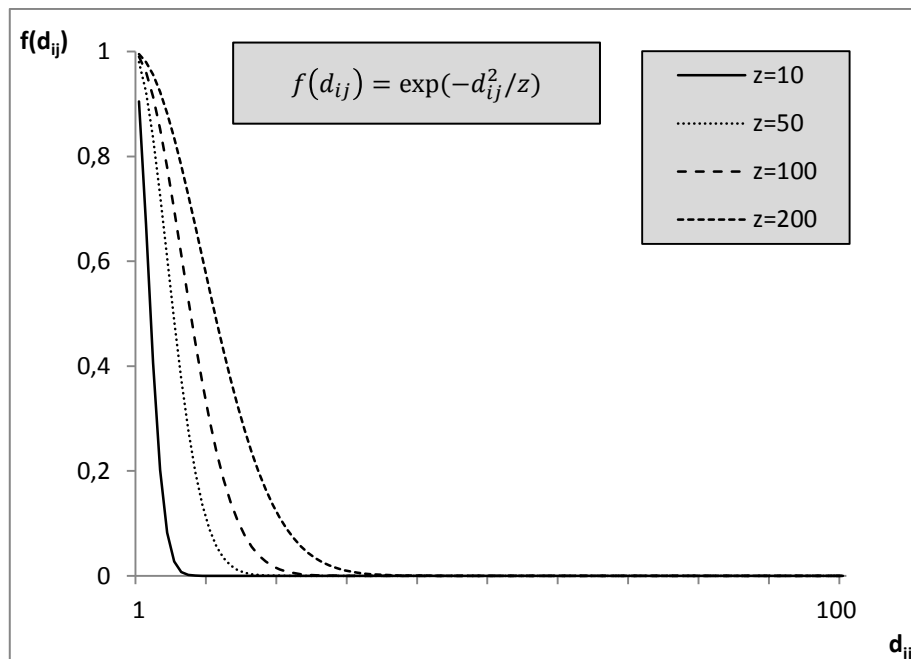


Abbildung 3: Widerstand mit modifizierter Gaußscher Funktion
(Quelle: eigene Darstellung, nach Kwan, 1998, S. 201)

Im Vergleich mit den Funktionen der beiden vorangegangenen Abschnitten üben Orte in steigender Distanz zum Ausgangsort mit steigendem z einen größeren Einfluss auf die Erreichbarkeit aus. Ab einer gewissen Distanz wird der Beitrag von weiter entfernt gelegenen Orten aber stark begrenzt und nahe gelegene Regionen verzeichnen demnach einen relativ größeren Einfluss auf die Erreichbarkeit. Die Gaußsche Funktion bildet somit ab einer gewissen Distanz einen quasi-cut-off-Punkt (je nach gewähltem z), ab welchem die Potentialwerte der Nachbarn nur noch einen gegen Null gehenden Einfluss haben.

¹⁵ Des Weiteren erwähnt er noch die Möglichkeit, den Durchmesser des kleinstmöglichen Kreises, der um alle betrachteten Regionen gelegt wird, zu benutzen (vgl. Ingram, 1971, S. 106).

Anhand der Verwendung der bisher präsentierten Widerstandsfunktionen können im Allgemeinen starke Korrelationen der Erreichbarkeitsergebnisse verzeichnet werden, die darauf deuten, dass die Verwendung unterschiedlicher Funktionen ähnliche Ergebnisse ausweisen werden (vgl. Kwan, 1998, S. 203 ff.).¹⁶ Der Großteil der Unterschiede in empirischen Untersuchungen wird durch andere Aspekte bestimmt (vgl. Abschnitt 3.3 und 3.4). Nach Pooler (1987, S. 276) ist fast jede mit steigender Distanz monoton fallende Funktion zweckdienlich zur Definition des Widerstands.¹⁷ Die Anpassung sollte eher im Zusammenhang mit der verwendeten Distanzvariable erfolgen. Da in diesem Beitrag, wie in den meisten Studien, nur der Personenverkehr betrachtet wird, ist die Verwendung von Reisezeiten ebenso wie die Verwendung von zusammengesetzten (generalisierten) Reisekosten zweckdienlich. Bei der Betrachtung von Güterverkehren müssten andere Variablen mit in die Untersuchung des Widerstands aufgenommen werden (vgl. Vickerman et al. 1999, S. 5).

Vergleich der Widerstandsfunktionen

Der Vergleich der bisher vorgestellten Widerstandsfunktionen macht die unterschiedliche Einflussnahme der Distanzen, unabhängig von ihrer Größenordnung, miteinander vergleichbar. Im folgenden Beispiel wird die Einflussnahme eines Ortes j mit einer Entfernung d_{ij} von 10 Distanzeinheiten vom Ursprungsort aus dargelegt. Für diesen Ort wird ein Potential P_j von 100 angenommen. Dadurch lassen sich die prozentualen Anteile des Beitrags des Ortes j an der Erreichbarkeit des betrachteten Ausgangsortes i , beeinflusst durch die jeweilige Widerstandsfunktion, leicht ablesen. Es gilt vereinfacht die Form des Potentialindicators $A_i = P_j * f(d_{ij})$. Alle anderen Einflussfaktoren wie z. B. die interne Erreichbarkeit sind ausdrücklich nicht miteinbezogen. Somit hängt die Erreichbarkeit von i nur vom Potential von j berechnet mit dem Raumwiderstand der Distanz d_{ij} ab. Die Ergebnisse dieses Beispiels sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Zur Interpretation der Tabelle: Ort j leistet bei einer Distanz d_{ij} von 10 Entfernungseinheiten unterschiedlich starke Beiträge zur Erreichbarkeit von i in Abhängigkeit der gewählten Widerstandsfunktion. In Formulierung (A) mit $s = 1$ ist der Beitrag gerade 10 Prozent. Steigt der Parameter s auf 2, ist der Beitrag nur noch 1 Prozent. Bei (B) und einem β von 0,1 ist der Beitrag 36,79 Prozent, bei einer Veränderung auf $\beta=0,2$ sinkt der Wert auf nur 13,53 Prozent des Potentials. Es ist zu erkennen, dass mit einem empirischen Beleg für die korrekten Raumwiderstände alle Funktionen über ihre veränderbaren Einflussfaktoren gut an die Ergebnisse oder die Realität anzupassen wären (A mit $s = 0,8 \approx$ B mit $\beta = 0,2 \approx$ C mit $z = 50$).

¹⁶ Kwan (1998, S. 203 ff.) untersuchte die gängigsten Wertebereiche für Potential- und Kumulationsindikatoren aller bis hier betrachteten Widerstandsfunktionen für Distanzen bis maximal 60 Minuten Reisezeit mit dem Pearson Korrelationskoeffizienten.

¹⁷ Nach Weibulls zweitem Axiom für Erreichbarkeitsindikatoren (Weibull 1976, S. 360 f.).

(A)	$f(d_{ij}) = d_{ij}^{-s}$	$s=0,8$	$s=1$	$s=1,5$	$s=2$
	$f(d_{ij})$ Resultierender Beitrag zu A_i	0,16 15,85	0,10 10,00	0,03 3,16	0,01 1,00
(B)	$f(d_{ij}) = \exp(-\beta d_{ij})$	$\beta=0,1$	$\beta=0,15$	$\beta=0,2$	$\beta=0,3$
	$f(d_{ij})$ Resultierender Beitrag zu A_i	0,37 36,79	0,22 22,31	0,14 13,53	0,05 4,98
(C)	$f(d_{ij}) = \exp(-d_{ij}^2/z)$	$z=10$	$z=50$	$z=100$	$z=200$
	$f(d_{ij})$ Resultierender Beitrag zu A_i	0,00 0,00	0,14 13,53	0,37 36,79	0,61 60,65

Tabelle 1: Vergleich der Wirkung von Widerstandsfunktionen in Potentialindikatoren eines Ortes j mit $d_{ij} = 10$

3.2.2. Kumulationsindikatoren

Als zweite Kategorie der konventionellen Indikatoren können die Kumulationsindikatoren bezeichnet werden. Analog zu den Potentialindikatoren wird zunächst das Potential aller relevanten Regionen ermittelt. Die Besonderheit dieser Indikatoren ist die rein binäre Bewertung des Zielpotentials (anstelle einer dynamischen Widerstandsfunktion) bezüglich ihres Einflusses auf den Messwert. In der Formulierung

$$A_i = \sum_{j=1}^n g(P_j) * f(d_{ij}) \text{ mit } f(d_{ij}) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } d_{ij} \leq \delta \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (5)$$

ist der Parameter δ eine meist zeitlich definierte Erreichbarkeitsgrenze. Liegt die Zielregion j noch innerhalb dieser Grenze, ist der dazugehörige Funktionswert der Widerstandsfunktion gleich Eins und das Potential des Zielortes wird der Erreichbarkeit von i voll zugerechnet. Ist die Zielregion außerhalb der Zeitschwelle würde das Potential der Region j nicht mit in die Bewertung der Erreichbarkeit von i einfließen. Somit werden nur die Potentialwerte aller Orte innerhalb der Erreichbarkeitsgrenze δ kumuliert.

Die Wahl des kritischen Grenzwertes für δ spielt in dieser Form die entscheidende Rolle und hängt demnach mit der Ausrichtung der Erreichbarkeitsuntersuchung zusammen (vgl. Dong et al., 2006, S. 165). Häufig wird dieser Indikator zur Analyse der Erreichbarkeit für Geschäftsreisende verwendet. Hierfür empfiehlt die Literatur (u. a. Gutiérrez, 2001, S. 232 f. und Martín und Reggiani, 2007, S. 558) meist einen δ -Wert von vier Stunden Reisezeit (in eine Richtung). Dies ist der kritische Zeitaufwand, bei dem eintägige Geschäftsreisen noch mit einem ausreichend langen Aufenthalt am Zielort typischerweise realisierbar sind.¹⁸

Gleichung 5 ist in Abbildung 4 für zwei Erreichbarkeitsgrenzen exemplarisch dargestellt. Es wird deutlich, dass die Exklusivität der Formulierung keinen Spielraum für Grenzfälle bei der Berechnung lässt. Orte, die nur wenige Distanzeinheiten oberhalb δ liegen, fallen komplett aus den Berechnungen heraus. Ob

¹⁸ Vickerman et al. (1999, S. 6) diskutieren des Weiteren mögliche Zeitgrenzen, bei welchen sich auch beispielsweise Verschiebungen hin zur Nutzung alternativer Transportmittel verzeichnen lassen.

dies eine plausible Verrechnung ist und mehr Erklärungskraft als die bisher beschriebenen Potentialindikatoren mit ihren abnehmenden Distanzfunktionen bietet, bleibt sehr fraglich.

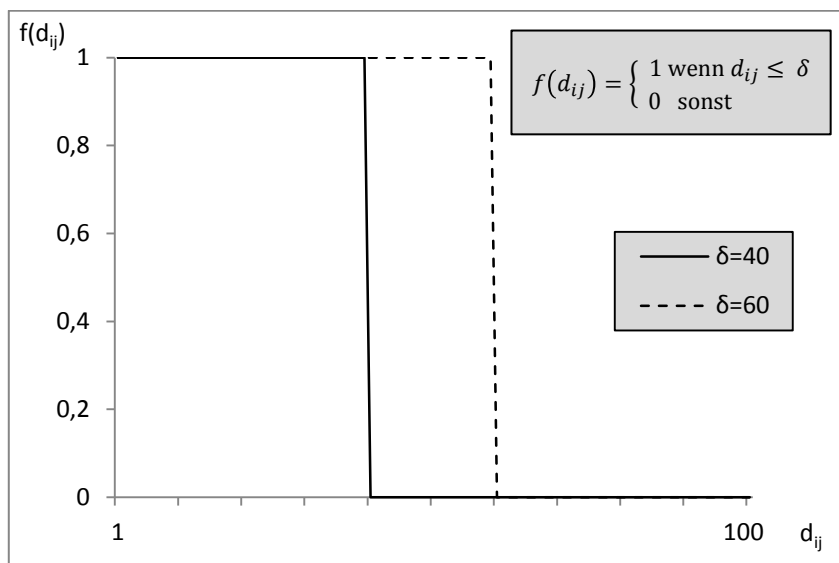


Abbildung 4: Widerstand der Erreichbarkeit mit Kumulationsindikator
(Quelle: eigene Darstellung, nach Bruinsma und Rietveld, 1998)

Ingram (1971, S.104) betrachtet die Form der Kumulationsindikatoren nicht zwingend als eigenständige Form, sondern sieht den Distanzgrenzwert nur als weitere Ausprägung (Spezialfall) einer Widerstandsfunktion der Potentialindikatoren (ebenso Dong et al., 2006, S. 165). Auch Bröcker (2006, S. 3) definiert diese Indikatoren als eine Art Sonderfall der Potentialindikatoren und bildet anhand der nachfolgenden Box-Cox-Transformation (Hybridfunktion) die Kumulationsindikatoren wie folgt ab:

$$c^{(\gamma)} := \begin{cases} \frac{c^\gamma - 1}{\gamma}, & \gamma \neq 0 \\ \log c, & \text{sonst} \end{cases} . \quad (6)$$

Bei der Widerstandsfunktion $f(c) = \exp(-\beta_b c^{(\gamma)})$ kann bspw. für $\gamma = 0$ gezeigt werden, dass sich der Potenzwiderstand einstellt, wohingegen mit $\gamma = 1$ die Exponentialfunktion der Potentialindikatoren abgebildet werden kann. Darüber hinaus kann der Kumulationswiderstand (die sogenannte Treppenwiderstandsfunktion) durch die Grenzwertbetrachtung $\lim_{\gamma \rightarrow \infty} \exp(-\frac{c}{\bar{c}})^{(\gamma)}$ generiert werden, wobei \bar{c} eine Budgetrestriktion in Form von Zeit-, Geld- oder Distanzeinheiten um die jeweils betrachtete Ausgangsregion darstellt, d. h. das Potential beinhaltet alle aggregierten Aktivitäten innerhalb einer bestimmten Reichweite um die Ursprungsregion (vgl. Bröcker, 2006, S. 3).

Jedoch muss angemerkt werden, dass innerhalb der Distanzgrenze Aktivitäten nicht mit zunehmender Entfernung diskontiert werden. Im Verbund mit der beliebig wählbaren Zeitschwelle erachtet Pirie (1979, S. 299 ff.) daher die Kumulationsindikatoren als fehleranfällig bzw. manipulierbar. Durch die strikte Distanzgrenze δ reagiert eine Untersuchung mit Kumulationsindikatoren besonders sensibel auf die zeitliche Abgrenzung (z. B. bei Martín et al., 2004, S. 703 f.).

3.2.3. Standortindikatoren

Eine von Martín und Reggiani (2007, S. 558) zusätzlich erwähnte Form der konventionellen Indikatoren bilden die Standortindikatoren (sog. *Location Indicators*). In ihrer Formulierung stellt der Indikator die Erreichbarkeit wie folgt dar:

$$A_i = \frac{\sum_{j=1}^n t_{ij} P_j}{\sum_{j=1}^n P_j}. \quad (7)$$

Ihre Aussagekraft bezieht sich auch auf das Potential P_j einer Zielregion j , welches mit der minimalen Reisezeit zwischen i und j (t_{ij}) gewichtet wird. Dabei liegt hier ein einfacher linearer Zusammenhang zwischen Potential, Entfernung und Einfluss vor. Der resultierende Erreichbarkeitswert, z. B. in Minuten, gibt Auskunft über die relative Entfernung des Ausgangsortes zu allen anderen untersuchten Orten. Durch die Verbesserung der Anbindung zweier Orte wird der Wert der Standortindikatoren sinken. Ein möglichst kleiner Wert bedeutet für diesen Indikator eine gute Erreichbarkeit. Durch die fehlende Distanzabnahmefunktion grenzt sich dieser Indikator am deutlichsten von den Gravitationsmodellen ab. Kurze Distanzen werden nicht stärker gewichtet und vice versa (vgl. Gutiérrez, 2001, S. 232). Durch diesen Umstand ist der Indikator besonders durch die Abgrenzung des Untersuchungsgebietes beeinflussbar. Regionen in einer konstruierten Randlage sind automatisch benachteiligt (vgl. hierzu auch Abschnitt 3.3.2). Gutiérrez (1996, S. 230) argumentiert, dass zur sinnvollen Abgrenzung des Untersuchungsgebiets besonders ökonomische und politische Begründungen gefunden werden müssen, aber die benötigten Daten auch vorliegen bzw. beschaffbar sein sollten. Diese Betrachtungsweise zeigt jedoch auch, dass ein allgemeingültiges Vorgehen mit Hilfe der Standortindikatoren nicht gegeben ist. Die Methode kann zur Erfüllung bestimmter Forschungsziele und Hintergrundmotive modifiziert werden und erlaubt keine objektive Untersuchung, solange keine eindeutigen Kriterien für die Abgrenzung empirisch begründbar sind. Beispielsweise ist die Erstellung einer nationalen Studie meist zwar in ihrer Aussagekraft auf die Erreichbarkeit der nationalen Orte beschränkt, jedoch müssten für eine möglichst realistische Untersuchung auch Orte außerhalb der nationalen Grenze betrachtet werden (ähnlich bei Rietveld und Bruinsma, 1998, S. 269). Eine Studie, die dies außer Acht lässt, kann nur unter bestimmten Rahmenbedingungen unverzerrt sein.

3.3. Einschränkungen der konventionellen Indikatoren

Wie in den vorherigen Abschnitten aufgezeigt, sind die Erreichbarkeitsindikatoren besonders durch ihre parametrische Ausgestaltung gekennzeichnet und können leicht durch Einschränkungen, zusätzlich zu den bisherigen Aspekten der Potential- und Widerstandsdiskussion, modifiziert werden. Bei der Spezifizierung eines geeigneten Modells und der Untersuchung von Erreichbarkeit sollte dies stets beachtet werden (vgl. Kwan, 1998, S.192). Obwohl Bröcker (2006, S. 7 ff.) zeigt, dass der Logsum-Indikator (und damit der Potentialindikator) das Ergebnis von individuellen Zielentscheidungen innerhalb eines defi-

nierten Choice-Sets darstellt¹⁹ und die nicht bekannten Parameter aus Quelle-Ziel-Matrizen empirisch geschätzt werden können, ist dieser Ansatz bei großteiligen Untersuchungen oftmals aufgrund von Daten- und Aggregationsproblemen nicht anwendbar. Es fehlt daher eine eindeutige Definition oder ein Ansatz, der sich einheitlich durchgesetzt hätte. Dank dieses Zustands beschäftigt sich ein Großteil der Literatur damit, den Rahmen für passgenaue Indikatoren enger zu schnüren und Empfehlungen für die Verwendung und Weiterentwicklung abzugeben. In den folgenden Abschnitten soll exemplarisch die kritische Frage der internen Erreichbarkeit und ihrer Berücksichtigung sowie die Eingrenzung des Untersuchungsgebiets diskutiert werden. Darüber hinaus wird bei Betrachtung der empirischen Studien²⁰ anhand der konventionellen Partialindikatoren ersichtlich, dass fast ausschließlich unimodale Erreichbarkeitsanalysen durchgeführt wurden. Der Thematik der Verknüpfung von Multimodalität mit den konventionellen Indikatoren wird sich deshalb ebenfalls gewidmet.

3.3.1. Interne Erreichbarkeit

In Untersuchungen muss davon ausgegangen werden, dass nicht nur die Erreichbarkeit entfernter Regionen betrachtet werden kann, sondern auch der eigentliche Ausgangsort ein gewisses Eigenpotential bietet. Dieses sollte in der Erreichbarkeitsberechnung berücksichtigt werden, indem die innerhalb des Ausgangsortes möglichen Aktivitäten (interne Reisemöglichkeiten) einbezogen werden. Die sogenannte interne Erreichbarkeit ist besonders für die Betrachtung der Potentialindikatoren von Bedeutung, vor allem bei großen Raumeinheiten wie Großstädten oder Agglomerationen (vgl. Gutiérrez, 2001, S. 234 sowie Rietveld und Bruinsma, 1998, S. 40). Innerhalb dieser Einheiten liegen meist geringe Distanzen zu attraktiven Orten und gut ausgebaute Verkehrsnetze vor, sodass die interne Erreichbarkeit eine Schlüsselrolle bei der Betrachtung des Gesamtpotentials darstellen kann. Die paradoxe Situation, dass ein kleiner Ort eine höhere Erreichbarkeit aufweist als ein großer, benachbarter Ort, kann so ausgeschlossen werden.²¹ Des Weiteren befindet sich die Ausgangsregion, zumindest für die Verkehrsträger Straße und Schiene, meist auch unter den Zielwahlalternativen der Individuen und sollte demnach Eingang in die Indikatoren finden. Beispielsweise werden Arbeitsplätze in der eigenen Stadt aufgrund der Nähe zum Wohnort (solange dieser in der betrachteten Stadt liegt) wahrscheinlich gegenüber außerhalb gelegenen Arbeitsmöglichkeiten bevorzugt.

Pooler (1987, S. 277 ff.) zeigt, dass besonders die Größe der untersuchten Einheiten einen Einfluss auf das Eigenpotential hat. Je feiner und kleinteiliger ein Untersuchungsgebiet unterteilt wird, umso weniger relevant ist das Potential jeder einzelnen Einheit und somit auch das Potential des Ausgangsortes.

¹⁹ Bröcker (2006, S. 4 ff.) stellt dies anhand der Maximierung einer Benefit-Funktion bei gleichzeitiger Abwertung dieser durch den Aufwand der Distanzüberwindung, d. h. Kosten oder Zeit, mathematisch dar.

²⁰ Im Anhang 1 ist ein tabellarischer Überblick einer Auswahl (aus einer Vielzahl) von empirischen Studien dargestellt.

²¹ Vgl. Rietveld und Bruinsma, 1998, S. 256 f. Hier hat die Stadt Zaandam eine höhere Erreichbarkeit als Amsterdam im niederländischen Vergleich, weil das eigene Potential für Amsterdam nicht berücksichtigt wurde.

Wenn bei einer zonalen Untersuchung Zellen auf eine Größe von ca. einer Million Einwohnern aggregiert werden, spielt das Eigenpotential eine entscheidendere Rolle im Vergleich zu Zellen mit je 1000 Einwohnern. So zeigte Goodchild (1979) in einer Erreichbarkeitsstudie mit Potentialindikatoren für die Bundesstaaten der USA, dass das Eigenpotential durchschnittlich ca. 17 Prozent der Gesamterreichbarkeit generiert. In Kalifornien sind es, aufgrund der enormen Potentialwirkung der eigenen Population im Vergleich zur Population der Nachbarstaaten, sogar 61 Prozent (vgl. Pooler, 1987, S. 274). Eine enger gefasste Untersuchung (z. B. auf County-Niveau) würde das Eigenpotential eines jeden Bundesstaates weniger dominant erscheinen lassen.

Um somit die interne Erreichbarkeit angemessen zu berücksichtigen, wäre die Einbindung eines stadtinternen Verkehrsnetzes erforderlich. Für solch interne Netzwerke sind jedoch nur unzureichend Daten (z. B. stadtteilspezifisches BIP) verfügbar, die mit konventionellen Indikatoren kompatibel wären (vgl. Gutiérrez et al., 1996, S. 230 sowie Rietveld und Bruinsma, 1998, S. 40).

Seit der Nutzung von Potentialindikatoren wurde bspw. von Stewart (1947, S. 477) vorgeschlagen, zur Vereinfachung das Eigenpotential (z. B. die Bevölkerung) der betrachteten Region mit dem halben Radius der als kreisförmig approximierten Fläche, bei gleichmäßiger Verteilung der Bevölkerung innerhalb der Region, als innere Distanz d_i abzuwerten, was wiederum von Rich (1980, S. 19 f.) als willkürlich kritisiert wurde und zusätzlich die Annahme voraussetzt, dass einheitliche Flächendaten (z. B. von Städten) verfügbar sind (vgl. Rietveld und Bruinsma, 1998, S. 118). Es gibt bis zum heutigen Tage noch keinen Konsens in der Literatur, wie die innere Distanz und damit die interne Erreichbarkeit genau zu definieren ist (vgl. Mösgen, 2007, S. 82). Üblicherweise wird die innere Distanz nach der Vorschrift in Gleichung 8 ermittelt.

$$d_{ii} = \alpha \sqrt{\frac{\text{Fläche der Region } i}{\pi}} = \alpha r_i. \quad (8)$$

Je kleiner der Parameter α zur Gewichtung des Radius der betrachteten Region ist, desto geringer ist die innere Distanz und demzufolge wird der Beitrag der internen zur gesamten Erreichbarkeit größer (vgl. Mösgen, 2007, S. 82). Die Höhe von α ist in der Literatur jedoch keinesfalls einheitlich. Wie bereits aufgeführt, schlägt Stewart (1947, S. 477) den Wert $1/2$ vor. Frost und Spence (1995, S. 1837) zeigen, dass ein α von $1/3$ für städtische Bevölkerungsdichten mit deutlichem Zentrum-Peripherie-Gefälle repräsentativ sind. Bonsall (1975) zeigt, dass die durchschnittliche Distanz vom Zentrum zu jedem Punkt innerhalb der Fläche genau $2/3$ des Radius beträgt (vgl. Frost und Spence, 1995, S. 1838). Diesen Ansatz wählen bspw. auch Schulz und Bröcker (2007, S. 8) sowie Hesse et al. (2011, S. 21) für empirische Untersuchungen anhand des Potentialindikators.

3.3.2. Abgrenzung und Einteilung des Untersuchungsgebiets

Ein weiteres Gebiet, das die Aussagekraft einer Erreichbarkeitsstudie umfassend beeinflusst, ist die Frage nach der Abgrenzung des Untersuchungsgebiets insgesamt sowie die Unterteilung dieses Gebiets in Zonen oder Zellen. Handy und Niemeier (1997, S. 1178) weisen der räumlichen Aufteilung in Zonen sogar den größten Einfluss auf die Spezifizierung eines Indikators zu. Wie in Abschnitt 3.2.3 bereits angedeutet, ist die Demarkation des Untersuchungsgebiets ein kritischer Faktor für die gemessene Erreichbarkeit, v. a. bei Standortindikatoren. Der Ausschluss von Regionen, Ländern oder Kontinenten führt stets dazu, dass sich Punkte an den Grenzen des Untersuchungsgebietes in einer Randlage befinden. Aufgrund der Natur der Erreichbarkeitsmessung führt dies zu einer Einschränkung der möglichen Aktivitäten im Raum, besonders für grenznahe Gebiete. Dies wird deutlich, wenn Studien über den EU-Raum betrachtet werden. Hier fällt die Erreichbarkeit in den peripheren Regionen der EU (iberische Halbinsel, Süditalien, Skandinavien und Osteuropa) ab (vgl. Rietveld und Bruinsma, 1998, S. 40).²² Die Frage, welche Abgrenzung (ob politisch, kulturell oder geographisch motiviert) am zweckdienlichsten ist, offenbart großes Diskussionspotential, muss aber wohl für den Einzelfall festgelegt werden (vgl. Gutiérrez, 2001, S. 234). Jedoch können bereits kleine Änderungen des Untersuchungsgebiets eine Vergleichbarkeit von Studien verhindern (Rietveld und Bruinsma 1998, S. 41 f.). Einen Lösungsansatz könnte die Implementierung von Border Barriers bieten, wodurch die gewöhnliche Limitierung räumlicher Aktivitäten auf bestimmte, z. B. inländische, Gebiete nachgebildet werden kann. Dies ist vor allem für die Verkehrsträger Straße und Schiene relevant und weniger für den Luftverkehr. Somit verlören die Potentiale umliegender, z. B. ausländischer, Gebiete von vornherein an Bedeutung, sodass eine Nichtbetrachtung dieser Gebiete nur zu unerheblichen Verzerrungen führen würde.

Die Erreichbarkeitsermittlung im Raum kann entweder auf Basis von Regionen oder Zonen geschehen sowie auf die Betrachtung von Knoten beschränkt sein. Zur Messung der Zugänglichkeit wird bei Bahn- und besonders bei Flugverbindungen immer von Knoten ausgegangen, da diese Transportmittel keinen kontinuierlichen Netzzugang ermöglichen, wie es bspw. beim Straßennetz gegeben ist. Dabei ist folgendes zu beachten:

1. Erreichbarkeitswerte können für die einzelnen Knotenpunkte und deren Verbindungen untereinander errechnet werden. Dieses Vorgehen wird häufig für europäische Studien angewandt, die sich auf die Erreichbarkeit von Städten beschränken, z. B. Gutiérrez (2001), Martín et al. (2004) oder Martín und Reggiani (2007). Die Methodik findet aber auch Betrachtung bei deutschlandweiten Erreichbarkeitsanalysen, wie bspw. Hesse et al. (2011) zeigen. Hierbei werden meist Punkt-zu-Punkt-Verbindungen von Städten durch den Hochgeschwindigkeits-

²² Vgl. hierzu auch Evangelinos und Ebert (2011, S. 34 ff.) in Bezug auf die Erreichbarkeit der ostdeutschen Städte. Diese sind häufig schon dadurch benachteiligt, dass osteuropäische Wirtschaftszentren in Untersuchungen nicht berücksichtigt werden.

zugverkehr untersucht. Die Auswirkungen auf den ländlichen Raum sind aber meist ausgeklammert (vgl. Vickerman et al., 1999, S. 9 f.).

2. Knoten können als Abbildung für die gesamte Fläche einer räumlichen Einheit (z. B. Mittelpunkt der entsprechenden Zone) verwendet werden (vgl. Rietveld und Bruinsma, 1998, S. 39). Die Verwendung von räumlichen Einheiten unterliegt meist der Annahme, dass die Erreichbarkeit an allen Punkten der Zone gleichmäßig verteilt ist, d. h. dass zentrale Verkehrspunkte, Flughäfen oder Bahnhöfe der gesamten Zone die volle Zugänglichkeit liefern. Ein groß gewählter Maßstab für die Zonen oder ein stark aggregierter Wert für Potential oder Raumwiderstand würde in diesem Fall aber auch zu einer Verzerrung der Erreichbarkeit führen (vgl. Vickerman et al., 1999, S. 5). Dieses Argument stellt somit einen weiteren Grund dar, warum kleine Zonen bzw. kleine Untersuchungseinheiten zu präferieren sind.

Unbestritten bildet das Individuum oder ein Haushalt die kleinste beobachtbare Einheit im Raum. Somit erscheint die Schlussfolgerung logisch, dass die Beobachtung der individuellen Erreichbarkeit in ihrer Genauigkeit die zonalen, konventionellen Untersuchungen übertreffen müsste. Handy und Niemeier (1997) fanden selbst in kleinen, regionalen Zonen noch immer signifikante Variationen der individuellen Erreichbarkeit. Eine weitere Überlegung zur Steigerung der Genauigkeit bei der Erreichbarkeitsmessung ist die Zusammenfassung mehrerer Partialindikatoren in einem Messwert, wie im Abschnitt 3.5 beschrieben wird.

3.3.3. Unimodale versus multimodale Betrachtung der Erreichbarkeit

Die konventionellen Erreichbarkeitsindikatoren haben den Nachteil, dass sie in ihren üblichen formalen Ausprägungen lediglich für eine unimodale, d. h. auf einen bestimmten Verkehrsträger oder ein bestimmtes Verkehrsmittel ausgerichtete Betrachtung herangezogen werden können. Diese einseitige Sichtweise kann jedoch Verzerrungen des Erreichbarkeitsbildes zu Lasten eines einzelnen Verkehrsträgers hervorrufen. In der Realität führen Investitionen (Ausbau, Erweiterung, Neubau etc.) in einen einzelnen Verkehrsträger aber unter gewissen Bedingungen dennoch zu Verbesserungen des Erreichbarkeitsbildes im intermodalen Zusammenhang.²³ Dieser Idee kann folgendermaßen nachgekommen werden: Entweder man berücksichtigt in der Erreichbarkeitsbetrachtung für das Untersuchungsgebiet die jeweils kürzeste Reisezeit (unabhängig vom Verkehrsmittel) und vernachlässigt dabei die langsameren Verbindungen oder man verwendet die generalisierten Kosten der Raumüberwindung. Der zweite Ansatz wird bspw. von Wegener et al. (2001, S. 19) vorgestellt und ist in Gleichung 9 dargestellt:

$$c_{ijm} = v_m t_{ijm} + c_m d_{ijm} + u_m k_{ijm}. \quad (9)$$

²³ Bspw. wenn intermodale Netzanschlüsse verbessert werden: Bei einer Verkürzung der Reisezeit einer Fernlinienbusstrecke aufgrund von Straßenausbaumaßnahmen könnte ein verbesserter Anschluss an das bestehende ÖPNV-Netz generiert werden.

Hier stellen t_{ijm} , d_{ijm} und k_{ijm} die Reisezeit, Reisedistanz und Bequemlichkeit einer Fahrt von Ausgangsort i nach Zielort j mit Verkehrsmittel m dar. Darüber hinaus stellen v_m , c_m und u_m die monetäre Bewertung einer Reisezeiteinheit, die Kosten pro Distanzeinheit sowie die monetäre Bewertung der Anstrengung durch die Benutzung des Verkehrsmittels m dar (vgl. Wegener et al., 2001, S. 19).²⁴ Werden nun die zusammengesetzten generalisierten Reisekosten in Gleichung 10 statt den generalisierten Reisekosten für Erreichbarkeitsanalysen berücksichtigt, dann erhält man eine aggregierte Erreichbarkeitsbewertung, wobei der Parameter λ die Distanzsensibilität der reisenden Personen darstellt:

$$\bar{c}_{ij} = -\frac{1}{\lambda} \ln \sum_m \exp(-\lambda c_{ijm}). \quad (10)$$

Diese Modifikation der konventionellen Indikatoren ist bereits ein erster Schritt zur Abbildung von realitätsgetreueren Erreichbarkeitsbildern. Die Thematik der multimodalen Betrachtung sowie resultierende Synergieeffekte für die Verkehrsträger sollten jedoch weiterhin erforscht werden.

3.4. Sensitivitäten der Erreichbarkeitsindikatoren

Ähnlich zu den Berechnungen in Abschnitt 3.2.1 hinsichtlich der unterschiedlichen Widerstandsfunktionen soll auch hier eine beispielhafte Erreichbarkeitsberechnung für Ort i die Sensitivitäten der einzelnen Indikatoren aufzeigen. Dabei werden die Potentiale zweier Nachbarorte j und k betrachtet. Beide Orte haben ein Potential normiert auf 100. Ort j ist 10 Distanzeinheiten entfernt ($d_{ij} = 10$), Ort k dagegen 41 Einheiten ($d_{ik} = 41$). Für Ort i ergibt sich folgende Erreichbarkeitsfunktion:

$$A_i = \sum_{j=1}^n P_j * f(d_{ij}), \text{ d. h. } A_i = P_j * f(d_{ij}) + P_k * f(d_{ik}). \quad (11)$$

Aus nachfolgender Tabelle 2 wird ersichtlich, wie sich der Beitrag der Zielorte j und k zur Erreichbarkeit des Ausgangsortes i mit unterschiedlicher Parameterausprägung s in den verschiedenen Widerstandsfunktionen verändert. Dabei repräsentieren die inverse Potenzfunktion, die Exponentialfunktion und die Gauss'sche Normalfunktion erneut die Widerstandsfunktionen in den Fällen (D), (E) und (F). A_i repräsentiert die gesamte Erreichbarkeit von i , bei der Berücksichtigung von genau zwei Zielorten j und k . Des Weiteren sind jeweils die beiden Teilbeiträge der Zielorte zur Erreichbarkeit des Ausgangsortes pro Funktionsform abgebildet. Die Funktionsparameter werden von $s = 0,8$ bis $s = 2$, von $\beta = 0,1$ bis $\beta = 0,3$ sowie von $z = 10$ bis $z = 200$ variiert. In (D) ist ersichtlich, dass ein $s = 0,8$ einen deutlichen Unterschied zu $s = 2$ in der Distanzbewertung hervorruft. Beim Vergleich der Werte bei (F) wird verständlich, dass die Distanzen einen großen Einfluss haben. Nur bei einem hohen z und niedrigen Distanzen fließt das Potential des Ortes in die Bewertung signifikant mit ein. Bei Fortführung ähnlicher Untersuchungen kann man die geeignete Funktionsform ermitteln, ein ökonomischer Ansatz gestaltet die Suche jedoch umfassender. Schulz und Bröcker (2007, S. 9 f.) verweisen auf die Thematik des diskreten Entscheidungs-

²⁴ Des Weiteren können noch andere Kostenkomponenten (bspw. Opportunitätskosten, die aus Umsteige- oder Wartezeiten resultieren) berücksichtigt werden (vgl. Wegener et al., 2001, S. 19).

dells (Logit-Modell), aus welchem die Gravitationsmodelle hergeleitet werden können und stellen dar, dass die gesuchten Funktionsparameter (u. a. für die Distanzsensibilität) empirisch aus Pendlerdaten zu schätzen und in den Logsum-Indikator (und damit den Potentialindikator) einzusetzen sind.

(D)	$f(d_{ij}) = d_{ij}^{-s}$	$s=0,8$	$s=1$	$s=1,5$	$s=2$
	Beitrag von j zu A_i	15,85	10,00	3,16	1,00
	Beitrag von k zu A_i	5,13	2,44	0,38	0,06
	A_i	20,97	12,44	3,54	1,06
(E)	$f(d_{ij}) = \exp(-\beta d_{ij})$	$\beta=0,1$	$\beta=0,15$	$\beta=0,2$	$\beta=0,3$
	Beitrag von j zu A_i	36,79	22,31	13,53	4,98
	Beitrag von k zu A_i	1,66	0,21	0,03	0,00
	A_i	38,45	22,53	13,56	4,98
(F)	$f(d_{ij}) = \exp(-d_{ij}^2/z)$	$z=10$	$z=50$	$z=100$	$z=200$
	Beitrag von j zu A_i	0,00	13,53	36,79	60,65
	Beitrag von k zu A_i	0,00	0,00	0,00	0,02
	A_i	0,00	13,53	36,79	60,68

Tabelle 2: Einfluss zweier Orte auf die Erreichbarkeit bei variablem Raumwiderstand

Wenn im Vergleich zu den bisher betrachteten Indikatoren nun auch die Kumulationsindikatoren mit- einbezogen werden sollen, ergibt sich das Bild, welches aus Tabelle 3 abgeleitet werden kann.

(G)	$f(d_{ij}) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } d_{ij} \leq \delta \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$	$\delta=40$	$\delta=60$
	Beitrag von j zu A_i	100	100
	Beitrag von k zu A_i	0	100
	A_i	100	200

Tabelle 3: Erreichbarkeitsmessung mit Kumulationsindikatoren

In (G) wird nun von einer binären Widerstandsfunktion ausgegangen (Treppenwiderstand). Dabei werden exemplarisch die zwei Budgetgrenzen $\delta = 40$ und $\delta = 60$ sowie die resultierenden Beiträge der Zielorte j und k zu der Erreichbarkeit des Ausgangsortes i untersucht. Die Abgrenzung der Erreichbarkeitswerte aufgrund der Distanz wird deutlich. Die zu enge Grenze bei $\delta = 40$ verhindert die Potentialbetrachtung von Ort k mit $d_{ik} = 41$. Hierdurch sind schnell Verzerrungen der Erreichbarkeit möglich. Dynamische Raumwiderstandsfunktionen, wie in Tabelle 2 dargestellt, können die Abnahme des Potentials realitätsnäher abbilden, zumal Ort k nur eine Distanzeinheit außerhalb der Grenze liegt.

3.5. Synthese der Partialindikatoren

Die Anwendung von konventionellen Indikatoren zur Ermittlung von Erreichbarkeitskennzahlen hat sich als zweckmäßig für bestimmte Anwendungsfelder erwiesen. Jedoch fällt insbesondere im Vergleich der einzelnen, bisher vorgestellten und sehr heterogenen Indikatorvarianten auf, dass die resultierenden Rangfolgen der untersuchten räumlichen Einheiten einer Studie bei Anwendung verschiedener Indikatoren unterschiedliche Rückschlüsse auf die Erreichbarkeit zulassen (vgl. Martín und Reggiani, 2007, S. 559). Zur Schaffung eines indikatorübergreifenden Index der Erreichbarkeit ist es also nötig, die einzelnen Partialergebnisse in einer einzigen Kennzahl zusammenzufassen. So kann eine entsprechende

Rangfolge der untersuchten Regionen erstellt werden, wobei noch immer alle Indikatoren der konventionellen Ansätze untersucht und dessen relevante Informationen verwendet werden. Aus der Literatur sind zwei Verfahren bekannt und in Studien bereits umgesetzt worden: Die *Data Envelopment Analysis* (DEA) und die *Principal Component Analysis* (PCA).²⁵

Der angestrebte Vorgang beider Syntheseverfahren ist, den einzelnen Partialindikatoren eine Gewichtung zuzuweisen und sie zu einem umfassenden Messwert zu aggregieren. Die Methodik und somit auch die absoluten Ergebnisse beider Ansätze unterscheiden sich jedoch voneinander. Die relativen Ergebnisse spiegeln sich aber in sehr ähnlichen Rangfolgen wider, was u. a. von Zhu (1998, S. 50 ff.) anhand des Spearman Rangkorrelationskoeffizienten und Kendall's Tau nachgewiesen wurde. Im Folgenden soll kurz auf die jeweiligen Spezifikationen und Eigenheiten der Verfahren und ihrer Ergebnisse eingegangen sowie ihre Aussagekraft bewertet werden.

3.5.1. Data Envelopment Analysis

Bei der DEA²⁶ handelt es sich um ein lineares Optimierungsverfahren aus der Produktionstheorie, welches auf Farrell (1975) zurückgeht und von Martín et al. (2004) erstmals zur Erreichbarkeitsanalyse verwendet wurde. Innerhalb des Verfahrens wird jede der betrachteten Raumeinheiten mit ihren Partialindikatorergebnissen (als multiple Inputs bzw. Outputs) gegenüber allen anderen Einheiten verglichen. Es werden dominante Kombinationen von Indikatorwerten gegenüber anderen gesucht und so eine Rangfolge gebildet. Indikatoren, bei denen ein niedriger Wert eine hohe Erreichbarkeit bedeutet, werden als Inputs deklariert (Standortindikatoren); Indikatoren, bei denen ein hoher Wert ebenfalls eine hohe Erreichbarkeit bedeutet, werden für das DEA-Verfahren als Outputs klassifiziert (vgl. Martín et al., 2004, S. 704 ff.). Die Autoren legen eine Outputorientierung fest, d. h. mit den gegebenen Inputs soll ein maximaler Output erreicht werden. Des Weiteren betrachten sie, aufgrund der Heterogenität der einzelnen Städte und Regionen, variable Skalenerträge. Die Frage nach der zugrundeliegenden Technologie und der damit verbundenen Gewichtung der einzelnen Partialindikatoren kann mit Hilfe der DEA umgangen werden, da für jeden betrachteten Ort, d. h. für jede Input-Output-Kombination, ein optimaler Erreichbarkeitswert (Effizienzwert) ermittelt wird, der auf den endogen gewichteten Ergebnissen der Partialindikatoren beruht.

Die Effizienzergebnisse werden als relationale Werte ausgegeben und sind kleiner oder gleich Eins. Der Maximalwert von Eins wird innerhalb einer Untersuchung stets an die untersuchten Raumeinheiten mit der besten Erreichbarkeit, sprich effizientesten Input-Output-Kombination, vergeben. Dies können auch mehrere, verschiedene Einheiten sein. Die Ineffizienz der anderen Einheiten ergibt sich anhand der rela-

²⁵ Vgl. u. a. Martín und Reggiani (2007), Martín et al. (2004) sowie Hesse et al. (2011).

²⁶ An dieser Stelle soll kein Überblick über die Methodik der Dateneinhüllanalyse geschaffen werden, sondern eher die auf das Problem der Erreichbarkeitsermittlung bezogenen Aspekte beleuchtet werden. Einen tieferen Einblick in die Materie findet sich bei Coelli (1996 und 2005) sowie bei Charnes et al. (1978).

tiven Differenz zu den effizienten Einheiten. Im Verhältnis zu diesen werden alle anderen Effizienzwerte errechnet und so in eine Rangfolge gebracht.

Zwischen unterschiedlichen Untersuchungen, bei denen die DEA angewandt wird, sind Vergleiche der Werte nicht aussagekräftig, ebenso wenig innerhalb einer Untersuchung, bei der zwei Projektzustände intertemporal analysiert werden (ähnlich zu der Studie von Martín et al., 2004). Deutlich wird dies bei einer zentralen Region, die in beiden Szenarien den Bestwert erzielt. Hier kann keine Aussage über die absolute Veränderung der Erreichbarkeit getroffen werden, wenn in beiden Fällen der Effizienzwert von 1,0 erzielt wird. Nur in Relation zum z. B. Zweitbesten oder Schlusslicht eines Rankings sind Veränderungen interpretierbar.

Weitere Kritik an der Verwendung dieser Methode wird in der Erreichbarkeitsstudie von Martín et al. (2004) jedoch nicht ausreichend dargelegt und soll nachfolgend reflektiert werden. Als erste große Kritikpunkte sind die willkürliche Wahl der Inputs und Outputs sowie die Entscheidung für eine Input- bzw. Outputorientierung zu nennen. Die Definition eines Inputs als für die Herstellung einer Outputeinheit notwendigen Produktionsfaktor lässt sich nur sehr bedingt auf die Problematik der Erreichbarkeitsmessung übertragen. Streng genommen stellen die Kennzahlen aller zuvor beschriebenen Erreichbarkeitsindikatoren das Ergebnis der Verkehrsinfrastrukturausstattung dar und sind prinzipiell als Output zu sehen, wohingegen die Infrastrukturausstattung als Input zu interpretieren wäre.²⁷ Jedoch lässt sich einer Raumeinheit in einem Verkehrsnetz nicht ohne Weiteres ein spezifischer Ausstattungsgrad zuordnen, da sie letztendlich vom gesamten Netz profitieren kann. Weiterhin sollen nach dem Begriff der Effizienzanalyse Faktoren, welche keinem oder nur schwachem Einfluss der betrieblichen Entscheidungseinheit unterliegen, die ausschlaggebende Orientierung der DEA bestimmen. Dementsprechend fehlt hier als auch bei der Konfiguration der Skalenerträge eine fundierte sachliche Begründung für die Auswahl in einer Erreichbarkeitsanalyse.

Ein weiteres, jedoch nicht gravierendes Problem (da jede Einheit vergleichend beurteilt wird) stellen Ausreißer in den Daten dar. Da sich das relative Ranking der einzelnen Städte immer an den effizienten räumlichen Einheiten orientiert, sind die Ergebnisse gegenüber möglichen Extremwerten sehr anfällig und es kann somit zu verzerrenden Erreichbarkeitsergebnissen kommen. Auch muss bei Hinzunahme von weiteren Einheiten eine komplett neue DEA-Analyse angefertigt werden, da die Effizienzwerte aller Entscheidungseinheiten miteinander verglichen werden müssen.

²⁷ In einem Gedankenexperiment wären auch folgende Varianten für eine DEA-Analyse möglich: Ausstattungsindekatoren (z. B. Anzahl der Zugänge zum Transportnetzwerk) oder gar klassische Inputs (Kapital, Arbeit, etc.) könnten als DEA-Inputs deklariert werden und jeder einzelne Partialindikator würde dem folgend als DEA-Output getestet.

3.5.2. Principal Component Analysis

Die Principal Component Analysis (PCA, sog. Hauptkomponentenanalyse) ist ein Verfahren, das aus der multivariaten Statistik stammt und versucht, das benötigte, umfangreiche Datenset zur Ermittlung einer aggregierten Bewertung zu reduzieren (vgl. Jolliffe, 2002, S. 1). Martín und Reggiani (2007, S. 562 ff.) verwenden neben der DEA erstmals auch die PCA, um einen synthetischen Index der Erreichbarkeit aus den vorher ermittelten konventionellen Indikatoren (Standort-, Kumulations- und Potentialindikator) zu erstellen.²⁸ Innerhalb des Verfahrens werden den einzelnen Indikatoren Einflussgewichte zugewiesen, die darstellen, in welcher Größenordnung und mit welchem Vorzeichen die Werte einen synthetisierten Erreichbarkeitsindex beeinflussen. Dabei soll besonders der Informationsverlust aus der Zusammenfassung der Indikatoren vermieden werden. Hierfür wird die Korrelation der einzelnen Indikatoren überprüft und die wichtigsten ihnen zugrundeliegenden Variablen, die *Principal Components* (PC), identifiziert (vgl. Zhu, 1998, S. 52 f.). Dies geschieht analog zu einer Regressionsanalyse, bei welcher versucht wird, eine lineare Funktion mit möglichst wenig Abweichung zu allen vorhandenen Datenpunkten zu finden. Im Gegensatz dazu werden bei der PCA die ermittelten und standardisierten Erreichbarkeitskennzahlen der Raumeinheiten als Vektoren dargestellt. Zwischen diese Vektoren werden anschließend Schwerpunktgeraden gelegt. Dabei interpretiert man die Geraden mit den geringsten Abweichungen zu den Vektoren als wichtigste (Haupt-) Komponenten (vgl. Jolliffe, 2002, S. 168). Diese sollte einen möglichst großen Teil der Varianz erklären.²⁹

Bei Martín und Reggiani (2007, S. 563) ergibt sich ein Gewichtungsgefüge, das ihnen erlaubt, ein neues synthetisches Ranking der untersuchten Regionen zu erstellen. In ihrem neuen Index über die Erreichbarkeit ausgewählter europäischer Städte durch den Spanischen Hochgeschwindigkeitszugverkehr streuen die Werte zwischen -3,588 für Porto und 4,567 für Paris. Es zeigt sich, dass die Resultate erneut eine relationale Beziehung aufweisen (ähnlich der DEA), jedoch gibt es keine festgelegte Ober- oder Untergrenze und somit auch keine absolut effizienten Raumeinheiten. Dieser mittels PCA ermittelte Syntheseindex dient demnach nur einem relativen Vergleich der untersuchten Städte. Da es sich um ordinal skalierte Daten handelt, sind die absoluten Zahlen nicht verwertbar sowie dimensionslos. Lediglich das Ranking, d. h. die relativen Abstände zueinander, mit einer zugehörigen Benchmark (z. B. Paris) kann als Erreichbarkeitsbild gedeutet werden. Sollten Städte der Betrachtung hinzugefügt werden, so muss eine erneute Synthese stattfinden.

²⁸ Hesse et al. (2011) wenden diese Art der Synthese für eine Erreichbarkeitsstudie des Schienenpersonenverkehrs für Deutschland an.

²⁹ Vgl. Adler und Golany (2001, S. 265). Sie zeigen, dass der Informationsverlust bei Verwendung von wenigen PC im Vergleich mit Originaldaten marginal ausfällt, sobald die PC zwischen 80 und 90 Prozent der Varianz erklären können.

3.6. Rückblick auf die konventionellen Indikatoren

Wie oben bereits angeführt, sind die konventionellen Indikatoren jeweils mit eigenen Schwierigkeiten und uneindeutigen Aussagen belegt. Die Potentialindikatoren sind auf die Festlegung und anschließende Messung einer Potential- und einer Widerstandskomponente angewiesen. Bei den Kumulationsindikatoren wird die angenommene Zeitgrenze mehr oder weniger willkürlich gesetzt, damit einhergehend die einzubeziehenden Zielregionen bestimmt sowie daraus resultierend der Erreichbarkeitswert der untersuchten Region stark beeinflusst. Standortindikatoren berücksichtigen den Raumwiderstand nicht und können durch die Festlegung der räumlichen Abgrenzung von und innerhalb eines Untersuchungsgebiets stark beeinflusst werden. Auch mit synthetischen Indikatoren ist keine genauere Untersuchung möglich. Die Ergebnisse sind weiterhin auf die Aussagekraft der konventionellen Indikatoren beschränkt. Beispielsweise kann für den Effekt der Lagegunst (Peripherie innerhalb des Untersuchungsgebietes und geografische Gegebenheiten) nicht komplett kontrolliert werden, hier ist weiterer Forschungsbedarf gegeben. Die Synthese von Indikatoren liefert zwar einen Erreichbarkeitswert, der mehrere Aspekte in einer Kennzahl vereint, jedoch sind die Ergebnisse von ihrer Aussagekraft her ähnlich denen der Partialindikatoren. Somit kann gesagt werden, dass die bisher betrachteten Indikatoren relativ vielen Annahmen unterliegen. In Ermangelung an Alternativen wurden diese in der Vergangenheit jedoch vorrangig eingesetzt, werden aber sukzessive durch die Realität näher abbildende Erweiterungen³⁰ ergänzt oder gar durch modernere Verfahren abgelöst, die in Abschnitt 4 vorgestellt werden.

Konventionelle Erreichbarkeitskennzahlen benötigen einen Kontext zur Interpretation (vgl. Gutiérrez, 2001, S. 233 f.). Es ist in keinem Falle sinnvoll, die Erreichbarkeit nur für einen einzigen Ausgangspunkt zu bestimmen. Ohne den Vergleich der ermittelten Kennzahlen mehrerer Raumeinheiten kann auch der simpelste Index seine Aussagekraft verlieren. Pirie (1979, S. 299 ff.) argumentiert, dass die Messung der konventionellen Erreichbarkeit immer an den Heimat- bzw. Wohnorten der Haushalte stattfindet (sog. *outbound accessibility*). Jedoch ist dies einen Schritt zu weit gedacht. Die Bestimmung von Start-Ziel-Paaren legt lediglich den Ausgangspunkt oder -knoten fest und ist für alle sozioökonomischen Typen, Reisezwecke und bestenfalls auch Verkehrsmittel gültig. Eine Betrachtung von Reiseketten ist hier nicht impliziert, jedoch machen die konventionellen Indikatoren auch keine Unterscheidung zwischen den Reisezwecken. Die Erreichbarkeitskennzahl gibt Auskunft über das aggregierte Potential, am Zielort den Einkaufsbedürfnissen, der Arbeit oder Freizeitangeboten nachzugehen. Wie vielfach formuliert, ist die Frage nach Erreichbarkeit eng mit dem zu untersuchenden Gebiet verbunden und hängt mit dem analysierten Kontext zusammen (vgl. Guy, 1983, Handy und Niemeier, 1997 sowie Kwan, 1998).

Trotz der aufgezeigten Schwächen ist die dominante Stellung der konventionellen Indikatoren sowohl in der Literatur als auch in dieser Arbeit aber nicht unbegründet. Die einfache Anwendbarkeit der formu-

³⁰ Vgl. Rietveld und Bruinsma (1998, S. 116 ff.), welche den Potentialindikator um Verkehrsmittelfrequenzen erweitern.

lierten Indikatoren machte sie zunächst populär. Dazu ist der Datenbedarf für die meisten Studien gering, verglichen mit moderneren Methoden. Ergebnisse konventioneller Untersuchungen sind leicht zu erklären und damit einem breiten Publikum zugänglich, was die interdisziplinäre Diskussion um ein Vielfaches vereinfacht.

4. Individuelle Erreichbarkeit

Dieser Abschnitt gibt einen kompakten Überblick über die Ansätze zur modernen Messung der individuellen Erreichbarkeit, welche als Erreichbarkeit von Orten durch ein durchschnittliches Individuum interpretiert werden kann. Dies soll zur kontextualen Einordnung der bisher erläuterten konventionellen Ansätze dienen, die in ihrer Form schon seit Mitte des 20. Jahrhunderts bestehen und zwar durch neuerliche Verwendungsgedanken (z. B. synthetische Ansätze oder die Berücksichtigung von Bedienfrequenzen) erneut Forschungsimpulse erhalten haben, dennoch vor ihrer Ablösung durch komplexere Verfahren stehen.

Die Messung der Erreichbarkeit mit konventionellen Indikatoren bleibt, wie anfangs erwähnt, auf die Untersuchung von Raumeinheiten begrenzt. Nach Pirie (1979, S. 299 ff.) sind diese Modelle damit nicht geeignet, individuelle Erreichbarkeit zu messen. Auch mit den synthetisierten Indikatoren bleibt die Aussagekraft auf zonale Erreichbarkeit beschränkt, sie wird nur „mehrdimensional“ ermittelt. Es ist auch weiterhin nicht möglich, individuelle Präferenzen, u. a. bei der Wahl des Verkehrsmittels oder eines bevorzugten Verkehrsknotens, zu berücksichtigen. Bei konventionellen Indikatoren werden lediglich die Start-Ziel-Verbindungen zwischen den Zonen oder Knoten untersucht. Erreichbarkeit wird damit als eine Eigenschaft einer geographischen Einheit interpretiert (vgl. Kwan und Weber, 2003, S. 342). Dem folgend wird die Erreichbarkeit einer Ausgangszone, jedoch nicht des tatsächlichen Wohnortes der Individuen gemessen. Die zunehmend erkannte Signifikanz der flexiblen Erfassung von Wegekettensinnerhalb des täglichen Reiseverhaltens ist für die Betrachtung der individuellen Erreichbarkeit aber ein weiterer Schlüsselfaktor (vgl. Kwan, 1998, S. 192). Dies erfordert jedoch den Einsatz disaggregierter Modelle.

Deutlich wird der Drang nach höherer Genauigkeit auch dadurch, dass sich argumentativ Forderungen nach möglichst kleinen Untersuchungseinheiten ergeben (vgl. Abschnitt 3.3.1). Hier ist zwar zunächst noch eine möglichst feingliedrige Aufteilung der zonalen Untersuchungseinheiten gemeint, aber im Endergebnis sollten die Individuen als kleinste Einheit im Zentrum der Untersuchungen stehen.³¹ Dank moderner GIS-Systeme ist die Aggregation von einer Masse an individuellen Daten zu einem zonalen Wert (mit höherer Aussagekraft) jederzeit wieder möglich (vgl. Miller, 1999). Zunächst ist es aber erforderlich, dass individuelle Präferenzen näher betrachtet werden.

³¹ Selbst Untersuchungen, welche punktbasierete Erreichbarkeit ermitteln (vgl. Guy, 1983, 219 ff.) bleiben auf ein ungenaues Niveau beschränkt. Die Annahme, dass die Erreichbarkeit eines Individuums auf der Erreichbarkeit eines Ausgangspunktes beruht, kann auch hier nicht ausgeräumt werden (vgl. Kwan, 1998, S. 192).

4.1. Nutzenbasierte Erreichbarkeitsmessung

Die Erreichbarkeit ist innerhalb der nutzenbasierten Ermittlung nicht mehr als Attribut eines Ortes, sondern als das eines Individuums zu verstehen. Die Bewertung von Aktivitäten und Alternativen ergibt sich nun aus der Anzahl der vom Individuum selbst betrachteten Möglichkeiten, Aktivitäten nachzugehen (vgl. Dong et al., 2006, 166). Zur nutzenbasierten Erreichbarkeitsmessung wird auf den methodologischen Apparat mikroökonomischer Ansätze zurückgegriffen. Die zugrunde gelegte *random utility* (Zufallsnutzen-) Theorie³² unterstellt, dass die Individuen aus einer Menge von Beförderungsalternativen (entsprechend der verfügbaren Verkehrsmittel) jene wählen, die ihnen den höchsten Nutzen stiftet (vgl. Miller, 1999, S. 194). Für die Vorhersage, welche Alternative gewählt wird, ist der Nutzen aber nur zu einem Teil deterministisch. Der andere Teil ist eine stochastische Nutzenkomponente. Miller (1999, S. 194) formuliert die Ausgangsgleichung 12 zur Bestimmung der Erreichbarkeit als nutzenbasierte Entscheidung simplifiziert als den erwarteten maximalen Nutzen aus den betrachteten Reisealternativen, um zu dem gewünschten Ort zu gelangen:

$$A_i = E[\max_{j \in C_i} U_{ij}], \text{ mit } U_{ij} = u_{ij} + \varepsilon_{ij}. \quad (12)$$

Dabei repräsentiert u_{ij} den deterministischen, beobachtbaren Teil des Nutzens und ε_{ij} den stochastischen, nicht beobachtbaren Nutzenanteil für Alternative j . Die Alternative kommt aus einer Menge von Beförderungsalternativen C_i (sog. choice set) für das Individuum i . Jedoch merkt Miller (1999, S. 194) auch an, dass für die Interpretation der Erreichbarkeit nach Gleichung 12 weitere Annahmen nötig sind, die bei Ben-Akiva und Lerman (1979, S. 654 ff.) ausgearbeitet wurden. Es zeigt sich, dass sich auf Basis der erwarteten maximalen indirekten Nutzenfunktion aus Gleichung 12 ein allgemeineres Modell der nutzenbasierten Erreichbarkeit formulieren lässt (nach Dong et al., 2006, S. 165 f.).

Nach Weibull (1976) sind verschiedene Voraussetzungen für einen Erreichbarkeitsindikator einzuhalten. Ben-Akiva und Lerman zeigen (1985, S. 301 ff.), dass auch die von Miller (1999, S. 194) verwendete Form den Axiomen von Weibull (1976) weitestgehend genügt:

- Mit zunehmender Anzahl an Alternativen nimmt der erwartete Nutzen nicht ab,
- Der erwartete Nutzen nimmt nicht ab, wenn sich der deterministische Nutzen einer Alternative erhöht.

Miller (1999, S. 194 f.) zeigt dies an seiner Ausgangsformulierung in Gleichung 12, indem er nach dem deterministischen Nutzenanteil u_{ij} ableitet und so zwei neue Gleichungen erhält:

$$\frac{\partial E[\max_{j \in C_i} U_{ij}]}{\partial u_{ij}} = Pr_i(j|\mathbf{u}) \quad (13)$$

³² Für einen Überblick über die Theorie und Formulierung vgl. z. B. McFadden (1974 und 1978) sowie Ben-Akiva und Lerman (1979 und 1985).

$$\sum_{j \in C_i} \frac{\partial E[\max_{j \in C_i} U_{ij}]}{\partial u_{ij}} = 1. \quad (14)$$

Gleichung 13 zeigt, dass die partielle Ableitung des erwarteten maximalen Nutzens nach dem deterministischen Nutzenanteil der Alternative j der Auswahlwahrscheinlichkeit $Pr_i(j|\mathbf{u})$ dieser Alternative entspricht. Da die Summe aller Auswahlwahrscheinlichkeiten aus C_i gleich Eins sein muss, folgt aus 13 die Gleichung 14, welche beinhaltet, dass eine absolute Erhöhung des deterministischen Nutzens einer jeden Alternative j um einen fixen Wert den gesamten Erreichbarkeitswert um denselben Wert erhöht. Damit ist für die Erreichbarkeit nur der deterministische Teil des Nutzens als relevant zu betrachten. Dies ist sinnvoll, da der stochastische Teil nicht ex ante zu bestimmten ist. Miller (1999, S. 195) leitet nach Ben-Akiva und Lerman (1979, S. 658) die Auswahlwahrscheinlichkeiten der Alternative mit dem maximalen Nutzen wie in Gleichung 15 dargestellt ab.

$$A_i = E[\max_{j \in C_i} u_{ij}] = \sum_{j \in C_i} \int Pr_i(j|\mathbf{u}) d\mathbf{u}. \quad (15)$$

Bei Zugrundelegung von extremwertverteilten³³ Störtermen (stochastische Komponente) ergibt sich Gleichung 16, welche nach monotoner Transformation dem Term des Nenners der Wahrscheinlichkeitsgleichung im bekannten multinomialen Logit-Modell³⁴ entspricht. Für die individuelle Erreichbarkeit ergibt sich demnach:

$$A_i = E[\max_{j \in C_i} u_{ij}] = \frac{1}{\mu} \ln \sum_{j \in C_i} \exp(\mu u_{ij}) + K. \quad (16)$$

Dieses Modell mit dem Skalierungsparameter μ , der die Verteilung der Extremwerte beschreibt und häufig auf Eins gesetzt wird, drückt den maximalen Erreichbarkeitswert eines Individuums innerhalb eines multinomialen Logit-Modells aus (vgl. Miller 1999, S. 195). Im allgemeinen Sprachgebrauch wird Gleichung 16 auch als Logsum-Indikator bezeichnet. Wird $K = 0$ gesetzt, damit die Erreichbarkeit Null entspricht, wenn alle systematischen Nutzenwerte Null sind und diese Nutzenwerte so skaliert werden, dass der Parameter $\mu = 1$ ergibt, entsteht Gleichung 17:

$$A_i = \ln \sum_{j \in C_i} \exp(u_{ij}) \quad (17)$$

Die formale Ausgestaltung erscheint zunächst recht simpel, da der persönliche Erreichbarkeitswert lediglich durch einen Erwartungswert bestimmt wird. Allerdings hängt die endgültige Ausarbeitung eines Modells in hohem Maße von der Güte und Komplexität der verwendeten indirekten Nutzenfunktion ab. Zur Verarbeitung können umfassende, disaggregierte Daten über individuelle Präferenzen, Kosten und Nutzen von Nöten sein.

³³ Extremwertverteilung Typ I bzw. Gumbel-Verteilung.

³⁴ Auswahlwahrscheinlichkeit im multinomialen Logit-Modell: $P_{ni} = \frac{e^{V_{ni}}}{\sum_{j=1}^J e^{V_{nj}}}$.

Ein Vorteil der Messung individueller Erreichbarkeit über Nutzenwerte ist die Möglichkeit, anhand der Division der Gleichung 16 durch einen Kostenkoeffizienten den Nutzenwerten konkrete Reisekosten zuzuweisen (vgl. Ben-Akiva und Lerman, 1985, S. 304). Ebenso ist es dadurch wie in Gleichung 18 dargestellt möglich, Veränderungen des maximalen erwarteten Nutzens zu berechnen, wenn sich konkrete beobachtbare Nutzen- oder Kostenveränderungen ergeben (vgl. Miller 1999 S. 195 ff., nach Ben-Akiva und Lerman 1979, 1985):

$$\Delta A_i = \frac{1}{\mu} \ln \sum_{j \in c_i^1} \exp(\mu u_{ij}^1) - \frac{1}{\mu} \ln \sum_{j \in c_i^2} \exp(\mu u_{ij}^2) = u_{ij}^1 - u_{ij}^2. \quad (18)$$

Dieser direkte Vergleich zweier Zustände stellt einen weiteren Vorteil der individuellen Erreichbarkeitsmodelle dar. Er lässt eine Untersuchung von Projektwirkungen oder politischen Entscheidungen, beschränkt auf wirklich betroffene Individuen, zu und kann konkrete monetäre Nutzenveränderungen aufzeigen.

Wie bereits angedeutet, ist die zentrale Komponente der Erreichbarkeit die verwendete indirekte Nutzenfunktion. Über ihre Spezifikation kann der Erkenntnis- und Genauigkeitsgewinn der nutzenbasierten Erreichbarkeit bestimmt werden und Schwächen konventioneller Indikatoren behoben werden. Von Kwan (1998, S. 195 f.) wurde eine Vernachlässigung der zeitlichen und räumlichen Begrenzung von Aktivitäten jedes Individuums in konventionellen Modellen ausgemacht. Das bis hierher vorgestellte Modell der nutzenbasierten Erreichbarkeitsmessung liefert einen guten Ansatz, um solche Beschränkungen auf individueller Ebene zu berücksichtigen.

4.2. Die räumliche und zeitliche Komponente der Erreichbarkeit

Miller (1999, S. 209) erklärt, dass die Verwendung einer temporalen Komponente in Erreichbarkeitsstudien zu konsistenteren und realistischeren Ergebnissen führen kann. Aktivitäten können zu einem bestimmten Zeitpunkt an einem bestimmten Ort stattfinden und haben eine endliche Dauer (vgl. Miller, 1999, S. 189). Die zeitliche Komponente wird weiterhin durch die Zeitbedürfnisse zur An- und Abreise (unterschiedliche Geschwindigkeiten der Verkehrsmittel, tageszeitbedingten Staus), dem mindestens notwendigen Zeitaufwand für die Aktivität am Zielort und der Verfügbarkeit dieser Aktivität (Öffnungszeiten etc.) beeinflusst (vgl. Kwan und Weber, 2003, S. 346). Miller (1999, S. 198) stellt eine spezifische Nutzenfunktion vor, die sowohl die zeitlichen als auch die räumlichen Aspekte aufgreift:

$$u(a, T, t) = a^\alpha T^\gamma \exp(-\lambda t), \text{ mit } a, t, T, \alpha, \gamma, \lambda \geq 0. \quad (19)$$

In Gleichung 19 ist a die Attraktivität der Aktivität an der Zieldestination, T das für das Individuum verfügbare Zeitbudget, um an Aktivitäten teilzunehmen und t die benötigte Reisezeit. α , γ und λ sind die zugehörigen Koeffizienten. Miller (1999, S. 198) zeigt zudem, dass diese Form den von Weibull (1976, S. 359 ff.) definierten Axiomen für Erreichbarkeitsfunktionen entspricht.

In seiner Arbeit beruft sich Miller (1999) auf ein von Hägerstrand (1970) entwickeltes Konzept von Zeit-Raum-Prismen. Diese sind als Raum der Interaktionsmöglichkeiten eines Individuums innerhalb einer Zeitbeschränkung (z. B. eines Tages) zu verstehen. Durch diese Form erhält die individuelle Erreichbarkeit eine räumliche und eine zeitliche Komponente, die die wirklichkeitsgetreue Abbildung der Erreichbarkeitssituation gegenüber konventionellen Indikatoren stark erhöht (vgl. Pred, 1977, S. 211 und Miller, 1999, S. 188 ff.). Zur Umsetzung der Messung von Erreichbarkeit auf Basis von Raum-Zeit-Prismen erweitert Miller (1999, S. 199) die Nutzenfunktion (19) um räumliche Einschränkungen: Ein Individuum kann eine fixe Aktivität am Ort i erst zu einer gewissen Zeit t_i verlassen und muss an einem Ort j zu t_j noch einer weiteren Aktivität nachgehen (die Orte i und j können gleich sein). Der Nutzen einer Aktivität in Ort k zwischenzeitlich nachgehen zu können ist somit:

$$u_{ij}(a_k, T_k, t_k) = a_k^\alpha T_k^\gamma \exp(-\lambda t_k) \quad (20)$$

wobei

$$t_k = [d(x_i, x_k) + d(x_k, x_j)]v^{-1} \quad (21)$$

mit x_i als Standortvektor für i , $d(x_i, x_k)$ als Distanz von i nach k sowie v als durchschnittliche Reisegeschwindigkeit. Für T_k gilt, dass keine minimale Durchführungszeit einer Aktivität berücksichtigt wird (d. h. jede positive Durchführungszeit einer Aktivität bringt dem Individuum Nutzen³⁵):

$$T_k = \begin{cases} t_j - t_i - t_k > 0 \\ \text{sonst } 0 \end{cases} \quad (22)$$

Die spezifische Nutzenfunktion der Gleichung 20 setzt er in die in Abschnitt 4.1 erörterte Funktion der individuellen Erreichbarkeit (Gleichung 16) ein, um ein vollständiges Erreichbarkeitsmodell für ein betrachtetes Zeitprisma mit m flexibel wählbaren Aktivitäten, die jeweils in den festgelegten Standorten i und j erreicht werden können, zu erhalten (vgl. Miller, 1999, S. 200):

$$A_i = \frac{1}{\mu} \ln \sum_{k=1}^m \exp(a_k^\alpha T_k^\gamma \exp(-\lambda t_k)) \quad (23)$$

Somit entsteht ein vollständiges Modell maximaler individueller Erreichbarkeit, in einem begrenzten Raum mit einem festen Zeitbudget.³⁶ Individuen können nur innerhalb der räumlichen Grenzen, die durch ihre zeitliche Beschränkung auftreten, an Aktivitäten teilnehmen, was eine realistische Abbildung von tatsächlichen Verhaltensmustern darstellt (vgl. Miller, 1999, S. 187, Kwan und Weber, 2003, S. 349 und Martín und Reggiani, 2007, S. 557). Natürlich ist dies nur ein erster und dazu noch recht simpler Ansatz, weil zunächst noch viele vereinfachende Annahmen nötig sind. Jedoch deutet ein solcher Ansatz

³⁵ Dieser Nutzen kann aber je nach Ausprägung des Parameters γ auch relativ klein sein. Obwohl hier die Schwellenwerte der Durchführungszeiten unberücksichtigt bleiben, könnten sie auch mit etwaigen anderen Spezifizierungen (z. B. delay time) im Modell adaptiert werden (vgl. Miller, 1999, S. 199).

³⁶ Ganz nach dem Vorbild Hägerstrands (1970). Auch nach den Axiomen von Weibull (1976, 1980), die als allgemeingültige Spezifikation für Erreichbarkeitsmodelle angesehen werden, ist dieses Modell gültig (vgl. Miller 1999, S. 198).

in die Richtung von anspruchsvolleren Modellen. Die Integration der Reisegeschwindigkeiten in reale Verkehrsnetze anstelle der vereinfachenden Annahme von einheitlichen Durchschnittsgeschwindigkeiten und die Ausweitung auf ein komplexes Netz sind Aufgaben, die nicht mehr so einfach zu lösen sind, jedoch durch GIS-Unterstützung zu einer Veränderung der Erreichbarkeitsmessung führen werden.

5. Ausblick

Aus der Diskussion der Erreichbarkeitsansätze wird deutlich, dass die Ansprüche an den Gehalt von Erreichbarkeitskennzahlen (vgl. Abschnitt 2.2) bereits über die Aussagekraft der konventionellen Indikatoren hinausgehen. Es stellt sich die Frage, wie potenzielle Interaktion aus Potentialindikatoren interpretiert werden sollte. Abgesehen von einer ordinalen Rangfolge der Erreichbarkeitswerte von Orten, die in konventionellen Ansätzen ermittelt wird, bleibt die Aussagekraft beschränkt. Trotzdem versprechen die Potentialindikatoren, auch wegen ihrer vergleichsweise niedrigen Komplexität, noch immer ein probates Instrument zur Erfassung von makroskopischen Zusammenhängen zu sein.

Als Argument für einen Paradigmenwechsel hin zu individueller Erreichbarkeitsmessung ist an erster Stelle der schon zuvor erwähnte, höhere Realismus zu beachten, auch wenn ein erhöhter Aufwand zur Datenbeschaffung besteht. Dank GIS ist es möglich (bzw. heute sogar Standard), die zunächst kleinteilig erscheinenden, individuellen Erreichbarkeitswerte zusammenzufügen und somit auch großflächigere Analysen durchzuführen (vgl. Martín und Reggiani, 2007 sowie Miller, 1999). Zudem lassen sich die konventionellen Indikatoren mittels GIS und integrierten Verkehrsnetzmodellen abbilden. Hierdurch ist es weiterhin möglich, Ergebnisse grafisch zu veranschaulichen und so die interdisziplinäre Kommunizierbarkeit zu steigern. Wie bei Miller (1999) zu sehen, ist es dank der veränderten Interpretation des Begriffs Erreichbarkeit (Erreichbarkeit von interessanten Orten aus Sicht von einzelnen Individuen) auch möglich, die Implikationen von Maßnahmen und Projekten auf die Erreichbarkeitskennzahlen direkt zu überprüfen.³⁷

Obwohl schon von Handy und Niemeier (1997) postuliert wurde, dass die nutzenbasierten Indikatoren theoretische sowie empirische Vorteile bieten, ist es fraglich, wieso die Mehrzahl der Studien noch immer konventionelle Indikatoren in den Fokus stellen.³⁸ Die bessere Kommunizierbarkeit der Ergebnisse würde nur als schwaches Argument dienen. Vielmehr drängt sich die bessere Steuerbarkeit der Ergebnisse auf. Aufgrund der gut erforschten Sensitivitäten der Indikatoren erfüllen die partiellen Ergebnisse ihren Zweck, wenn Planer und Politiker sich über das Ziel der Untersuchung im Klaren sind (vgl. Kwan, 1998, S. 212).

³⁷ Aberle (2009, S. 458) spricht in einem ähnlichen Kontext auch von „policy sensitive models“.

³⁸ Siehe Anhang 1 für einen Überblick empirischer Studien.

Im idealtypischen Zustand würden alle Indikatoren über verschiedene Herangehensweisen ähnliche Aussagen über die Erreichbarkeit treffen. Jedoch wird deutlich, dass die verschiedenen Arten von Indikatoren jeweils auf unterschiedlichen Annahmen beruhen und durch die nötige Abgrenzung der Rahmenbedingungen weitere subjektive Einflüsse in die Bewertung der Erreichbarkeit einfließen können. Die Qualität der Aussagen aus den Modellen ist zudem sehr differenziert, so dass ein Vergleich nicht möglich scheint. Es wäre erforderlich, die Korrelation zwischen den Ergebnissen konventioneller und individueller Messansätze auf ähnlichem Aggregationsniveau zu überprüfen, um diese Aussagen zu stützen oder zu widerlegen.

Es wird auch interessant sein zu beobachten, welchen Einfluss die Informationstechnologien der Gegenwart und der Zukunft auf die Wahrnehmung der Erreichbarkeit haben können. Allein der Zugang zum Internet kann viele Aktivitäten außer Haus ersetzen und somit eine neue Bewertung von Potential nötig machen. Raumwiderstände aus Gravitationsmodellen werden in Bezug auf viele Arten der Interaktion (besonders natürlich der Kommunikation) obsolet erscheinen.

Durch wirtschaftspolitische Maßnahmen kann der Nutzen der Individuen indirekt oder direkt beeinflusst werden, was Auswirkungen auf das Mobilitätsverhalten haben kann. Damit ergeben sich gesamtgesellschaftlich zwei Untersuchungsfälle. Erstens kann Erreichbarkeit notwendig und damit wünschenswert sein. Als Beispiel dafür kann der Arbeitsmarkt mit seinen Pendlerverkehren angeführt werden. Eine hochqualitative Verkehrsinfrastruktur kann demnach Arbeitnehmer dazu veranlassen, zwar einen längeren Arbeitsweg in Kauf zu nehmen, dafür aber besser bezahlten Aktivitäten nachgehen zu können.³⁹ Zweitens kann es immer noch der Fall sein, dass Erreichbarkeit unerwünscht ist. Die Einführung z. B. einer City-Maut (Cordon-Pricing) kann zu einem veränderten Mobilitätsverhalten hinsichtlich der Verkehrsmittel- und Routenwahl führen. Die Existenz hochqualitativer unbemauteter Alternativen könnte aber die beabsichtigten Effekte der City-Maut konterkarieren (vgl. Verhoef, 1996), sollten die Individuen dennoch den MIV als für sie kostengünstigste Alternative wählen. Eine ausschließliche Partialbetrachtung ist daher vielleicht nicht ausreichend, weil Infrastrukturmaßnahmen auch auf andere Märkte Effekte generieren; allgemein akzeptiert sind in diesem Zusammenhang die Effekte auf den Wohnungsmarkt. Deswegen sollte der Fokus zukünftig auch auf Themengebiete wie Erreichbarkeit und Standortwahl von Unternehmen oder Wohnortwahl von Individuen gerichtet werden. Letztlich sollte der Gesamtbefit in einer wohlfahrtsökonomischen Betrachtung zur Beurteilung wirtschafts- und verkehrspolitischer Maßnahmen (bspw. anhand allgemeiner, räumlicher Gleichgewichtsmodelle, sog. CGSE-Modelle) herangezogen werden.

³⁹ Dieses Argument wird besonders in der Diskussion über die Pendlerpauschale (vgl. Sinn, 2003, S. 20) ersichtlich und kann problemlos auf den Fall des Infrastrukturausbaus übertragen werden.

Anhang 1: Überblick empirischer Erreichbarkeitsstudien

Namen	Jahr	Ansatz	Anzahl Indikatoren	Verwendete Indikatoren	Parameter / Anpassung	Potential / Determinanten	Widerstand	Methode	Untersuchungsgebiet	Reichweite	Untersuchungsgegenstand	Verkehrsträger
Ingram	1971	konventionelle	Verschiedene	Rechteckige Funktion (ähnlich DA), Prozentuale Funktion (ähnl. EP, mit versch. Widerstandsfrkt.)	Verschiedene getestet	Kalkulierte Distanzen (Straße)	aktuelle Beobachtungen	Hamilton, Ontario	lokal	lokal	Stadtverkehr	Straße
Frost & Spence	1995	konventionelle	1	Economic Potential	DA: 5 Std., PP: 1 (?), nicht erwähnt	Arbeitsende Einwohner	Widerstand: Gewichtung der Radien für das Eigenpotential (1; 0,66; 0,5; 0,33)	Mehrere Berechnungen mit verschiedenen Radien	Großbritannien	national	Interne Erreichbarkeiten zur Kalibrierung von Modellen	Straße
Gutiérrez et al.	1996	konventionelle	1	Weighted Average Travel Time	-	BIP	minimale Reisezeit in min	Berechnung, Prognose, GIS	Europa (EU in 1996)	kontinental	Hochgeschwindigkeitsverkehr zwischen Stationen	Schiene (HST) + Straße/Seewege (Fähren) für Zugang
Vickerman et al.	1999	konventionelle	2	Daily Accessibility, Population Potential	-	Einwohner	Reisezeiten	Berechnung, Progn. Europa (EU in 1999)	kontinental	kontinental	Disaggregationswirkung der steigenden Erreichbarkeit	Straße
Gutiérrez	2001	konventionelle	3	Weighted Average Travel Time, Economic Potential, Daily Accessibility	EP: $\beta=1$, DA: 4 Std.	BIP, Einwohner	minimale Reisezeiten	Berechnung, Prognose, GIS	Spanien (Madrid-Barcelona- Grenze Frankreich)	national	Hochgeschwindigkeitsverkehr zwischen Stationen	Schiene (HST) + Straße für Zugang
Martin et al.	2004	Synthetisierte Partialindikatoren	1(4)	DEA (Weighted Average Travel Time, Network Efficiency, Economic Potential, Daily Accessibility)	EP: $\beta=1$, DA: 4 Std.	BIP, Einwohner	Distanzen, minimale Reisezeit	Berechnung, Prognose	Spanien (Madrid-Barcelona- Grenze Frankreich)	national	Passagier- Hochgeschwindigkeitsverkehr zwischen Stationen	Schiene (HST)
BAK Basel	2005	konventionelle	1	Economic Potential	negative Exponentialfkt. mit $\beta=0,0051$ kontinental, $\beta=0,0011$ global	BIP	minimale Reisezeiten	aktuelle Berechnung	Globale Metropolen, europäische Metropolen	global und kontinental	Gesamterreichbarkeit, volkswirtschaftliche Bedeutung	Global: Luftverkehr, Kontinental: Straße, Schiene, Luftverkehr
Martin & Reggiani	2007	Synthetisierte Partialindikatoren	2(3)	DEA und PCA (jeweils aus 3 Partialindikatoren: WATT, EP, DA)	EP: $\beta=1$, DA: 4 Std.	BIP, Einwohner	Distanzen, minimale Reisezeit	aktuelle Prognose, ARC/INFO	88 EU-Städte	kontinental	Hochgeschwindigkeitsverkehr zwischen Stationen	Schiene
Schulz & Bräcker	2007	nicht-Parametrisch	1	nicht-parametrischer Indikator	-	Pendlerdaten	kürzeste Distanzen	Berechnung, Vergleich mit Logsum-Indikator und DA (33,2min)	Schleswig-Holstein	regional	Arbeitsmärkte für Berufspendler	Straße
Hesse et al.	2011	Synthetisierte Partialindikatoren	1(3)	PCA (Economic Potential, Network Efficiency, Daily Accessibility)	EP: $\beta=1$, DA: 4 Std.	BIP, Einwohner	Distanzen, minimale Reisezeit	aktuelle Berechnung	Deutschland	national	Passagier- Hochgeschwindigkeitsverkehr zwischen Stationen	Schiene
Linneker & Spence	1992	konventionelle	6	6 Potentialindikatoren, jeweils durch die Widerstände differenziert (3 für Pkw., 3 für Lkw.)	-	Beschäftigung (1981)	generalisierte Transportkosten	Berechnung	England	national	Erreichbarkeits-Effekte des Baus des M25 Ring um London	Straße
Holl	2007	konventionell	1	Potentialindikator	keine Anpassung der Reisezeiten, wenn <30min auf 1 normiert	Bevölkerung	Reisezeiten	Berechnung, Daten aus Zeitreihen 1980- 2000	Spanien	national	Autobahninvestitionen in Spanien zwischen 1980 und 2000, Erreichbarkeit ist hier nur Teil einer umfassenderen Beleuchtung der Entwicklung	Straße
Lopez	2009	konventionell	1	Netzwerkeffizienz	Tatsächliche Verbindung / Luftliniendistanz	Bevölkerung (nach Typ)	Reisezeiten, basierend auf Durchschnittsgeschwi ndigkeiten	Berechnung	Spanien, mit Portugal und Südfrankreich	national	Auswirkungen und Spill-over-Effekte der Investitionsprogramme in Autobahnen und Hochgeschwindigkeitsbahnlängen in Spanien	Straße und Schiene
Handy & Niemeyer	1997	1. konventionell, 2. nutzenbasiert	2	1. Potentialindikator mit Exponentialfkt., 2. direkte Nutzenfunktion	1. $\beta=0,1813$	Einwohner	1. Reisezeiten (berechnet), 2. Reisekosten	Zwei Berechnungen mit zwei Ansätzen Berechnungen, Update	1. San Francisco und Umgebung, 2. King County, Washington	lokal / regional	1. Zugang zu Shopping- Möglichkeiten, 2. Zugang zu Arbeitsplätzen am Morgen Erreichbarkeit auf Schiene und Straße in Europa 2001 und 2006 im Vergleich	Straße
Spiekermann	2007	konventionell	1	Potentialindikatoren	$\beta=0,005$	Einwohner	Reisezeiten	historischer Daten	Europa + speziell Deutschland	kontinental	Regionale Kohäsion in Spanien zwischen 1992 und 2004	Straße und Schiene
Lopez	2008	konventionelle	4	Weighted Average Travel Time, Network Efficiency, Population Potential, Daily Accessibility	Pop.Potential $a=1$, DA 4Std.	Einwohner	Reisezeit, min. Distanz, Zeitreihendaten	Berechnung mit Zeitreihendaten	Spanien	national		Straße und Schiene

Literatur

- Aberle, G. (2009): *Transportwirtschaft*, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 5. Auflage.
- Adler, N. und Golany, B. (2001): Evaluation of deregulated airline networks using data envelopment analysis combined with principal component analysis with an application to Western Europe, *European Journal of Operational Research* 132, S. 260-273.
- Ben-Akiva, M. E. und Lerman, S. R. (1979): *Disaggregate Travel and Mobility-Choice Models and Measures of Accessibility*, Behavioural Travel Modelling, Hrsg. Hensher, D.A. und Stopher, P.R., Croom-Helm, London.
- Ben-Akiva, M. E. und Lerman, S. R. (1985): *Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand*, MIT Press, Cambridge.
- Bröcker, J. (2006): *Parametric and Non-parametric Accessibility Measurement*, Paper presented to the 46th ERSA congress, Volos, Greece, S. 1-24.
- Button, K. (2010): *Transport Economics*, 3rd Edition, Edward Elgar Publishing, Inc., Northampton, MA, USA.
- Charnes, A.; Cooper, W. W. und Rhodes, E. (1978): Measuring the efficiency of decision making units, *European Journal of Operational Research*, 2 (1978), S. 429-444.
- Coelli, T. J. (1996): *A Guide to DEAP Version 2.1: A Data Envelopment Analysis (Computer) Program*, CEPA Working Paper 96/08, University of New England.
- Coelli, T. J.; Prasada Rao, D. S. und Battese, G. E. (2005): *An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis*, Second Edition, Springer Science+Business Media, New York.
- Dong, X.; Ben-Akiva, M. E.; Bowman, J. L. und Walker, J. L. (2006): Moving from trip-based to activity-based measures of accessibility, *Transportation Research Part A* 40, S. 163-180.
- Evangelinos, C. und Ebert, S. (2011): *Zur Erreichbarkeit regional-ökonomischer Zentren: Die Messbarkeit verkehrlicher Anbindungsqualität*, ifo Dresden berichtet, 1/2011.
- Farrell, M. (1975): The Measurement of Productive Efficiency, *Journal of the Royal Statistical Society, Series A (General)*, Vol. 120, No. 3, S. 253-290.
- Feige, I. (2007): *Transport, Trade and Economic Growth – Coupled or Decoupled?* Ifmo Institut für Mobilitätsforschung, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Frey, R. L. (1994): *Ökonomie der städtischen Mobilität – Durch Kostenwahrheit zur nachhaltigen Entwicklung des Agglomerationsverkehrs*, Teilsynthese des Nationalen Forschungsprogramms 25 „Stadt und Verkehr“, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich.
- Frost, M. E. und Spence, N. A. (1995): The rediscovery of accessibility and economic potential: the critical issue of self-potential, *Environment and Planning A* 1995, Vol. 27, S. 1833-1848.
- Goodchild, M. F. (1979): *Commentary: Current issues in interaction*, *Ontario Geography, Special Issue*, No. 13, S. 85-89.
- Gutiérrez, J. (2001): Location, economic potential and daily accessibility: an analysis of the accessibility impact of the high-speed line Madrid-Barcelona-French border, *Journal of Transport Geography* 9, S. 229-242.
- Gutiérrez, J.; González, R. und Gómez, G. (1996): The European high-speed train network – Predicted effects on accessibility patterns, *Journal of Transport Geography* Vol. 4, No. 4, S. 227-238.
- Guy C. M. (1983): The assessment of access to local shopping opportunities: a comparison of accessibility measures, *Environment and Planning B: Planning and Design*, Vol. 10, S. 219-238.
- Hägerstrand, T. (1970): What about people in regional science? *Papers of the Regional Science Association* 14, S. 7-21.

- Handy, S. L. und Niemeier, D. A. (1997): Measuring accessibility: an exploration of issues and alternatives, *Environment and Planning A*, Vol. 29, S. 1175-1194.
- Hansen, W. G. (1959): How Accessibility Shapes Land Use, *Journal of the American Planning Association*, 25:2, S. 73-76.
- Hesse, C.; Püschel, R.; Evangelinos, C. (2011): Die Erreichbarkeit deutscher Großstädte durch den Schienenpersonenverkehr, *ifo Dresden berichtet*, 5/2011, S. 20-27.
- Ingram, D. R. (1971): The Concept of Accessibility: A Search for an Operational Form, *Regional Studies*, Vol. 5, S. 101-107.
- Jolliffe, I. T. (2002): *Principal Component Analysis*, Springer-Verlag, New York, 2. Auflage.
- Kummer, S. (2006): *Einführung in die Verkehrswirtschaft*, Facultas Verlags- und Buchhandels AG, Wien.
- Kwan, M. P. (1998): Space-Time and Integral Measures of Individual Accessibility: A Comparative Analysis Using a Point-based Framework, *Geographical Analysis*, Vol. 30, No. 3, S. 191-216.
- Kwan, M. P. und Weber, J. (2003): Individual Accessibility Revisited: Implications for Geographical Analysis in the Twenty-first Century, *Geographical Analysis*, Vol. 35, No. 4, S. 341-353.
- Martín, J. C.; Gutiérrez, J. und Román, C. (2004): Data Envelopment Analysis (DEA) Index to Measure the Accessibility Impacts of New Infrastructure Investments: The Case of the High-speed Train Corridor Madrid-Barcelona-French Border, *Regional Studies*, Vol. 38.6, S. 697-712.
- Martín, J. C. und Reggiani, A. (2007): Recent Methodological Developments to Measure Spatial Interaction: Synthetic Accessibility Indices Applied to High-speed Train Investments, *Transport Reviews*, Vol. 27 (5), S. 551-571.
- McFadden, D. (1974): The Measurement of Urban Travel Demand, *Journal of Public Economics* 3, S. 303-328.
- McFadden, D. (1978): Modelling the Choice of Residential Location, verfügbar unter: <http://cowles.econ.yale.edu/P/cd/d04b/d0477.pdf> (01.03.2012).
- Miller, H. (1999): Measuring Space-Time Accessibility Benefits within Transportation Networks: Basic Theory and Computational Procedures, *Geographical Analysis*, Vol. 31, No. 2, S. 187-212.
- Mösgen, A. (2007): *Regionalentwicklung in Deutschland und ihre Determinanten*, Forschungsbeiträge zur Stadt- und Regionalgeographie, Bd. 3, Hrsg. Prof. Dr. Paal, M., LIT Verlag, Berlin, 2008.
- Pirie, G. H. (1979): Measuring accessibility: a review and proposal, *Environment and Planning A*, Vol. 11, S. 299-312.
- Pred, A. (1977): The Choreography of Existence: Comments on Hägerstrand's Time-Geography and Its Usefulness, *Economic Geography*, Vol. 53, No. 2, S. 207-221.
- Pooler, J. (1987): Measuring Geographical Accessibility: a Review of Current Approaches and Problems in the Use of Population Potentials, *Geoforum*, Vol. 18, No. 3, S. 269-289.
- Rietveld, P. und Bruinsma, F. (1998): *Is Transport Infrastructure Effective? Transport Infrastructure and Accessibility: Impacts on the Space Economy*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Schulz, A.-C. und Bröcker, J. (2007): Die Erreichbarkeit der Arbeitsmärkte für Berufspendler aus den Gemeinden Schleswig-Holsteins, *IAB regional*, IAB Nord, Nr. 1/2007.
- Sinn, H.-W. (2003): Hände weg von der Entfernungspauschale, *Süddeutsche Zeitung*, Nr. 221, 25.09.2003, S. 20.
- Smith, A. (1776): *An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations*, Vol. I, London.
- Spiekermann, K. und Neubauer, J. (2002): *European Accessibility and Peripherality: Concepts, Models and Indicators*, Nordregio Working Paper 2002:9, Nordic Centre for Spatial Development, Stockholm.

- Stewart, J. Q. (1947): Empirical Mathematical Rules concerning the Distribution and Equilibrium of Population, *Geographical Review*, Vol. 37, No. 3, S. 461-485.
- Stewart, J. Q. (1948): Demographic Gravitation: Evidence and Applications, *Sociometry*, Vol. 11, No. 1/2, S. 31-58.
- Tschopp, M.; Fröhlich, P. und Axhausen, K.W. (2006): Verkehrsinfrastruktur und räumliche Entwicklung – eine ökonometrische Analyse, *Arbeitsberichte Verkehrs- und Raumplanung* 352, ETH Zürich.
- Verhoef, E. T. (1996): *The economics of regulating road transport*, Edward Elgar, Cheltenham.
- Vickerman, R.; Spiekermann, K. und Wegener, M. (1999): Accessibility and Economic Development in Europe, *Regional Studies*, Vol. 33.1, S. 1-15.
- Weibull, J. W. (1976): An axiomatic approach to the measurement of accessibility, *Regional Science and Urban Economics* 6, S. 357-379.
- Weibull, J. W. (1980): On the numerical measurement of accessibility, *Environment and Planning A*, Vol. 12, S. 53-67.
- Zhu, J. (1998): Data envelopment analysis vs. principal component analysis: An illustrative study of economic performance of Chinese cities, *European Journal of Operational Research* 111, S. 50-61.

SEIT 2001 SIND FOLGENDE DISKUSSIONSBEITRÄGE ERSCHIENEN:

- 1/2001 Schramm, Hans-Joachim; Veith, Elisabeth: Schwerlasttransport auf deutschen Straßen, Ergebnisse einer Befragung deutscher Schwerlasttransportunternehmen**

- 2/2001 Schramm, Hans-Joachim; Eberl, Katharina: Privatisierung und Going Public von staatlichen Eisenbahnunternehmen - Versuch eines adaptiven Vergleichs zwischen Japan und Deutschland**

- 1/2002 Kummer, Sebastian; Schmidt, Silvia: Methodik der Generierung und Anwendung wertorientierter Performance-Kennzahlen zur Beurteilung der Entwicklung des Unternehmenswertes von Flughafenunternehmen**

- 2/2002 Wieland, Bernhard: Economic and Ecological Sustainability - The Identity of Opposites?**

- 1/2003 Freyer, Walter; Groß, Sven: Tourismus und Verkehr - Die Wechselwirkungen von mobilitätsrelevanten Ansprüchen von touristisch Reisenden und Angeboten (touristischer) Transportunternehmen**

- 2/2003 Stopka, Ulrike; Urban, Thomas: Implikationen neuer Vertriebs- und Distributionsformen auf das Customer Relationship Management und die Gestaltung von virtuellen Marktplätzen im BtoC-Bereich**

- 1/2004 Hoppe, Mirko; Schramm, Hans-Joachim: Use of Interorganisational Systems - An Empirical Analysis**

- 2/2004 Wieland, Bernhard; Seidel, Tina; Matthes, Andreas; Schlag, Bernhard: Transport Policy, Acceptance and the Media**

- 1/2005 Brunow, Stephan; Hirte, Georg: Age Structure and Regional Income Growth**

- 2/2005 Stopka, Ulrike; Urban, Thomas: Erklärungsmodell zur Beurteilung der betriebswirtschaftlichen Vorteilhaftigkeit des Kundenbeziehungsmanagements sowie Untersuchung zur Usability von Online-Angeboten im elektronischen Retailbanking**
- 3/2005 Urban, Thomas: Medienökonomie**
- 4/2005 Urban, Thomas: eMerging-Media: Entwicklung der zukünftigen Kommunikations- und Medienlandschaft**
- 1/2006 Wieland, Bernhard: Special Interest Groups and 4th Best Transport Pricing**
- 2/2006 Ammoser, Hendrik; Hoppe, Mirko: Glossar Verkehrswesen und Verkehrswissenschaften**
- 1/2007 Wieland, Bernhard: Laudatio zur Verleihung der Ehrendoktorwürde an Herrn Prof. Dr. rer. pol. habil. Gerd Aberle**
- 2/2007 Müller, Sven; Kless, Sascha: Veränderung der leistungsabhängigen Schwerverkehrsabgabe in Abhängigkeit der Streckenbelastung**
- 1/2008 Vetter, Thomas; Haase, Knut: Alternative Bedienformen im ÖPNV – Akzeptanzstudie im Landkreis Saalkreis**
- 2/2008 Haase, Knut; Hoppe, Mirko: Standortplanung unter Wettbewerb – Teil 1: Grundlagen**
- 3/2008 Haase, Knut; Hoppe, Mirko: Standortplanung unter Wettbewerb – Teil 2: Integration diskreter Wahlentscheidungen**
- 1/2009 Günthel, Dennis; Sturm, Lars; Gärtner, Christoph: Anwendung der Choice-Based-Conjoint-Analyse zur Prognose von Kaufentscheidungen im ÖPNV**
- 2/2009 Müller, Sven: A Spatial Choice Model Based on Random Utility**
- 1/2010 Lämmer, Stefan: Stabilitätsprobleme voll-verkehrsabhängiger Lichtsignalsteuerungen**

- 2/2010 Evangelinos, Christos; Stangl, Jacqueline: Das Preissetzungsverhalten von Fluggesellschaften auf Kurzstrecken mit Duopolcharakter**
- 3/2010 Evangelinos, Christos; Matthes, Andreas; Lösch, Stefanie; Hofmann, Maria: Parking Cash Out – Ein innovativer Ansatz zur betrieblichen Effizienzsteigerung und Verkehrslenkung**
- 1/2011 Evangelinos, Christos; Püschel, Ronny; Goldhahn Susan: Inverting the Regulatory Rules? Optimizing Airport Regulation to Account for Commercial Revenues**
- 2/2011 Evangelinos, Christos; Obermeyer, Andy; Püschel, Ronny: Preisdispersion und Wettbewerb im Luftverkehr – Ein theoretischer und empirischer Überblick**
- 1/2012 Geller, Kathleen; Evangelinos, Christos; Hesse, Claudia; Püschel, Ronny; Obermeyer, Andy: Potentiale und Wirkungen des EuroCombi in Deutschland**
- 2/2012 Deweiß, Sigrun; Klier, Michael: Verfahren zur Beschränkung von Schwerpunktmodulplätzen am Institut für Wirtschaft und Verkehr**
- 3/2012 Hesse, Claudia; Bohne, Simon; Evangelinos, Christos; Püschel, Ronny: Erreichbarkeitsmessung: Theoretische Konzepte und empirische Anwendungen**

