

Nachhaltigkeitsbeurteilung von Entwicklungen am Beispiel Kanton Zürich

Christian M. Marti

Masterarbeit
Studiengang Raumentwicklung und Infrastruktursysteme

Juli 2012

Inhaltsverzeichnis

1	Danksagung.....	3
2	Einleitung	4
2.1	Motivation und Aufgabenstellung	4
2.2	Abgrenzung der Untersuchungsthematik	5
2.3	Gliederung der Arbeit.....	5
3	Nachhaltigkeit und Stadt.....	7
3.1	Was bedeutet Nachhaltigkeit?	7
3.2	Was ist eine nachhaltige Stadt?	15
4	Der Einfluss der gebauten Umwelt	24
4.1	Verkehrsverhalten.....	25
4.2	Arbeitsproduktivität	57
4.3	Kosten der öffentlichen Dienste.....	62
4.4	Materialintensität der Infrastruktur	79
4.5	Energieverbrauch des Gebäudeparks.....	82
4.6	Versiegelung.....	85
4.7	Konsumverhalten der Haushalte	86
4.8	Gebrauchswert der gebauten Umwelt.....	89
4.9	Zusammenfassung des Einflusses der gebauten Umwelt	92
5	Methoden in der Literatur.....	94
5.1	Konzepte zur Erforschung der Nachhaltigkeit von Städten.....	94
5.2	Ökobilanz / Life Cycle Assessment (LCA).....	100
5.3	Indikatoren	101
5.4	Nachhaltigkeitsindizes und –Indikatoren	102
5.5	Ansatz der Social Welfare Function	104
6	Modell zur Beurteilung der Nachhaltigkeit	106
6.1	Modellübersicht.....	106
6.2	Messgrössen	110

6.3	Referenzzustand.....	112
6.4	Eingangsgrößen für die Berechnung der Indikatoren	114
6.5	Berechnung der Indikatoren	122
6.6	Diskontierung und Aufsummierung der Kosten und Nutzen	125
6.7	Wertgerüst	127
6.8	Emissionsfaktoren	131
7	Umsetzung des Modells in Programmcode	139
7.1	Software zur Beurteilung der Nachhaltigkeit von Entwicklungen	139
7.2	Tools mit Einzelfunktionen.....	147
8	Anwendung der Software	149
8.1	Verwendete Daten	149
8.2	Durchgeführte Beurteilungen.....	151
8.3	Ergebnisse.....	153
8.4	Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen	164
9	Bewertung und Ausblick	184
9.1	Schlussfolgerungen	184
9.2	Zukünftige Forschung.....	184
9.3	Möglichkeiten und Trends in der Planung	189
10	Literatur.....	191
11	Kommentierte Bibliographie.....	200
11.1	Nachhaltige Städte	200
11.2	Der Einfluss der gebauten Umwelt auf die Nachhaltigkeit	203
11.3	Urban Metabolism und Gebäudepark.....	207
11.4	Analyse und Modellierung von Städten und Strukturen	207
11.5	Nachhaltigkeitsbeurteilung	208

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Primärenergiefaktoren und Treibhausgas-Emissionskoeffizienten für verschiedene Verkehrsmittel (Basisjahr 2008)	30
Tabelle 2	Elastizitäten zwischen Messgrössen der gebauten Umwelt und der Verkehrsnachfrage aus Cervero und Kockelman (1997)	37
Tabelle 3	Erklärende Variablen der gebauten Umwelt zum Verkehrsverhalten	46
Tabelle 4	Von Ewing und Cervero (2010) nach Stichprobengrösse gewichtete Durchschnittselastizitäten des Verkehrsverhaltens	48
Tabelle 5	Quantitativer Effekt der Selbstselektion des Wohnstandortes: Effektiver Anteil der gebauten Umwelt am gesamten beobachteten Effekt.....	55
Tabelle 6	Gewichtete Durchschnittselastizitäten des Verkehrsverhaltens mit Berücksichtigung der Selbstselektion des Wohnstandortes.....	56
Tabelle 7	Zusammenfassung der Elastizitäten der Arbeitsproduktivität für die gebaute Umwelt.....	61
Tabelle 8	Erklärende Variablen für die Kosten der Infrastruktur und der öffentlichen Dienste bei Carruthers und Ulfarsson (2008).	64
Tabelle 9	Elastizitäten: Totale direkte Ausgaben der öffentlichen Hand	65
Tabelle 10	Elastizitäten: Ausgaben für Bildung (1), Feuerwehr (2), Stadtentwicklung und Wohnungsbau (3).....	65
Tabelle 11	Elastizitäten: Ausgaben für Bibliotheken (4), Parks, Freizeiteinrichtungen und Kultur (5), Polizei (6).....	66
Tabelle 12	Elastizitäten: Ausgaben für Strassen (7), Abwasser (8), Abfall (9).....	66
Tabelle 13	Erklärende Variablen für die Kosten der Infrastruktur und der öffentlichen Dienste bei Hortas-Rico und Solé-Ollé (2010).	69
Tabelle 14	Elastizitäten: Laufende Ausgaben, totale Ausgaben, laufende Kosten (Preiselastizität = -0.4486 (linear), -0.4545(stückweise linear)).....	71
Tabelle 15	Elastizitäten: Ausgaben in einzelnen Bereichen.....	72

Tabelle 16 Zusammenfassung der Elastizitäten der totalen lokalen Ausgaben für die gebaute Umwelt.....	79
Tabelle 17 Zusammenstellung der Elastizitäten für die gebaute Umwelt (1) Gefahrene Distanz; (2) Fussverkehr; (3) Nutzung ÖV; (4) Arbeitsproduktivität; (5) Ausgaben für öffentliche Dienste.....	93
Tabelle 18 Wertgerüst des Modells zur Beurteilung der Nachhaltigkeit Preisstand 2005, Werte für 2005 (ausser CO ₂ , für 2010).....	128
Tabelle 19 <i>Age-adjusted mortality rates</i> in Abhängigkeit von physischer Aktivität.....	129
Tabelle 20 Berechnung des Faktors zur Berücksichtigung der Bevölkerungsentwicklung mit dem mittleren Szenario des BFS	131
Tabelle 21 Emissionsfaktoren für Personenwagen in g / Fzkm	132
Tabelle 22 Emissionsfaktoren Gebäudebetrieb in kg CO ₂ -äqu. / (m ² GF x a).....	133
Tabelle 23 Emissionsfaktoren graue Emissionen von Gebäuden in kg CO ₂ -äqu. / (m ² x a) beziehungsweise kg CO ₂ -äqu. / (m ³ x a) (Aushub).....	134
Tabelle 24 Auswertung dokumentierter Beispielgebäude zur Ermittlung von Faktoren zur Berechnung der grauen Emissionen des Gebäudeparks.....	136
Tabelle 25 Energie und Bauprozesse für Bau und Unterhalt einer durchschnittlichen Schweizer Strasse pro Meter und Jahr	137
Tabelle 26 Emissionsfaktoren für Energie und Bauprozesse für Bau und Unterhalt einer durchschnittlichen Schweizer Strasse	137
Tabelle 27 Bestimmung der durchschnittlichen Strassenbreite zur Umrechnung der Ergebnisse von Spielmann et al. (2007).....	138
Tabelle 28 Graue Emissionen aus Energie und Bauprozessen für Bau und Unterhalt einer durchschnittlichen Schweizer Strasse pro m ² und Jahr.....	138
Tabelle 29 Einfluss der Messgrössen für die gebaute Umwelt auf die Eingangsgrössen für die Berechnung der Indikatoren	166
Tabelle 30 Einfluss der Eingangsgrössen für die Berechnung der Indikatoren auf die Indikatoren.....	167
Tabelle 31 Einfluss der Messgrössen für die gebaute Umwelt auf die Indikatoren	168

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Vorschlag für eine moderne kompakte Stadt	20
Abbildung 2	Kompakte Stadtknoten im Konzept der Gartenstädte	21
Abbildung 3	Linearer und zirkulärer Metabolismus einer Stadt.....	22
Abbildung 4	Auswirkungen des Verkehrsaufkommens in Quartierstrassen in San Francisco auf das Gemeinschaftsgefühl	28
Abbildung 5	Zusammenhang zwischen Benzinverbrauch pro Einwohner und urbaner Dichte, angepasst an US Einkommen, Fahrzeugeffizienz und Benzinpreise.....	31
Abbildung 6	Erklärende Variablen (gebaute Umwelt) aus Cervero und Kockelman (1997)	36
Abbildung 7	Mögliche Zusammenhänge zwischen Haltungen zum Verkehr, gebauter Umwelt und Verkehrsverhalten	51
Abbildung 8	Elastizitäten betreffend Arbeitsmarktgrösse.....	60
Abbildung 9	Stückweise lineare Funktion der laufenden Ausgaben und der Ausgaben in den sechs disaggregierten Bereichen.	72
Abbildung 10	Material der Strassen und Gehsteige in t / m ² Geschossfläche in Wohngebäuden abhängig von der Geschossflächenzahl („floor space index“).....	80
Abbildung 11	Material der Strassen und Gehsteige in 1000 t / m ² Geschossfläche in Wohngebäuden abhängig von der Gebäudetypologie	81
Abbildung 12	Energie im Lebenszyklus eines Gebäudes	83
Abbildung 13	Nachfrage nach direkter und indirekter Energie australischer Haushalte in Abhängigkeit der Haushaltsausgaben.....	87
Abbildung 14	Durchschnittliche Energienachfrage (direkt und indirekt) von indischen Haushalten in Abhängigkeit von der Haushaltsgrösse	88
Abbildung 15	Ausgaben für direkte und indirekte Energie sowie Energienachfrage nach Einkommensklassen für brasilianische Haushalte.....	88

Abbildung 16	Durchschnittliche Ausgabenelastizität für direkte und indirekte Energie nach Einkommen	89
Abbildung 17	Erweitertes Metabolismus-Modell	95
Abbildung 18	Bevölkerungsdichte-Gradient, Strassendichte-Gradient und Dienstleistungsdistanz-Gradient (am Bsp. Weglänge eines Haushalts pro Woche zur Dienstleistung Supermarkt), für die Stadt Atlanta	96
Abbildung 19	Strassendichtegradient, normiert nach Bevölkerungszahl, für die Stadt Atlanta	97
Abbildung 20	Modellprinzip	109
Abbildung 21	Qualitative Darstellung der im Beurteilungsmodell verwendeten Elastizitäten	118
Abbildung 22	Graphische Auswertung der Nachhaltigkeitsbeurteilung der Verkehrszonen in der Stadt Winterthur; Verwendung von 8 identischen Intervallen; ohne BIP	154
Abbildung 23	Graphische Auswertung der Nachhaltigkeitsbeurteilung der Verkehrszonen in der Stadt Winterthur; Verwendung von 8 Quantilen; ohne BIP	155
Abbildung 24	Graphische Auswertung der Nachhaltigkeitsbeurteilung der Verkehrszonen in Schlieren und Dietikon; Verwendung von 6 identischen Intervallen; ohne BIP	156
Abbildung 25	Graphische Auswertung der Nachhaltigkeitsbeurteilung der Verkehrszonen in Schlieren und Dietikon; Verwendung von 9 Quantilen; ohne BIP.....	157
Abbildung 26	Entwicklung der Nachhaltigkeit und der einzelnen Indikatoren in den Gemeinden Schlieren und Dietikon 2001 bis 2010	158
Abbildung 27	Anzahl Einwohner (links) und Anzahl Arbeitsplätze (rechts) 2001 – 2010	159
Abbildung 28	Summe aus Anzahl Einwohnern und Arbeitsplätzen (links) und Verhältnis Arbeitsplätze / Einwohner (rechts) 2001 – 2010.....	159
Abbildung 29	Durchschnittliche Anzahl Arbeitsplätze innerhalb 1 Meile (links) und Durchschnittliche Distanz zum Stadtzentrum [m] (rechts) 2001 – 2010...	160

Abbildung 30	Durchschnittliche Distanz zur nächsten ÖV-Haltestelle [m] (links) und Anteil Gebäude mit Baujahr vor 1940 [%] (rechts) 2001 – 2010	160
Abbildung 31	Fläche der entwickelten Parzellen [ha] normiert (EW+AP) (links) und Strassenoberfläche [m ²] normiert (EW+AP) (rechts) 2001 – 2010.....	161
Abbildung 32	GF mit Wohnnutzung [m ²] nicht normiert (links) und normiert (EW) (rechts) 2001 – 2010	161
Abbildung 33	GF mit Nicht-Wohnnutzung [m ²] nicht normiert (links) und normiert (AP) (rechts) 2001 – 2010	162
Abbildung 34	Graue Emissionen des Gebäudeparks [g CO ₂ -äqu.] normiert (EW+AP) 2001 – 2010	162
Abbildung 35	Entwicklung 2001 – 2010 des Resultats der Nachhaltigkeitsbeurteilung der Verkehrszonen in den Gemeinden Schlieren und Dietikon bei Verwendung des gesamten Gebiets beider Gemeinden im jeweiligen Beurteilungsjahr als Referenzzustand.....	163
Abbildung 36	Verkehrszonen in den Gemeinden Schlieren und Dietikon.....	164
Abbildung 37	Anteile der einzelnen diskontierten Kosten und Nutzen am Resultat der Nachhaltigkeitsbeurteilung in Prozent ohne BIP	165
Abbildung 38	Resultat vs. Anzahl Einwohner (links) Resultat vs. Anzahl Arbeitsplätze (rechts).....	170
Abbildung 39	Einwohnerdichte vs. Anzahl Einwohner (links) Arbeitsplatzdichte vs. Anzahl Arbeitsplätze (rechts).....	170
Abbildung 40	Resultat vs. Einwohnerdichte [EW / ha], bezogen auf entw. Fläche (links) Resultat vs. Arbeitsplatzdichte [AP / ha], bezogen auf entw. Fläche (rechts)	171
Abbildung 41	Resultat vs. Entropie-Index (links) Resultat vs. Verhältnis Arbeitsplätze / Einwohner (rechts).....	171
Abbildung 42	Resultat vs. Durchschn. Anz. Arbeitsplätze innerhalb einer Meile (links) Resultat vs. Durchschn. Dist. zum nächsten Stadtzentrum [m] (rechts)	172
Abbildung 43	Einwohnerdichte vs. Durchschn. Anz. Arbeitsplätze innerhalb einer Meile	172

Abbildung 44	Resultat vs. Strassendichte [m / ha] (links) Resultat vs. Durchschn. Dist. zur nächsten ÖV-Haltestelle [m] (rechts)	173
Abbildung 45	Resultat vs. Anteil der Gebäude mit Baujahr vor 1940 [%]	173
Abbildung 46	Resultat vs. Fläche der entwickelten Parzellen [ha] links: nicht normiert; rechts: normiert (Einwohner + Arbeitsplätze)	174
Abbildung 47	Einwohnerdichte vs. Fläche der entwickelten Parzellen [ha] normiert (EW + AP)	174
Abbildung 48	Resultat vs. Strassenoberfläche [m ²] links: nicht normiert; rechts: normiert (Einwohner + Arbeitsplätze)	175
Abbildung 49	Strassendichte vs. Strassenoberfläche	175
Abbildung 50	Resultat vs. Geschossfläche mit Wohnnutzung aller Gebäude [m ²] links: nicht normiert; rechts: normiert (Einwohner)	176
Abbildung 51	Einwohnerdichte vs. Geschossfläche mit Wohnnutzung aller Gebäude [m ²] links: nicht normiert; rechts: normiert (Einwohner)	176
Abbildung 52	Resultat vs. Geschossfläche mit Nicht-Wohnnutzung aller Gebäude [m ²] links: nicht normiert; rechts: normiert (Arbeitsplätze)	177
Abbildung 53	Resultat vs. Graue Emissionen des Gebäudeparks [g CO ₂ -äqu.] links: nicht normiert; rechts: normiert (Einwohner + Arbeitsplätze)	177
Abbildung 54	Einwohnerdichte vs. Graue Emissionen des Gebäudeparks [g CO ₂ -äqu.] links: nicht normiert; rechts: normiert (Einwohner + Arbeitsplätze)	178
Abbildung 55	Anteile der einzelnen diskontierten Kosten und Nutzen am Resultat der Nachhaltigkeitsbeurteilung in Prozent mit BIP	179
Abbildung 56	Resultat vs. Einwohnerdichte [EW / ha], bezogen auf entw. Fläche (links) Resultat vs. Arbeitsplatzdichte [AP / ha], bezogen auf entw. Fläche (rechts), bei Berücksichtigung des BIP	180
Abbildung 57	Graphische Auswertung der Nachhaltigkeitsbeurteilung der Verkehrszonen in Winterthur; Verwendung von 8 Quantilen; mit BIP ...	181

Abbildung 58	Graphische Auswertung der Nachhaltigkeitsbeurteilung der Verkehrszonen in Schlieren und Dietikon; Verwendung von 9 Quantilen; mit BIP	182
Abbildung 59	Vergleich von Abbildung 23 (links, ohne BIP) und Abbildung 57 (rechts, mit BIP).....	183
Abbildung 60	Vergleich von Abbildung 25 (links, ohne BIP) und Abbildung 58 (rechts, mit BIP).....	183

Masterarbeit Studiengang Raumentwicklung und Infrastruktursysteme

Nachhaltigkeitsbeurteilung von Entwicklungen am Beispiel Kanton Zürich

Bearbeitung

Christian M. Marti
Letzigraben 158
8047 Zürich

christian.m.marti@gmail.com

Leitung

Prof. Dr. Kay W. Axhausen
IVT, ETH Zürich
Wolfgang-Pauli-Str. 15
8093 Zürich

axhausen@ivt.baug.ethz.ch

Betreuung

Dipl.-Ing. Patrick Schirmer
IVT, ETH Zürich
Wolfgang-Pauli-Str. 15
8093 Zürich

patrick.schirmer@ivt.baug.ethz.ch

Juli 2012

Kurzfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Frage, was Nachhaltigkeit für eine Stadt bedeutet und wie sie sich quantitativ beurteilen lässt. Der Fokus liegt dabei auf dem Einfluss der gebauten Umwelt auf die Nachhaltigkeit. Dazu wird eine Literaturanalyse durchgeführt und es werden verschiedene quantifizierbare Zusammenhänge identifiziert. Zusätzlich werden einige Methoden zur Nachhaltigkeitsbeurteilung von Städten und zur Analyse städtischer Strukturen recherchiert.

Aufgrund der Erkenntnisse aus der Literaturanalyse werden Indikatoren abgeleitet und in einem Modell zur Beurteilung der Nachhaltigkeit von städtischen Strukturen kombiniert. Dieses Modell wird anschliessend in Programmcode umgesetzt. Das resultierende Bewertungstool wird exemplarisch auf Daten des Projektes *SustainCity* zum Kanton Zürich angewandt und die Ergebnisse werden interpretiert.

Aus den verschiedenen Bestandteilen dieser Arbeit wird schlussendlich ein Fazit gezogen und es werden mögliche Erweiterungen, Verbesserungen und zu untersuchende Themen für die künftige Forschung identifiziert.

Schlagworte

Nachhaltigkeit; Nachhaltigkeitsbeurteilung; Stadt; Gebaute Umwelt; Verkehrsverhalten; Modell; GRASS GIS; Python

Zitierungsvorschlag

Marti, C.M. (2012) Nachhaltigkeitsbeurteilung von Entwicklungen am Beispiel Zürich, Masterarbeit, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT), ETH Zürich, Zürich.

1 Danksagung

Ich möchte mich bei folgenden Personen für die Unterstützung bei der vorliegenden Masterarbeit bedanken:

Prof. Dr. Kay W. Axhausen, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT) an der ETH Zürich, für die Leitung der Arbeit, die wertvollen Literaturhinweise, Fragen und Anregungen bei den Zwischenbesprechungen sowie die Ergänzungen und Anmerkungen zur Literaturanalyse.

Dipl.-Ing. Patrick Schirmer, ebenfalls IVT, für die Betreuung während der Arbeit, die Bereitstellung der verwendeten Daten, die vielen Inputs – besonders zu Städtebau und GIS – sowie die grundlegende Idee zur Arbeit.

Matthias Oswald für zahlreiche hilfreiche Tipps und Hinweise zu GRASS GIS, Python und Kosten-Nutzen-Analysen.

Weitere Mitstudierende des Studiengangs Raumentwicklung und Infrastruktursysteme für die anregenden Gespräche und kritischen Fragen.

Meiner Familie und meiner Freundin für die Unterstützung, Geduld und Toleranz während dem Verfassen dieser Arbeit und während des gesamten Studiums.

2 Einleitung

2.1 Motivation und Aufgabenstellung

Seit 2008 leben mehr als die Hälfte aller Bewohner der Erde in Städten, und ein grosser Teil des künftigen Bevölkerungswachstums wird in Städten stattfinden (UN, 2008). Entsprechend kann eine nachhaltige Entwicklung niemals gelingen, ohne auch die Städte nachhaltig zu gestalten. Gebäude und Verkehr haben einen sehr hohen Anteil am Energieverbrauch und CO₂-Ausstoss. Bei Ersatzbauten, Anpassungen von ganzen Siedlungsstrukturen, Umnutzungen von Industriebrachen und auch Neubauten, aber auch bei Vorhersagen zu städtischen Entwicklungen mit modernen Simulationswerkzeugen ist die Bewertung des zukünftigen Zustandes hinsichtlich Nachhaltigkeit elementar für die Planung heute.

Ziel dieser Arbeit ist die Beurteilung von verkehrs- und stadtplanerischen Projekten und künftigen Zuständen durch einen quantitativ ermittelbaren Nachhaltigkeitsindex. Dazu sollen folgende Inhalte erarbeitet werden:

- Zusammenfassung und Beurteilung bisherige Ansätze zur Beurteilung der Nachhaltigkeit bei verkehrs- und stadtplanerischen Projekten,
- Ableitung von Indikatoren zur Beurteilung von
 - planerischen Projekten,
 - der aktuellen Situation oder
 - einer Simulation (z.B. mit *MATSim*, *UrbanSim*)
- Erarbeitung eines Evaluationswerkzeugs auf Basis dieser Grundlagen
- Exemplarische Anwendung dieses Evaluationswerkzeugs auf verschiedene Orte des Kantons Zürich und zur Beurteilung von Simulationsergebnissen des Projektes *SustainCity*

Zwar gibt es zahlreiche Arbeiten zum Thema Nachhaltigkeit und Stadt, ein quantitativer Nachhaltigkeitsindex, welcher eine Nachhaltigkeitsbeurteilung aufgrund von GIS- oder vergleichbarer Daten ermöglicht, besteht bis heute nach Wissen des Autors allerdings nicht. Diese Lücke soll durch die vorliegende Arbeit geschlossen werden, indem ein solcher Index entworfen wird und beispielhaft Nachhaltigkeitsbeurteilung zu Gebieten im Kanton Zürich generiert werden.

Die Arbeit steht im Kontext des Projektes *SustainCity*, welches die Integration von modernen Verkehrssimulationen und auf Mikrosimulationen basierenden Flächennutzungsmodellen so-

wie die Adaption des Flächennutzungssimulationstools *UrbanSim* an einen europäischen Kontext zum Ziel hat (Schirmer, Zöllig, Müller, Bodenmann und Axhausen, 2011). *SustainCity* wird von zwölf verschiedenen Gruppen an Universitäten in zahlreichen Ländern bearbeitet, wobei die Koordination beim Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme an der ETH Zürich liegt. Das Ziel dieser Arbeit ist es unter anderem, Simulationsergebnisse aus *SustainCity* hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit bewerten zu können. Ein weiteres Ziel ist es, aufzuzeigen, welche zusätzlichen Daten für eine Beurteilung der Nachhaltigkeit notwendig wären um weitere wichtige Aspekte berücksichtigen zu können, d.h. welche Daten *UrbanSim* in Zukunft zusätzlich generieren sollte.

2.2 Abgrenzung der Untersuchungsthematik

Diese Arbeit beschränkt sich auf messbare Einflüsse der gebauten Umwelt auf die Nachhaltigkeit (eine kurze Definition des Begriffs „gebaute Umwelt“ erfolgt in Kapitel 4). Zusätzlich werden nur Aspekte in das Beurteilungsmodell aufgenommen, für die hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit anhand von räumlich expliziten Daten eine Beurteilung möglich ist. D.h., dass z.B. die Mitwirkung der Bevölkerung nicht berücksichtigt wird. Allerdings ist es ein Ziel, dass sogenannte „weiche“ Faktoren möglichst weit gehend von den verwendeten Indikatoren zumindest indirekt abgebildet werden. Zudem sollen auch nicht durch das Beurteilungsmodell erfasste, in der Literatur aber besprochene Aspekte der Nachhaltigkeit aufgezeigt werden.

Zentrales Thema in der Literatur ist der Energie- und Ressourcenhaushalt. Dabei hat die Herkunft der Energie einen sehr starken Einfluss auf die Nachhaltigkeit, ohne dass die städtische Struktur diese Herkunft per se direkt beeinflusst (es gibt bestimmte Strukturen, welche die Gewinnung erneuerbarer Energien innerhalb der Stadt begünstigen, allerdings dürfte der Effekt sehr klein sein). Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass die Herkunft der Energie nicht beeinflussbar ist.

2.3 Gliederung der Arbeit

Die Arbeit ist in vier Hauptteile gegliedert. In einem ersten Teil (Kapitel 3, 4 und 5) wird die Literatur zu den Themen Nachhaltigkeit und Stadt, Einfluss der gebauten Umwelt auf die Nachhaltigkeit und Methoden zur Beurteilung der Nachhaltigkeit und Analyse von Stadtstrukturen analysiert. In einem zweiten Teil (Kapitel 6) wird aufgrund der Literaturanalyse ein Modell zur Beurteilung der Nachhaltigkeit entwickelt. In einem dritten Teil (Kapitel 7 und 8) werden die Umsetzung dieses Modell in Programmcode und die Anwendung des so entwickelten Beurteilungstools erläutert und daraus Analysen des Modells abgeleitet. Im letzten

Teil (Kapitel 9) werden die gewählten Methoden und Verfahren bewertet, Schlussfolgerungen zu den zentralen Zielen gezogen und künftige Herausforderungen identifiziert. Die Literaturliste (Kapitel 10) wird durch eine kommentierte Bibliographie (Kapitel 11) ergänzt.

3 Nachhaltigkeit und Stadt

3.1 Was bedeutet Nachhaltigkeit?

3.1.1 Definition

Der in praktisch jeder Arbeit über Nachhaltigkeit zitierte Brundtland-Bericht von 1987 (World Commission on Environment and Development (WCED), 1987) enthält folgende allgemeine Definition der nachhaltigen Entwicklung, die bis heute Relevanz hat: eine Entwicklung ist nachhaltig, wenn sie die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne die Möglichkeit künftiger Generationen zu gefährden, ihre Bedürfnisse ebenfalls zu befriedigen.

Der Auslöser für den sehr umfangreichen Bericht der WCED war letztlich die Sorge um die Natur in den achtziger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts. Im Zentrum des Berichts stehen aber laut Billing (2004) die menschlichen Bedürfnisse. Es wird implizit eine anthropozentrische Sichtweise vertreten, die davon ausgeht, dass die Berücksichtigung der gegenwärtigen und künftigen menschlichen Bedürfnisse ausreicht, um die Natur zu erhalten (dies im Gegensatz zur biozentrischen Begründung für den Erhalt der Natur: diese besitze einen inhärenten Wert, und dies alleine mache sie schützenswert; in dieser Arbeit wird auf diesen Gegensatz nicht weiter eingegangen und es wird eine anthropozentrische Sichtweise verwendet).

Die heute lebenden Menschen sollen also ihre Bedürfnisse befriedigen können, genauso wie die in Zukunft lebenden Menschen. Da natürliche Ressourcen endlich sind, ergeben sich daraus Grenzen für die Bedürfnisbefriedigung in der Gegenwart, deren Respektierung die sogenannte intergenerationelle Gerechtigkeit gebietet. Aus diesen Überlegungen wird auch der Begriff Zukunftsfähigkeit, abgeleitet, eine alternative Übersetzung des Begriffs *Sustainability* ins Deutsche. Dieser zeitliche Aspekt veranschaulicht zudem den inhärent dynamischen Charakter der Nachhaltigkeit.

Aus der Notwendigkeit einer intergenerationellen Gerechtigkeit leitet Billing (2004) die Notwendigkeit der intragenerationellen Gerechtigkeit ab. In der Zukunft lebende Menschen können die Nachkommen der heutigen Armen sein, und werden ihre Bedürfnisse nur befriedigen können, wenn dies auch ihren Vorfahren ermöglicht wird. Denn andernfalls können diese heute lebenden Vorfahren der künftigen Menschen keine oder keine ausreichende Zukunftsvorsorge betreiben.

Aus diesen Überlegungen leitet Billing (2004) den zeitlichen und räumliche Geltungsbereich des Nachhaltigkeitskonzeptes ab. Da jede Generation die Möglichkeit ihrer Kinder zur Bedürfnisbefriedigung gewährleisten muss, ergibt sich eine Kette von Verantwortung und Verpflichtung, die letztlich bis in eine unendliche Zukunft reicht. Innerhalb einer Generation obliegt die Verantwortung und Verpflichtung zur Bedürfnisbefriedigung allen und muss auch allen möglich sein, so dass das Postulat der intragenerationellen Gerechtigkeit für alle Räume gilt. Das bedeutet, dass das Konzept der Nachhaltigkeit keine räumlichen oder zeitlichen Begrenzungen erlaubt.

Nachhaltigkeit bezieht sich im heutigen Verständnis auf die drei Säulen Ökologie, Ökonomie und Soziales. Laut Billing (2004) stehen dabei folgende Aspekte im Vordergrund:

- Ökologie:
Einhaltung ökologischer Nutzungs- und Belastungsgrenzen
- Ökonomie:
Effizienzsteigerung bei der Ressourcennutzung und wirtschaftliches Wachstum
- Soziales:
Vorrang qualitativer Aspekte des Wachstums vor quantitativen Aspekten, Verteilungsgerechtigkeit, Gleichberechtigung

Laut Boschmann und Kwan (2008) ist es schwierig, eine breit akzeptierte Bedeutung des sozialen Aspekts der Nachhaltigkeit zu definieren, da dieser nur beschränkt quantitativ messbar ist und alle verfügbaren plausiblen Indikatoren normativ sind.

Die drei Säulen können nicht unabhängig voneinander betrachtet werden, da menschliches Handeln immer alle drei betrifft. Die Berücksichtigung der drei Säulen der Nachhaltigkeit wird oft auch als *Triple Bottom Line-Ansatz* bezeichnet und genießt eine hohe Akzeptanz (Mori und Christodoulou, 2012).

Die oben dargelegte, auf die Ausführungen von Billing (2004) gestützte Definition von Nachhaltigkeit lässt sich gut mit den von Mori und Christodoulou (2012) identifizierten zwei Hauptelementen der Nachhaltigkeit zusammenfassen:

- *Triple Bottom Line*
- Inter- und intragenerationelle Gerechtigkeit

Laut Mori und Christodoulou (2012) wird in der Literatur zunehmend eine vierte Dimension der Nachhaltigkeit erwähnt, welche Institutionen betrifft. Auch Krank (2010) definiert Nachhaltigkeit vierdimensional, allerdings führt sie neben den drei üblichen Säulen als vierten Bereich die Kulturelle Tragfähigkeit / Entwicklungsfähigkeit („viability“) ein. Zusätzlich be-

rücksichtigt sie sozio-kulturelle Einflüsse und auch Institution. Diese Betrachtungsweise stellt die Lebensqualität in Zentrum.

3.1.2 Gesellschaftlicher Kapitalbestand

Laut Billing (2004) kann intergenerationelle Gerechtigkeit dadurch erreicht werden, dass der gesellschaftliche Kapitalbestand konstant gehalten wird, da dieser die Quelle zukünftiger Einkommens- und Produktionsmöglichkeiten ist und dadurch letztlich über die Möglichkeiten zur Bedürfnisbefriedigung bestimmt. Der gesellschaftliche Kapitalbestand hat laut Billing (2004) zwei Bestandteile:

- Menschengemachtes Kapital:
 - als Ergebnis ökonomischer Aktivitäten hergestellte physische Bestände wie z.B. Gebäude, Infrastrukturen oder Maschinen
 - immaterielle Bestände (auch als kulturelles Kapital bezeichnet) wie z.B. Innovationsfähigkeit, Wissen, Traditionen, Institutionen oder Handlungsmuster
- Naturkapital:
Gesamtheit der natürlichen Ressourcen, die ein produktives Potenzial aufweisen, wie z.B. Biomasse, Artenvielfalt oder Rohstoffe

Die natürlichen Ressourcen werden dabei zusätzlich nach ihrer Erneuerbarkeit unterschieden. Zudem existieren auch von der Natur erbrachte Güter und Dienstleistungen wie z.B. frische Luft, sauberes Wasser oder produktive Böden. Allerdings werden die Handlungsoptionen zukünftiger Generationen laut Billing (2004) vor allem durch eine Konstanz jener Ressourcen erreicht, die ein produktives Potenzial aufweisen.

Mori und Christodoulou (2012) erwähnen zudem einen dritten Bestandteil des gesellschaftlichen Kapitals, das soziale Kapital, das allerdings nicht präzise definiert wird. Die Weltbank verwendet gemäss ARE (2012) ebenfalls ein Kapitalstockmodell mit Dimensionen entsprechend den drei Säulen der Nachhaltigkeit. Diese Betrachtungsweise ist weit verbreitet, die separate Quantifizierung sozialen Kapitals erscheint aber schwierig. Die einfachere Unterteilung in natürliches und menschengemachtes Kapital ist für die kommenden Ausführungen zielführender.

Mori und Christodoulou (2012) liefern eine knappe Zusammenfassung der vier Kernfunktionen des Naturkapitals:

- Das Naturkapital stellt die Rohmaterialien für die Produktion und den direkten Konsum zur Verfügung;
- es nimmt die Abfälle der Produktion und des Konsums auf;

- es liefert Annehmlichkeiten wie z.B. schöne Landschaften;
- es erbringt die elementaren lebenserhaltenden Funktionen, von denen menschliches Leben abhängt.

Die Auffassung, dass Ressourcen und / oder gesellschaftliches Kapital konstant gehalten werden müssen, scheint weit verbreitet zu sein. Sie lässt allerdings ausser Acht, dass bei einem Bevölkerungswachstum der Bestand (an Ressourcen und / oder gesellschaftlichen Kapital) ebenfalls zunehmen müsste, um die Wohlfahrt der einzelnen Individuen konstant zu halten. Selbst wenn der Begriff „Konstanz“ in Relation zur Bevölkerungsentwicklung verstanden wird, gibt es einen weiteren Einwand gegen das Konzept der Konstanz: es scheint offensichtlich, dass der gesellschaftliche Kapitalbestand pro Mensch heute wesentlich höher ist als z.B. noch um 1800 – ein Vergleich der durchschnittlichen Handlungsmöglichkeiten eines Menschen zu beiden Zeitpunkten veranschaulicht dies eindrücklich. Es scheint daher fraglich, ob eine reine Konstanz des gesellschaftlichen Kapitals eine adäquate Anforderung an eine nachhaltige Entwicklung ist.

3.1.3 Nachhaltigkeitsverständnis

Da viele natürliche Ressourcen endlich sind – zu denken ist v.a. an fossile und mineralische Stoffe, (produktive) Landflächen, die zu einem Zeitpunkt zur Verfügung stehende Süsswassermenge und die gesamte Wassermenge – führt laut Billing (2004) jede Reduktion des gesellschaftlichen Kapitalbestands zwangsläufig zu einer Verminderung der künftigen Handlungsoptionen und dadurch der Möglichkeit zur Bedürfnisbefriedigung; entsprechend verlangt das Konzept der Nachhaltigkeit für solche Reduktionen einen Ausgleich. Wie dieser erfolgen soll, ist allerdings äusserst umstritten. Letztlich geht es um die Frage, ob und wie Naturkapital durch menschengemachtes Kapital substituiert werden kann. Die Ansätze der schwachen („weak sustainability“) und der strikten („strong sustainability“) Nachhaltigkeit markieren die Extrempositionen in dieser Diskussion.

Schwache Nachhaltigkeit

Gemäss Billing (2004) ist es nach dem Ansatz der schwachen Nachhaltigkeit ausreichend, wenn die Summe aus natürlichem und menschengemachtem Kapital über die Zeit konstant bleibt. Das heisst, dass das Naturkapital keine besondere Stellung einnimmt und theoretisch unbegrenzt durch menschengemachtes Kapital substituiert werden kann. Die zwei grundlegenden Annahmen sind nach Billing (2004):

- Zukünftige Generationen haben nur einen Anspruch auf ein konstantes produktives Gesamtkapital und nicht auf ganz bestimmte Kapitalbestandteile.

- Es gibt unbegrenzte Substitutionsmöglichkeiten zwischen natürlichem und menschengemachtem Kapital.

Die erste Annahme wird von Billing (2004) vor unter der Annahme kritisiert, dass die Bedürfnisse künftiger Menschen denjenigen der heute lebenden Menschen zumindest ähnlich sein werden und sie deshalb die heute bestehende Verlustaversion gegenüber der Natur ebenfalls aufweisen dürften. Plakativ formuliert bestehe keine Indifferenz künftiger Generationen dazu, „ob sie Plastik oder Natur erben“ (Billing, 2004, 37). Es ist anzumerken, dass es Hinweise darauf gibt, dass mit zunehmendem Wohlstand auch die Bereitschaft zunimmt, die Natur zu erhalten und zu schützen – entsprechend könnte eine den Wohlstand fördernde Substitution natürlichen Kapitals durch menschengemachtes Kapital im Endeffekt zu einer effektiveren und dauerhafteren Erhaltung natürlichen Kapitals führen als die strikte Erhaltung natürlichen Kapitals, sofern diese eine geringere Zunahme des Wohlstands oder gar dessen Verkleinerung zur Folge hätte.

Die zweite Annahme ist laut Billing (2004) der Hauptkritikpunkt zahlreicher Autoren am Konzept der schwachen Nachhaltigkeit. Bereits Substitutionen innerhalb der jeweiligen Kapitalbestände seien nicht unbegrenzt möglich (z.B. seien wenig komplexe Ressourcen wie Mineralien keine Substitute für sehr komplexe Ressourcen wie etwa die Regulierung des Klimas). Substitutionen zwischen den Kapitalbeständen seien noch wesentlich eingeschränkter möglich, da natürliche Kapitalbestände teilweise Funktionen von solch hoher Komplexität erfüllen, dass menschengemachte Kapitalbestände diese niemals erfüllen könnten. Zudem seien alle anthropogenen Produktionsprozesse auf das Vorhandensein von Naturkapital angewiesen. Weiterhin sei das Wissen zu ökologischen Wirkungszusammenhängen und zur Irreversibilität von Entwicklungen vollkommen ungenügend, um die Annahme zu rechtfertigen, dass Substitutionen unbegrenzt möglich sind.

Zusammenfassend ist laut Billing (2004) zu beachten, dass ökonomische und soziale Systeme letztlich Subsysteme des ökologischen Systems sind, davon abhängen und es in seiner Gesamtheit nicht ersetzen können. Ähnlich formulieren Mori und Christodoulou (2012) ihre Kritik am Konzept der schwachen Nachhaltigkeit. Für sie bilden die drei Säulen der Nachhaltigkeit eine verschachtelte Hierarchie: Ohne lebenserhaltendes biophysikalisches System kann eine Gesellschaft nicht prosperieren und ohne funktionierende soziale Strukturen und Institutionen kann die Wirtschaft nicht florieren. Entsprechend brauche es absolute Grenzwerte des Verbrauchs natürlichen Kapitals (und auch sozialen Kapitals bei einer Betrachtung mit drei Kapitalstöcken) pro Zeiteinheit. Und dies unabhängig davon, wie gross das allenfalls durch einen zusätzlichen Verbrauch zu schaffende menschengemachte Kapital als Substitution des Verbrauchs wäre.

Strikte Nachhaltigkeit

Die Kritik am Konzept der schwachen Nachhaltigkeit fliesst direkt in das gegensätzliche Konzept der strikten Nachhaltigkeit ein. Die grundlegende Annahme ist laut Billing (2004) dementsprechend, dass es keine funktionsäquivalenten Substitute für Naturkapital gibt, d.h. dass Reduktionen des natürlichen Kapitalstocks nicht durch menschengemachtes Kapital kompensiert werden können. Entsprechend kann Nachhaltigkeit nur durch eine Konstanz des natürlichen Kapitals erreicht werden.

Das Konzept der strikten Nachhaltigkeit wird von Billing (2004) aufgrund der Unvereinbarkeit mit der Erfüllung der Bedürfnisse der heutigen Generation kritisiert, die ebenso Bestandteil einer nachhaltigen Entwicklung sei wie die Berücksichtigung künftiger Generationen. Und die Erfüllung von Bedürfnissen der heutigen Generation und die Schaffung von intragenerationeller Gerechtigkeit bedürfe in einem gewissen Ausmass die Ausbeutung natürlicher Ressourcen, selbst wenn diese erschöpfbar sind.

Zudem ist anzumerken, dass eine Konstanz des absoluten Bestands an Naturkapital bei einer zunehmende Bevölkerung zwangsläufig zu einer Verminderung des pro Person zur Verfügung stehenden Naturkapitals führt. Die Erhaltung der Handlungsmöglichkeiten künftiger Generationen bedingt unter den Prämissen der strikten Nachhaltigkeit also eine Zunahme des Naturkapitals. Sofern eine Vermehrung des Naturkapitals proportional zur Bevölkerungsentwicklung nicht möglich ist – und dies erscheint bei einer Bevölkerungszunahme wahrscheinlich – bedingt die Erhaltung der Handlungsmöglichkeiten künftiger Generationen automatisch eine Substitution gewisser Teile des Naturkapitals durch mehr menschengemachtes Kapital.

Kritische ökologische Nachhaltigkeit

Die Kritik an den beiden Nachhaltigkeitskonzepten lässt sich laut Billing (2004) wie folgt zusammenfassen: die schwache Nachhaltigkeit erfüllt die Anforderungen der intergenerationellen Gerechtigkeit nicht, während die strikte Nachhaltigkeit die heute lebenden Menschen zu wenig berücksichtigt und damit auch die intragenerationelle Gerechtigkeit verunmöglicht. Als „praktikablen“ Ausweg schlägt Billing (2004) das Konzept der kritischen ökologischen Nachhaltigkeit vor.

Dieses Konzept enthält laut Billing (2004) zwei Hauptelemente:

- Konstanz der kritischen ökologischen Kapitalbestände:
Der natürliche Kapitalbestand darf nicht unter ein kritisches Niveau sinken, welches die Stabilität und Belastbarkeit des Ökosystems garantiert. Diese kritischen Bestände sind nicht substituierbar.

- Nutzung und Kompensation:
Über die kritischen ökologischen Kapitalbestände hinaus können und sollen Ressourcen genutzt werden, eine Substitution von Naturkapital durch menschengemachtes Kapital ist zulässig. D.h., vorhandene Entwicklungs- und Substitutionsspielräume werden genutzt.

Der kritische ökologische Bestand wird dabei durch einen sogenannten *Safe Minimum Standard* (SMS) geschützt. Die Durchsetzung des Nachhaltigkeitsansatzes erfolgt gemäss Billing (2004) durch das ökonomische Effizienz-Prinzip. Dadurch werde die Verschwendung gesellschaftlicher Ressourcen vermieden, das kritische ökologische Kapital mit geringsten möglichen Kosten erhalten und das nicht kritische ökologische Kapital nutzenmaximal verwendet.

Konzeptionell erfüllt dieser Ansatz die Anforderung, sowohl die Interessen künftiger Generationen als auch der heute lebenden Menschen zu berücksichtigen. Die grösste Schwierigkeit des Konzeptes dürfte die Bestimmung des zu schützenden Naturkapitals sein. Es ist sehr schwierig, die Höhe von Grenzwerten für den praktischen Gebrauch festzulegen. Die ökologischen und biophysikalischen Schwellen müssen in Mengen menschlicher Aktivitäten umgerechnet werden, was mit grossen Unsicherheiten behaftet ist. Zudem müssen kausale Zusammenhänge zwischen menschlichen Aktivitäten und Auswirkungen auf ökologische Systeme eindeutig identifiziert und einem Verursacher zugeordnet werden, was kaum vollständig möglich ist.

Nachhaltigkeitsverständnis der Schweiz

Das offizielle Verständnis der Schweiz des Begriffs Nachhaltigkeit deckt sich konzeptionell mit dem Konzept der kritischen ökologischen Nachhaltigkeit. Unter dem Begriff „schwache Nachhaltigkeit Plus“ respektive *sensible sustainability* wird dabei eine durch kritische Grenzen eingeschränkte Substituierbarkeit zwischen den (entsprechend dem Verständnis der Weltbank drei) Kapitalstöcken ermöglicht, „sofern die grundlegenden Prinzipien der Nachhaltigen Entwicklung nicht verletzt werden“ (INFRAS, 2004, 4).

Entsprechend werden Vorhaben oder Entwicklungen in Nachhaltigkeitbeurteilungen des Bundes „als nicht oder nur wenig nachhaltig beurteilt, wenn:

- soziale, wirtschaftliche und ökologische Minimalanforderungen verletzt werden,
- das Vorhaben negative Auswirkungen hat, die nur schwer oder gar nicht rückgängig gemacht werden können,
- negative Wirkungen des Vorhabens nicht von der heutigen, sondern von der zukünftigen Generation getragen werden müssen,

- über die Auswirkungen des Vorhabens Unsicherheiten bestehen oder diese mit Risiken behaftet sind, so dass starke negative Effekte nicht völlig ausgeschlossen werden können;
- die negativen Auswirkungen Bereiche treffen, in denen bereits akute Nachhaltigkeitsprobleme bestehen oder in denen sich angesichts eines aktuellen Trends die Probleme verschärfen könnten.“ (INFRAS, 2004, 5)

Auswirkungen des Nachhaltigkeitsverständnisses auf die Beurteilung der Nachhaltigkeit

Die zugrundeliegende Konzeption von Nachhaltigkeit (z.B. schwach oder strikt) bestimmt zu einem gewissen Grad die Möglichkeiten zur Beurteilung der Nachhaltigkeit. Mori und Christodoulou (2012) z.B. gehen bei der Erarbeitung konzeptioneller Anforderungen an einen *City Sustainability Index* von der Existenz ökologischer und biophysikalischer Grenzen der möglichen Entwicklung aus. Entsprechend erachten sie es als äusserst wichtig, diese Grenzen in der Form von Grenzwerten in eine Nachhaltigkeitsbeurteilung mit einzubeziehen. Zudem gestehen sie nur einer absoluten Beurteilung der Nachhaltigkeit wirkliche Aussagekraft zu – dies im Gegensatz zu einer relativen Beurteilung z.B. in Form einfacher Rangfolgen verschiedener Entitäten. Dies, da selbst die „Siegerin“ einer solchen relativen Beurteilung absolut gesehen nicht zwingend nachhaltig ist, d.h. keine Aussage über die Einhaltung der Grenzen gemacht wird. Ein Vergleich der relativen Performance verschiedener Entitäten würde in diesem Fall nur Sinn machen, wenn gleichzeitig klar wäre, dass sich zumindest einige davon wirklich auf dem Pfad einer nachhaltigen Entwicklung befinden, d.h. die Grenzwerte einhalten.

Das Konzept der strikten Nachhaltigkeit und zum Teil auch der kritischen ökologischen Nachhaltigkeit stehen in einem konzeptionellen Widerspruch zu Beurteilungsmethoden, bei denen implizit oder explizit eine Substituierbarkeit zwischen natürlichem und menschengemachtem Kapital vorausgesetzt wird, indem z.B. eine einzige zusammenfassende Grösse als Resultat ausgegeben wird.

3.1.4 Schlussfolgerungen

Das Konzept der kritischen ökologischen Nachhaltigkeit und eine entsprechende Durchsetzung des Nachhaltigkeitsansatzes durch das ökonomische Effizienz-Prinzip erscheinen aufgrund der Analyse verschiedener Nachhaltigkeitsverständnisse am überzeugendsten. In der Folge wird deshalb auf einem entsprechenden Verständnis der Nachhaltigkeit aufgebaut.

Die grösste Schwierigkeit der kritischen ökologischen Nachhaltigkeit ist wie erwähnt die Ermittlung der kritischen Grenzwerte für die Nutzung des Naturkapitals, die Umrechnung in

menschliche Aktivitäten sowie die Zuordnung zu bestimmten Verursachern. Allerdings stehen diese Probleme nicht im Fokus dieser Arbeit und werden in ihrem Rahmen auch nicht gelöst.

Vielmehr wird auf der Schlussfolgerung aus dem Konzept der kritischen ökologischen Nachhaltigkeit aufgebaut, dass eine Durchsetzung des Nachhaltigkeitsansatzes durch das ökonomische Effizienz-Prinzip möglich ist. Effizienz bei der Nutzung natürlicher Ressourcen und des gesellschaftlichen Kapitals erlaubt es, den Wohlstand der Gesellschaft sowie die Handlungsmöglichkeiten der Individuen zu maximieren. Dieser Gedanke mag trivial erscheinen, ist für gewisse Teile dieser Arbeit von zentraler Bedeutung.

Allerdings stellt sich auch die Frage, ob das was effizient getan wird, auch richtig ist oder vielleicht grundsätzlich überdacht werden müsste. Das Thema der Effektivität wäre also ebenfalls äusserst relevant, kann aber im Rahmen dieser Arbeit nicht bearbeitet werden.

3.2 Was ist eine nachhaltige Stadt?

3.2.1 Definition

Da Nachhaltigkeit wie gezeigt einen dynamischen Aspekt hat, ist es sinnvoll, zu fragen, was eine nachhaltige *Entwicklung* im Falle einer Stadt ist. Billing (2004) liefert folgende, an die Erläuterungen in Kapitel 3.1 angelehnte Definition von nachhaltiger Stadtentwicklung:

„Stadtentwicklung ist nachhaltig, wenn die StadtbewohnerInnen ihre Bedürfnisse über einen im Prinzip unbegrenzten Zeitraum befriedigen können, ohne dass sie dabei auf Kosten anderer Räume oder Generationen leben.“ (Billing, 2004, 50)

Als Grundlage für die Dauerhaftigkeit der Entwicklung sieht Billing (2004) den Erhalt der für die Produktions- und Reproduktionsprozesse in der Stadt notwendigen Kapitalbestände. Als Kriterien für eine nachhaltige Stadtentwicklung formuliert sie in Anlehnung an die drei Säulen der Nachhaltigkeit und das Konzept der kritischen ökologischen Nachhaltigkeit:

- Ökologische Tragfähigkeit
- Ökonomische Funktionsfähigkeit
- Soziokulturelle Brauchbarkeit

Wallbaum, Krank und Teloh (2011) definieren nachhaltige Stadtentwicklung in Anlehnung an die *Sustainable City Conference* in Rio de Janeiro im Jahr 2000 als die Fähigkeit eines städtischen Gebiets und seiner Region, mit dem von der Gesellschaft gewünschten Mass an Lebensqualität fortzubestehen, ohne die Optionen der heutigen und künftigen Generationen zu

beeinträchtigen und ohne nachteilige Auswirkungen ausserhalb des städtischen Gebiets zu verursachen.

Diese Betrachtungsweise setzt die Lebensqualität der Bewohner ins Zentrum. Dies im Gegensatz zu vielen anderen Arbeiten (wie auch Billing (2004) oder Mori und Christodoulou (2012)), bei denen die Erhaltung der sozialen Struktur und der ökologischen Grundlagen im Zentrum steht. Entsprechend hoch wird bei Wallbaum et al. (2011) die Bedeutung der *Stakeholder* eingestuft, die ausgehend von ihren Bedürfnissen letztlich die Anforderungen an Projekte definieren.

Weiterhin postulieren Wallbaum et al. (2011) aus Sicht dreier Hauptstakeholdergruppen, die als Klienten eines Projekts bezeichnet werden, folgende Kernelemente für eine nachhaltige Stadtentwicklung:

- Lokale Verwaltung / Gemeinde / Stadt:
 - Soziale Gerechtigkeit
 - Hoher Stand der Lebensqualität
 - Finanzielle Machbarkeit
- Entwickler:
 - Wirtschaftlichkeit
- Endnutzer (getrieben von persönlichen Interessen):
 - Bezahlbare Wohnungen und Büroräume
 - Gute Verkehrsanbindung, insb. zum Öffentlichen Verkehr (ÖV)
 - Ein komfortables, gesundes Umfeld

Es bestehen zahlreiche Konflikte zwischen den Interessen der verschiedenen Stakeholdergruppen.

Als Relativierung einer Haltung, welche Bedürfnisse und Ansprüche von Stakeholdern ins Zentrum stellt, sei folgendes angemerkt: Die blosser Erfüllung von Bedürfnissen der heutigen Generation führt nicht per se zu einer nachhaltigen Entwicklung. Dies sei im Folgenden kurz erläutert. Wenn ein Individuum (oder eine kleine Gemeinschaft wie z.B. eine Familie) ein Bedürfnis formuliert, wird selten beachtet, welche Auswirkungen die Erfüllung dieses Bedürfnisses in längeren Zeiträumen hat und dass die Erfüllung eines persönlichen Bedürfnisses für sehr viele Individuen zusammen in der Gesamtheit negative Folgen haben kann – letztlich kann dadurch sogar die Erfüllung des Bedürfnisses selbst in Zukunft eingeschränkt werden. Ein anschauliches Beispiel dafür ist das Bedürfnis sehr vieler Individuen nach einem Einfamilienhaus in Stadtnähe und im Grünen. Wird dieses Bedürfnis für alle Individuen, die es hegen,

erfüllt, entspricht das Resultat nach 20 Jahren kaum mehr den ursprünglichen Vorstellungen – es entsteht der berühmte Siedlungsbrei rund um eine Stadt, der kaum mehr etwas mit dem Haus im Grünen zu tun hat und zudem zu hohen externen Kosten (Landverbrauch, Verkehr uvm.) führt. Offensichtlich wird dies aber bei der Formulierung persönlicher Bedürfnisse nicht berücksichtigt, hegen doch nach wie vor sehr viele Individuen das Bedürfnis nach genau diesem Einfamilienhaus in Stadtnähe im Grünen. Bedürfnisse von Individuen haben also eine kurzfristige und individuelle Perspektive, ihre Auswirkungen sind aber langfristig und von der Gesamtheit individueller Bedürfnissen abhängig.

Da Nachhaltigkeit dynamisch zu verstehen ist (siehe Kapitel 3.1.1), kommt der Anpassungsfähigkeit oder Wandlungsfähigkeit eine wichtige Bedeutung zu, sie ist eine Voraussetzung für eine nachhaltige Stadtentwicklung. Denn nur wenn städtische Strukturen, Wohngrundrisse, Verkehrssysteme usw. an künftige Nutzungen und Ansprüche angepasst werden können, wird ihre volle potenzielle Lebensdauer ausgeschöpft und daher die verfügbaren Ressourcen effizient eingesetzt. Auch Entwicklungen wie schrumpfende Städte o.ä. können durch Anpassungsfähigkeit besser bewältigt werden.

Beyond Green (2008) definiert nachhaltige Orte als solche, die im Laufe der Zeit unter Zustimmung und Mitwirkung der Bewohner und Nutzer ihren *Carbon Footprint* für alle Aspekte des Lebensstils in hohem Masse senken können.

In Kapitel 11.1 der kommentierten Bibliographie sind Verweise zu zahlreichen weiteren Arbeiten mit Definitionen, Konzepten und Ideen für nachhaltige Städte zu finden.

3.2.2 Auswirkungen einer Stadt

Laut Mori und Christodoulou (2012) haben Städte im Allgemeinen positive Effekte auf die sozialen und die ökonomische Dimensionen der Nachhaltigkeit, nicht aber auf die ökologischen. Zudem würden Städte externe ökologische Effekte ausserhalb des Stadtgebiets verursachen – die Nachhaltigkeit von Städten sei also direkt mit der Integrität und Nachhaltigkeit ihres ruralen Hinterlandes verknüpft, das sie Stoffe importieren und exportieren. Deshalb sei es unerlässlich, die Nachhaltigkeit einer Stadt nach dem Prinzip der strikten Nachhaltigkeit zu beurteilen, namentlich damit die negativen ökologischen Effekte separat erfasst und berücksichtigt werden. Wird letzteres unterlassen, können Städte nachhaltig erscheinen, wenn sie Ressourcen aus anderen Gebieten importieren und Abfälle in andere Gebiete exportieren, obwohl sich diese Hinterlandgebiete aufgrund des Umfangs und / oder der Art dieser Stoffflüsse nicht nachhaltig entwickeln. Eine ausführliche Auseinandersetzung mit dieser Thematik und generell negativen und positiven Auswirkungen von Städten ist in Billing (2004) zu finden.

Es ist zweifelsohne wichtig, die Auswirkungen einer Stadt nicht auf das Stadtgebiet beschränkt zu untersuchen. Allerdings ist in vielen Arbeiten zum Thema nachhaltige Stadt eine ideologische Präferenz für Autarkie gegenüber Handel festzustellen; häufig wird „die Stadt“ dafür kritisiert, dass sie in gewissen Fällen ein riesiges Hinterland zum Überleben benötigt. Dies ist kaum plausibel, waren Städte doch immer schon auf den Austausch mit anderen, vor allem auch agrarisch geprägten Räumen angewiesen und sind letztlich grundsätzlich mit Spezialisierung und Handel verbunden (siehe dazu z.B. Morris (2010)). Keine Stadt war jemals autark, und würden die in ihr dicht zusammen lebenden Einwohner auf das Hinterland verteilt leben, dürfte die benötigte Fläche zur Befriedigung ihrer Bedürfnisse bei identischem Lebensstandard kaum kleiner sein.

Was zudem ob der Betrachtung der negativen Auswirkungen einer Stadt nicht vergessen gehen darf, ist das riesige Potential, welches Städte bieten. Billing (2004) bezeichnet die Stadt als „der beste Ort zur Förderung gesellschaftlicher Integration und persönlicher Freiheit“ (Billing, 2004, 26) sowohl in der Geschichte als auch in der heutigen Zeit und betont die Möglichkeiten, die sie zur Ausschöpfung wirtschaftlicher Potentiale bietet. Zudem sei sie der Ort, wo kulturelle, politische und wirtschaftliche Innovationen stattfänden. Auch in ökologischer Sicht biete die Stadt viele Vorteile, da durch die räumliche Konzentration von Menschen und Ressourcen ein Optimum ökologischer Effizienz erreichbar sei.

3.2.3 Konkrete Vorschläge für eine nachhaltige Stadt

Es gibt unzählige Bücher und Aufsätze, die das Thema nachhaltige Stadt oder nachhaltige Stadtentwicklung behandeln. Von den Arbeiten, die auf einem ökonomischen Verständnis von Nachhaltigkeit aufbauen, versuchen einige, „harte“ Bewertungskriterien zu entwickeln und die komplexen Zusammenhänge, denen das gesellschaftliche Kapital unterliegt, gesamthaft zu berücksichtigen. Andere fokussieren auf einzelne, mehr oder weniger isoliert betrachtete Aspekte, in denen sie z.B. grosse Chancen für eine verbesserte Effizienz sehen. Weitere Arbeiten basieren auf einem anderen, weniger ökonomisch geprägten, eher intuitiven Verständnis von nachhaltiger oder „grüner“ Stadt. Solche Arbeiten führen durchaus zu interessanten und innovativen Erkenntnissen und Vorschlägen, ignorieren aber häufig Wechselwirkungen mit anderen Bereichen und lehnen teilweise aus ideologischen Gründen eine Quantifizierung von Effekten ab.

In der Folge sollen einige Ansätze und Vorschläge für eine nachhaltige Stadt vorgestellt werden. Dieser kurze Überblick hat nicht den Anspruch der Vollständigkeit, vielmehr soll er die grosse Bandbreite an Arbeiten illustrieren – das Thema bildet denn auch nicht den Fokus dieser Arbeit, geht es bei den hier besprochenen Ansätzen und Vorschlägen doch um die Schaf-

fung, die Erreichung von Nachhaltigkeit, während diese Arbeit sich mit der Beurteilung von Nachhaltigkeit beschäftigt. In der kommentierten Bibliographie sind in Kapitel 11.1 zahlreiche weitere Arbeiten mit praktischen Ansätzen zur Schaffung von nachhaltigen Städten respektive deren Transformation zur Nachhaltigkeit aufgeführt.

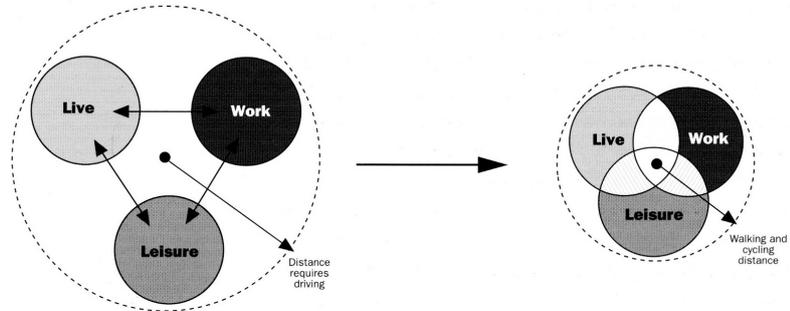
Newman und Kenworthy (1996) schlagen vor Städte konsequent auf den öffentlichen Personennahverkehr auszurichten und sich dabei der Verbindung zwischen Verkehrssystemen und Flächennutzung zu bedienen, indem z.B. Subzentren mit hoher Dichte bei Haltestellen errichtet werden.

Auch Rogers und Gumuchdjian (1997) verfolgen ähnliche Ideen. Sie propagieren eine moderne kompakte Stadt und lehnen monofunktionale Entwicklungen und die Dominanz des Automobils ab. Durch kompaktes Wachstum um Zentren der sozialen und wirtschaftlichen Aktivitäten, die auch Knoten des ÖV-Systems sind, soll die Abhängigkeit vom Automobil überwunden werden. Diese kompakten Entwicklungen können unterschiedlich angeordnet werden und dadurch auf lokale Gegebenheiten reagieren (siehe Abbildung 1).

Die Schemen von Rogers und Gumuchdjian (1997) im oberen Teil von Abbildung 1 illustrieren das Ziel einer Überwindung der im 20. Jh. stark verbreiteten Funktionstrennung durch Zonierung. Dieses Ziel ist auch ein Kernelement des *New Urbanism* (siehe Leccese, McCormick und Congress for the New Urbanism (2000)). Die Schemen im unteren Teil von Abbildung 1, welche kompakte Entwicklungen im Einzugsgebiet von ÖV-Knoten propagieren, erinnern auf den ersten Blick an das in Abbildung 2 gezeigte Konzept der Garden Cities von Howard (1902). Allerdings war Kompaktheit nicht ein primäres Ziel der Gartenstadtbewegung, genauso wenig wie die Überwindung der Funktionstrennung (vielmehr war die Gartenstadtbewegung eine der Reaktionen auf die im 19. und zu Beginn des 20. Jahrhunderts sehr dicht besiedelten Städte mit massiven Problemen der Hygiene und Lebensqualität, welche das Hauptmotiv für das später z.B. im Abschlussdokument des vierten Kongresses der CIAM 1933, bekannt geworden als „Charta von Athen“, explizit formulierte Prinzip der Funktionstrennung in der Stadtplanung waren).

Abbildung 1 Vorschlag für eine moderne kompakte Stadt

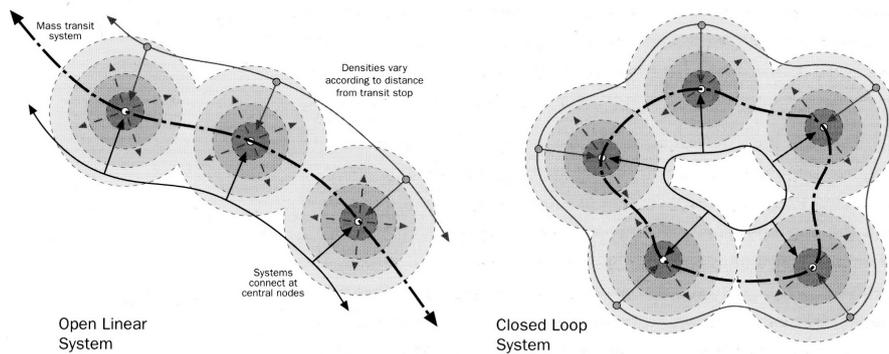
Compact mixed-use nodes reduce journey requirements and create lively sustainable neighbourhoods



Zoning of activities leads to reliance on the private car.

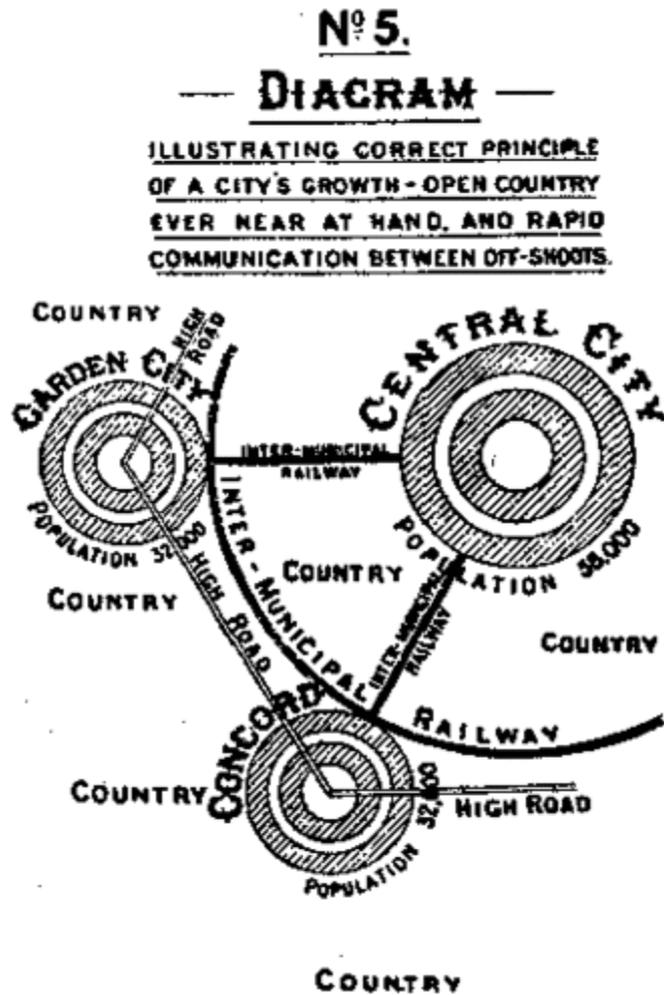
Compact nodes reduce travel and allow walking and cycling.

Compact nodes linked by mass-transit systems can be arranged in response to local constraints



Quelle: Rogers und Gumuchdjian (1997, 39)

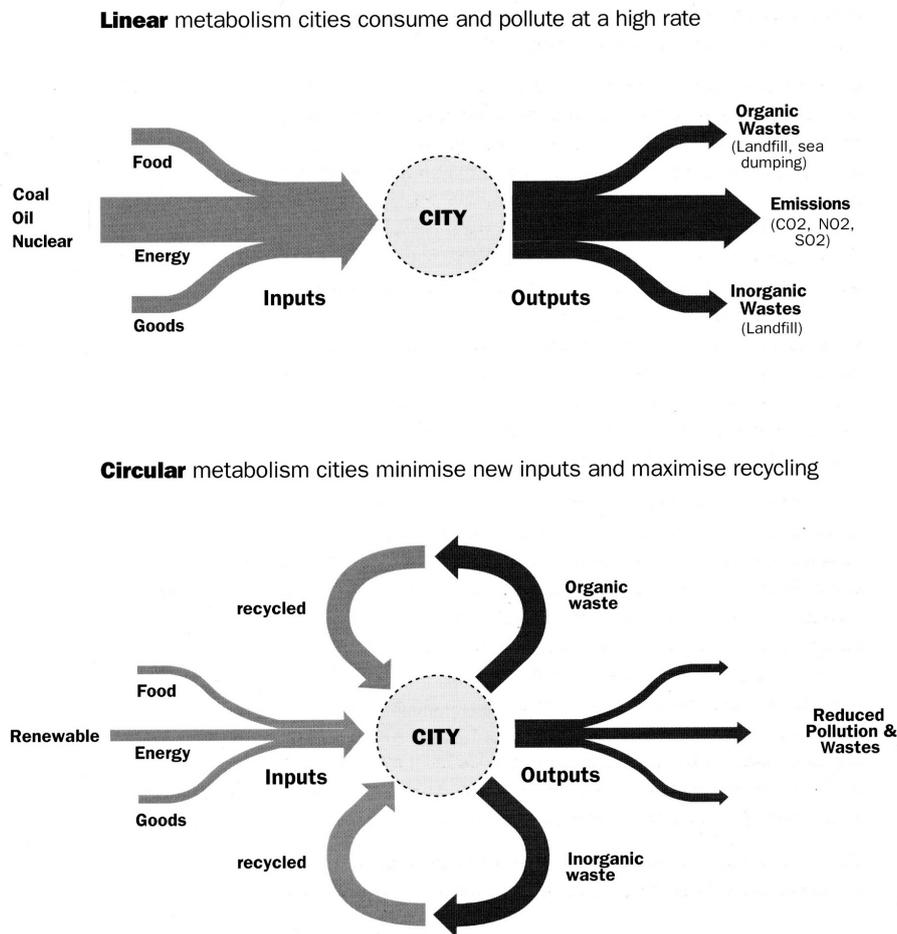
Abbildung 2 Kompakte Stadtknoten im Konzept der Gartenstädte



Quelle: Howard (1902, 120)

Als wichtig erachtet Kenworthy (2006), dass sich Städte in eigentliche Ökosysteme verwandeln, um den Import von natürlichem Kapital (Wasser, Energie, weitere Ressourcen) und den Export von Abfall zu verringern. Dieser Ansatz wird von sehr vielen Autoren verfolgt. Im Kern geht es dabei um den Wandel von einem linearen hin zu einem zirkulären Metabolismus der Stadt. Rogers und Gumuchdjan (1997) stellen diesen Ansatz anschaulich dar (siehe Abbildung 3).

Abbildung 3 Linearer und zirkulärer Metabolismus einer Stadt



Quelle: Rogers und Gumuchdjian (1997, 31)

Kenworthy (2006) beschreibt einen interessanten Disput unter den Verfechtern einer ökologischen Stadt. Die eine Seite erachtet ein wirklich nachhaltiges Leben nur in ruralen oder semi-ruralen Umgebungen mit geringer Dichte als erreichbar, da die Selbstversorgung als sehr wichtig angesehen wird. Das Ziel sei es, Städte in kleinere, dorfähnliche Siedlungen mit ruralen Qualitäten und Werten aufzuspalten. Die andere Seite erachtet unmittelbare Selbstversorgung als weniger wichtig als die Integrität des urbanen Systems. Sie argumentiert, dass höhere Dichten zu einem geringeren Anteil zersiedeltem Land und mehr Flächen für Freiflächen, Gärten, Parks, Landwirtschaft und Wälder führen. Sie sehen zudem grosse Chancen in den Möglichkeiten für lokale Wasser-, Energie- und Abfallsysteme. Die Advokaten der Siedlungen mit geringer Dichte ignorieren gemäss Kenworthy (2006), dass Städte von Natur aus Konzentrationen von Personen und Vielfalt sind, so dass die Streuung / Verteilung von Akti-

vitäten viele der heutigen Probleme verschärfen würde, insbesondere im Verkehrsbereich. Der angesprochene Antagonismus wird sehr anschaulich im Roman *Ecotopia* (Callenbach, 1975) beschrieben, speziell im Gegensatz der Haltungen und Werte der Stadtbewohner, die in aus einer Art Öko-Kunststoff gegossenen Häusern in konzentrierten Siedlungen wohnen, und denjenigen der Bewohner des Waldes, die jegliche städtische Dichte sowie alle Baumaterialien ausser Holz ablehnen.

4 Der Einfluss der gebauten Umwelt

Die Bewertung der Nachhaltigkeit einer Stadt ist aufgrund der Komplexität des Untersuchungsgegenstands und der zahlreichen Wechselwirkungen äusserst schwierig. Detaillierte Bewertungen einzelner Bereiche sind möglich und werden auch angewandt, berücksichtigen die Komplexität des Systems Stadt und die Verbindungen zum Hinterland aber nur ungenügend. Wirklich ganzheitliche Bewertungen existieren erst konzeptionell, d.h. sie sind noch nicht praktisch durchführbar.

In dieser Arbeit geht es darum, anhand von Daten zur gebauten Umwelt die Nachhaltigkeit eines eingegrenzten, städtischen Gebiets zu bewerten. Unter dem Begriff „gebaute Umwelt“ werden in dieser Arbeit sämtliche Gebäude, die physisch erstellte Infrastruktur, die Flächennutzung und die Raumstruktur verstanden. Zudem sind auch Eigenschaften dieser Bestandteile gemeint, z.B. die Gestaltung von Strassenzügen oder Gebäuden.

In diesem Kapitel wird die Literatur zu Auswirkungen der gebauten Umwelt auf nachhaltigkeitsrelevante Faktoren analysiert. Es handelt sich dabei häufig um relativ isolierte Untersuchungen. Entsprechend werden die erwähnten komplexen Zusammenhänge meist nicht umfassend berücksichtigt. Diese Einschränkung ist zu bedauern; der Stand des Wissens und der Umfang dieser Arbeit erlauben aber keine Korrektur dieser Tatsache. Die anschliessende Kombination verschiedener Ergebnisse aus unterschiedlichen Arbeiten und Forschungsgebieten im Nachhaltigkeitsbeurteilungsmodell (Kapitel 6) bricht immerhin mit der isolierten Betrachtung einzelner Bereiche; Wechselwirkungen, welche in den einzelnen Forschungsarbeiten nicht berücksichtigt wurden, können so aber nicht nachträglich eingebaut werden.

Es wurde eine breite Literaturrecherche zum Einfluss der gebauten Umwelt auf nachhaltigkeitsrelevante Faktoren durchgeführt. Das Thema wird in zahlreichen Wissenschaftsgebieten umfangreich besprochen; die vorliegende Übersicht erhebt daher nicht den Anspruch der Vollständigkeit. Das Ziel war es, für möglichst viele Themen relevante Veröffentlichungen zu berücksichtigen.

Die kommentierte Bibliographie (Kapitel 11.2) enthält zusätzliche Literatur zum Thema, die leider im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden konnte. Die entsprechenden Themen wurden aber durch andere, berücksichtigte Veröffentlichungen abgedeckt.

Dieses Kapitel ist thematisch nach nachhaltigkeitsrelevanten Aspekten gegliedert, die durch die gebaute Umwelt beeinflusst werden. Es wird jeweils auf die Relevanz des Themas, den

Stand des Wissens und – wo möglich – die gefundenen Zusammenhänge zwischen gebauter Umwelt und nachhaltigkeitsrelevanten Faktoren sowie deren Elastizitäten eingegangen.

Jeder hier aufgeführte, durch die gebaute Umwelt beeinflusste nachhaltigkeitsrelevante Aspekt hat weitere Auswirkungen. Letztlich sind es diese Auswirkungen, welche wirklich von Interesse sind. Die vorgenommene Gliederung erlaubt aber eine starke Systematisierung der Materie, welche bei einer Gliederung nach Endauswirkungen so nicht möglich wäre. Die Auswirkungen werden in der jeweiligen Relevanz des Themas und zum Teil auch bei der Erarbeitung des Nachhaltigkeitsbeurteilungsmodells (Kapitel 6) besprochen.

4.1 Verkehrsverhalten

4.1.1 Relevanz des Themas

Der Motorisierte Individualverkehr (MIV) steht gemäss Ewing und Cervero (2010) in einem Zusammenhang zu einigen der bedeutendsten Problemen unserer Zeit wie Zersiedelung, Verkehrsstaus, Abhängigkeit von Erdöl und Klimawandel. Das Potenzial, die Verkehrsnachfrage durch die gebaute Umwelt zu beeinflussen (d.h. i.d.R. abzuschwächen), sei deshalb das bei weitem meist erforschte Thema der Stadtplanung.

Eine nachhaltige Entwicklung von Städten ohne die Berücksichtigung des Verkehrs ist schwer vorstellbar. Kenworthy (2006) sieht in der Verbindung zwischen Verkehr und urbaner Form gar das Kernelement zur Entwicklung einer ökologischen Stadt. Diese stellt er sich kompakt vor und mit gemischten Flächennutzungen, dichten und gut definierten Zentren, Priorität für ÖV und Langsamverkehr (LV) bei nur minimalem Wachstum des Strassennetzes sowie Schutz der natürlichen Flächen und des Kulturlandes (v.a. durch die erwähnte Kompaktheit). Ohne eine Bearbeitung dieser Themen seien nur marginale Schritte in Richtung einer nachhaltigen Stadt möglich.

Newman und Kenworthy (1996) sehen als wichtigste Voraussetzung für eine nachhaltige Entwicklung von Städten die Überwindung oder Zumindest eine Reduktion der Abhängigkeit vom Automobil. Diese resultiere aus der Bereitstellung der Verkehrsinfrastruktur für die exponentiell wachsende Nachfrage nach motorisiertem Individualverkehr, aus diesem Verkehr selbst sowie aus der Ausrichtung der Stadtentwicklung auf das Automobil, und führe zu hohen Kosten.

Die Kosten eines auf das Automobil fokussierten Transportes in Städten sind in erster und direktester Linie ökologisch. Allerdings existieren laut Næss (2006) erhebliche Auswirkungen

auf die Wohlfahrt, selbst wenn die negativen ökologischen Folgen des Verkehrs auf irgendeine Weise unterbunden werden könnten. Insbesondere führe eine Struktur, die zu einer hohen Abhängigkeit von individueller Mobilität führt, zu einer Verstärkung sozialer Ungleichheit.

Zahlreiche Studien haben laut Day, Boarnet, Alfonzo und Forsyth (2006) die Förderung eines aktiven Lebensstil – in diesem Zusammenhang insbesondere die Nutzung des Langsamverkehrs – als potenzielle Strategie zur Erhöhung der physischen Aktivität identifiziert. Es gebe einen belegten negativen Zusammenhang zwischen dem täglichen Energieumsatz des Körpers und der Sterblichkeit; körperliche Aktivität im Rahmen der Nutzung des Langsamverkehrs könne folglich zu gesundheitlichen Gewinnen führen. Entsprechend wird der Planung eine grosse Bedeutung für die öffentliche Gesundheit beigemessen, denn wenn jene den Langsamverkehr fördert, wird diese verbessert. Zum Zusammenhang zwischen physischer Aktivität und Gesundheit äussern sich unter anderem Washburn, Adams und Haile (1987), Oja, Ilkka und Olavi (1998), Frank und Engelke (2001), Frank und Engelke (2005), Noda, Iso, Toyoshima, Date, Yamamoto, Kikuchi, Koizumi, Kondo, Watanabe, Wada, Inaba, Tamakoshi und JACC Study Group (2005) und Janiszewski und Ross (2009).

Ein auf das Automobil fokussierter Transport in Städten und die Bereitstellung der entsprechenden Infrastruktur haben also viele nachhaltigkeitsrelevante Auswirkungen. Diese sollen hier basierend auf den qualitativen Übersichten von Næss (2006) und Newman und Kenworthy (1996) summarisch und unterteilt nach den drei Aspekten der Nachhaltigkeit aufgezeigt werden:

- Ökologische Auswirkungen
 - Energieverbrauch
 - Ausstoss von Treibhausgasen
 - Lokale Luftverschmutzung
 - Lärm
 - Trennung von Lebensräumen durch Verkehrsachsen
 - Versiegelung von natürlichen Flächen und Kulturland
 - Stärkere Verschmutzung von und stärkere Überschwemmungen durch Regenwasser (aufgrund der Versiegelung)
- Ökonomische Auswirkungen
 - Externe Kosten durch Unfälle, Verschmutzung, Gesundheitsschäden
 - Staukosten
 - Tiefere Produktivität aufgrund geringerer Arbeitsmarktgrösse bei geringeren Reisedistanzen pro Zeiteinheit aufgrund der durch die Infrastruktur geförderten flächigen Entwicklungen und der entstehenden Verkehrsüberlastung; dies gilt aller-

dings nur für gewisse Fälle, da die Infrastruktur die Reisezeiten verkürzen und so den Arbeitsmarkt vergrössern kann.

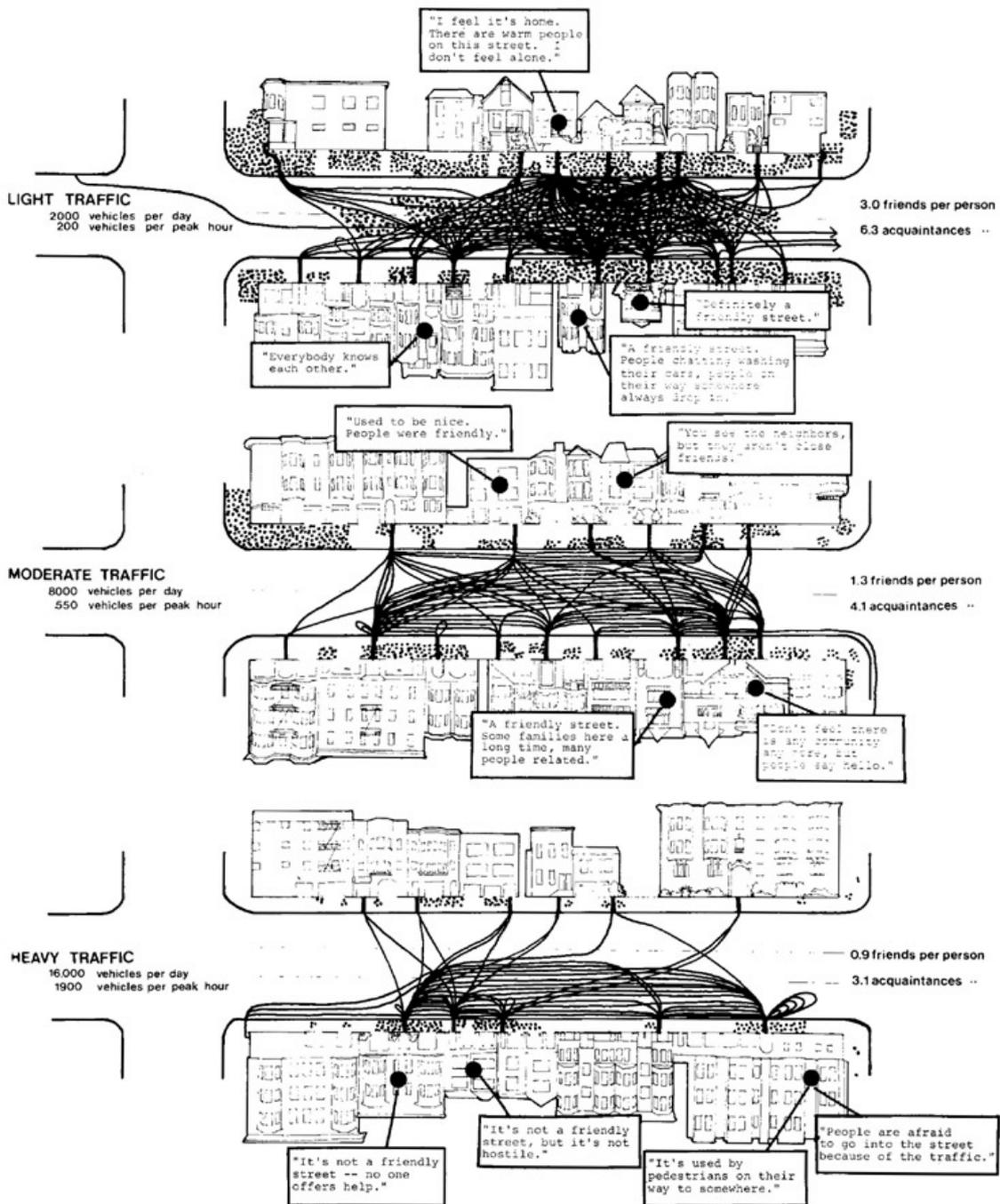
- Zeitverluste aufgrund der grösseren Distanzen der durch die Infrastruktur geförderten flächigen Entwicklungen; auch dies gilt nur in gewissen Fällen, da wie erwähnt die Geschwindigkeiten durch Infrastrukturausbauten zunehmen können.
- Opportunitätskosten der Versiegelung (geringere Produktion von Agrarprodukten)
- Abhängigkeit von Ölimporten
- Höhere Infrastrukturkosten (Wasser, Abwasser, Strassen) aufgrund der durch die Infrastruktur geförderten flächigen Entwicklungen
- Soziale Auswirkungen
 - Gesundheitsschäden durch Lärm und Luftverschmutzung
 - Verkehrsunfälle
 - Abnahme der physischen Aktivität (Nutzung des LV) und dadurch Zunahme der Mortalität
 - Verlust von wertvollen Gebäuden und Erholungsräumen aufgrund des Strassenbaus
 - Trennung von Gemeinschaften durch Verkehrsachsen
 - Ersatz von öffentlich zugänglichem Raum durch parkierte Autos
 - Verlust des Strassenlebens und Abwertung des öffentlichen Raums
 - Verlust von lokaler Gemeinschaft
 - Verlust öffentlicher Sicherheit
 - Isolation in entfernten Vororten aufgrund der durch die Infrastruktur geförderten flächigen Entwicklungen
 - Kein Zugang zu Mobilität für gewisse Bevölkerungskreise

Rogers und Gumuchdjan (1997) zeigen weitere negative Auswirkungen des Automobilverkehrs. Der Platzverbrauch für die Parkierung von Automobilen ist immens gross, und die parkierten Fahrzeuge beanspruchen einen grossen Teil des öffentlichen Raums, der wichtige soziale Funktionen hat. Zudem verweisen sie auf eine Studie von Appleyard, Gerson und Lintell (1981), die den Effekt des Verkehrs auf das Gemeinschaftsgefühl in verschiedenen Nachbarschaften in San Francisco untersuchten. Je mehr Verkehr gemessen wurde, desto weniger Freunde hatten die Bewohner in der Nachbarschaft und desto seltener waren spontane gegenseitige Besuche zwischen Nachbarn (siehe Abbildung 4). Die Autoren sehen im Verkehr deshalb den Hauptgrund für die zunehmende Entfremdung von Stadtbewohnern von ihrer Umgebung.

Inwieweit diese in den siebziger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts gemachten Beobachtungen heute noch Gültigkeit haben, ist unklar. Moderne Kommunikationsmittel und soziale

Medien ermöglichen es heute, soziale Kontakte auf andere Art und Weise zu pflegen als damals.

Abbildung 4 Auswirkungen des Verkehrsaufkommens in Quartierstrassen in San Francisco auf das Gemeinschaftsgefühl



Quelle: Appleyard et al. (1981, 21)

Die gezeigten Auswirkungen des MIV sind allesamt negativ, sie repräsentieren dessen Kosten in verschiedenen Bereichen; es ist wichtig, den Nutzen des Verkehrs dabei nicht zu vergessen. Infrastrukturen führen zu höheren Geschwindigkeiten, wodurch der Aktivitätenraum und auch der Arbeitsmarkt grösser werden, was letztlich zu einer höheren Produktivität führt. Der Verkehr hat auch einen wichtigen sozialen Nutzen, indem er es den Menschen ermöglicht, sich zu treffen und auszutauschen. Einen Einblick in die Ermittlung des Nutzens des Verkehrs gibt die Schweizer Norm zu Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr (VSS, 2006b).

In dieser Arbeit stehen allerdings die negativen Folgen des MIV im Zentrum des Interesses. Der Nutzen des Verkehrs kann auch durch andere Verkehrsmittel generiert werden, die geringere negative Auswirkungen respektive Kosten verursachen, konkret durch den ÖV und den LV. Keineswegs soll hier aber die Haltung vertreten werden, dass Verkehr an sich ausschliesslich negative Auswirkungen hat und entsprechend nur Kosten verursacht. Untersucht wird, was über den Einfluss der gebauten Umwelt auf das Verkehrsverhalten bekannt ist.

Tabelle 1 zeigt den Energieverbrauch sowie die Treibhausgasemissionen pro Fahrzeug- und pro Personenkilometer für verschiedene Verkehrsmittel. Der Personenwagen hat deutlich den höchsten spezifischen Energieverbrauch. Dies veranschaulicht die Bedeutung des MIV betreffend Umweltauswirkungen im Vergleich mit anderen Verkehrsträgern, ist die Energie doch ein geeignetes Mass zur pauschalen Erfassung vieler Umweltauswirkungen (u.a. Treibhauseffekt, Luftverschmutzung, erhöhtes Abfallaufkommen, Rohstoffverbrauch) (SIA, 2004; Lenzen, Wood und Foran, 2008).

Tabelle 1 Primärenergiefaktoren und Treibhausgas-Emissionskoeffizienten für verschiedene Verkehrsmittel (Basisjahr 2008)

	PW	Fernreise- zug	Regional- zug	Linienbus	Tram	Flugzeug
Ø Besetzungsgrad	1.6	392	46	14	53	279
PEF [MJ / Fzkm]	5.22	92.7	23.8	23.1	52.8	528.0
Betrieb	3.84	41.6	10.2	19.3	38.4	475.0
Graue Energie	1.37	51.1	13.6	3.8	14.4	52.0
PEF [MJ / Pkm]	3.28	0.24	0.53	1.65	0.98	1.88
Betrieb	2.40	0.11	0.23	1.38	0.72	1.70
Graue Energie	0.88	0.13	0.30	0.27	0.26	0.18
THGEK [kg / Fzkm]	0.31	3.21	0.70	1.45	1.32	34.10
Betrieb	0.26	0.68	0.17	1.32	0.56	32.20
Graue Energie	0.05	2.53	0.53	0.13	0.76	1.90
THGEK [kg / Pkm]	0.195	0.008	0.015	0.103	0.025	0.122
Betrieb	0.163	0.002	0.004	0.094	0.011	0.115
Graue Energie	0.032	0.006	0.011	0.009	0.014	0.007

PEF: Primärenergiefaktor (nicht erneuerbar)

THGEK: Treibhausgas-Emissionskoeffizient

Betrieb: Anteil des Betriebs des Fahrzeugs

Graue Energie: Anteil der grauen Energie in Fahrzeug und Verkehrsinfrastruktur

Quelle: SIA (2011a, 27), basierend auf Frischknecht und Stucki (2009)

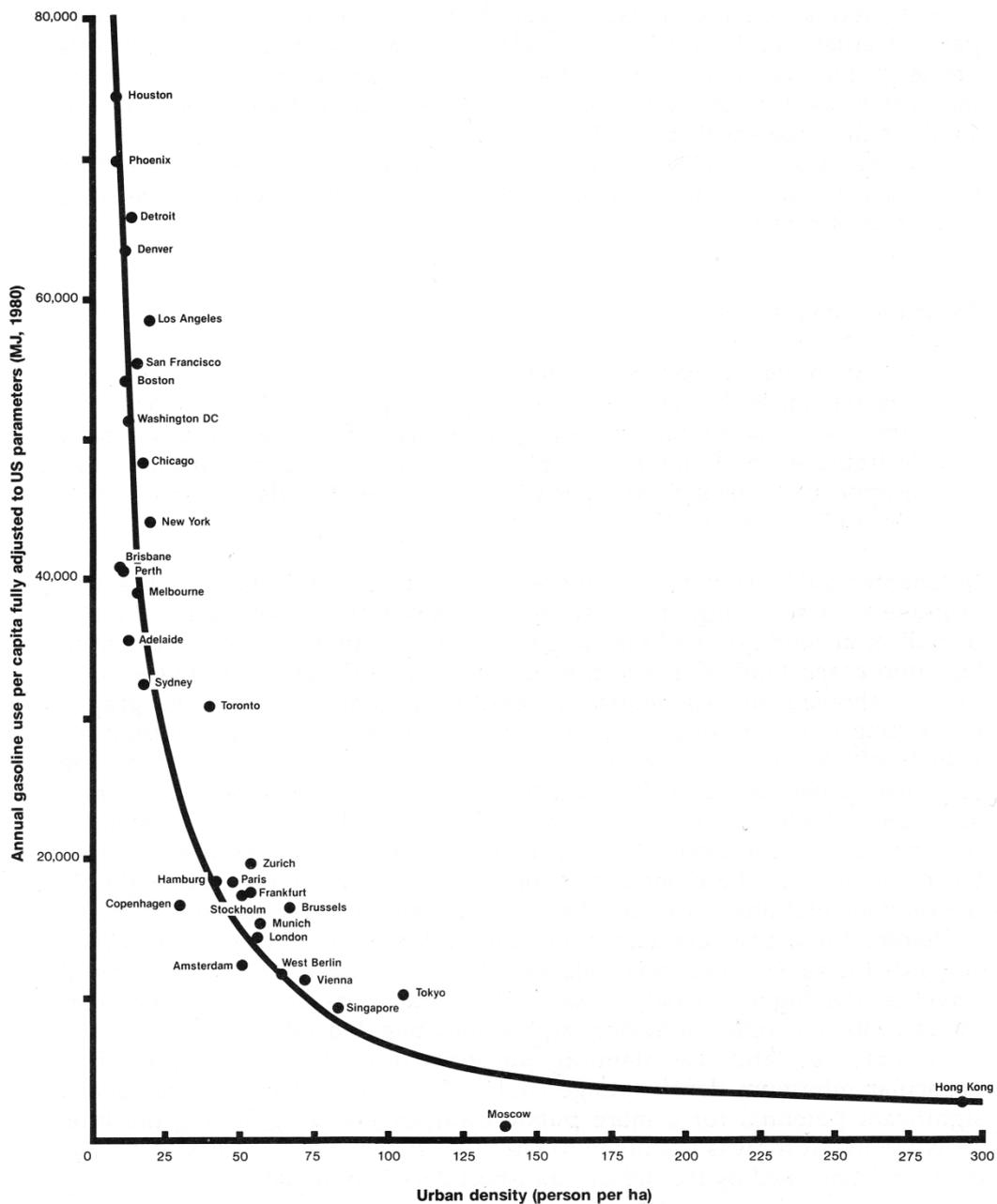
4.1.2 Stand des Wissens

Grundsätzliche Gegensätze

Næss (2006) zeigt zwei Antipoden in der Diskussion über den Zusammenhang zwischen städtischer Form und Verkehrsverhalten auf: *Compact City / New Urbanism* vs. *Low Density / Decentralized Urban Form / Green City*. Vertreter letzterer Ansätze würden bezweifeln, dass ein Zusammenhang zwischen Dichte und Verkehr bestehe, während die Advokaten der kompakten Stadt diesen Zusammenhang als eines der Hauptargumente für deren Vorzüge anführten.

Diese Diskussion wird bis heute intensiv geführt und begann spätestens mit dem Erscheinen des Buches *Cities and Automobile Dependence: An International Sourcebook* (Newman und Kenworthy, 1989), welches die wohl berühmteste Grafik zum Thema enthält (siehe Abbildung 5).

Abbildung 5 Zusammenhang zwischen Benzinverbrauch pro Einwohner und urbaner Dichte, angepasst an US Einkommen, Fahrzeugeffizienz und Benzinpreise



Quelle: Newman und Kenworthy (1989, 128)

Rickwood, Glazebrook und Searle (2008) versuchen, die seit dem Erscheinen des Buches von Newman und Kenworthy (1989) publizierte Literatur zum Zusammenhang zwischen städtischer Form (insb. Dichte) und Energieverbrauch zu ordnen, Forschungslücken aufzuzeigen und wo möglich eindeutige Schlüsse zu ziehen. Sie fokussieren dabei auf zwei Bereiche: Gebäudepark (dieses Thema wird in Kapitel 4.5 behandelt) und Verkehr; zudem reduzieren sie die Beschreibung der gebauten Umwelt auf das Element der Dichte.

Die in der Literatur mehr oder weniger unbestrittenen kausalen Zusammenhänge im Bereich des Verkehrs lassen sich laut Rickwood et al. (2008) wie folgt zusammenfassen (diese Zusammenhänge wurden in keiner der berücksichtigten Studien bestritten, vielfach aber auch nicht explizit bestätigt, da sie nicht immer thematisiert wurden):

- Die Bereitstellung von Strassen führt zu mehr gefahrenen Kilometern (vehicle kilometres travelled, VKT)
- Ein grösseres ÖV-Angebot führt zu höheren Fahrgastzahlen
- Ein höheres Einkommen führt zu einem höheren Motorfahrzeugbesitz
- Ein höheres Einkommen führt zu einem höheren Benzinverbrauch
- Geringere Reisezeiten im ÖV führen zu mehr Kunden
- Höhere Benzinkosten führen zu weniger VKT
- Höhere Dichte führt zu einer geringeren Effizienz des MIV
- Eine höhere Dichte erhöht die Effizienz des ÖV (ab einem gewissen Grenzwert, der ca. 30 Pers. / ha beträgt), d.h. ermöglicht erst ein sinnvolles Angebot
- Der ÖV ist generell und fast immer energieeffizienter als der MIV (ausser in extremen Beispielen)

Keine Einigkeit bestehe hingegen über folgende Zusammenhänge (Rickwood et al., 2008):

- Höhere Dichte führt zu weniger VKT
- Ein grösseres ÖV-Angebot führt zu weniger VKT
- Ein grösseres ÖV-Angebot führt zu einem geringeren Fahrzeugbesitz
- Höhere Dichte führt zu einer höheren Nachfrage beim ÖV (sofern ein Angebot vorhanden ist)
- Eine höhere Nachfrage beim ÖV führt zu höheren Dichten
- Eine höhere Dichte reduziert den Energieverbrauch des Verkehrs (ab ca. 30 Pers. / ha wirksam, ab ca. 70 Pers. / ha nur noch marginal)

Dabei gibt es einerseits Studien, deren Ergebnisse diese von der Bewegung des *New Urbanism* propagierten und seit Newman und Kenworthy (1989) relativ breit gestützten Zusam-

menhänge als These explizit verwerfen, andererseits viele Hinweise auf methodische Schwächen der die Zusammenhänge stützenden Studien, d.h. deren Aussagekraft wird angezweifelt.

Zudem ist unbestritten, dass beim Themenkomplex Stadt und Verkehrsverhalten sehr viele Faktoren eine Rolle spielen und zahlreiche Wechselwirkungen und Rückkoppelungen zu beachten sind. Die Identifikation eindeutiger und isolierter kausaler Zusammenhänge dürfte daher kaum je abschliessend möglich sein. Alle Studien verwenden statistische Verfahren, die letztlich mit Unsicherheiten behaftet sind.

Holz-Rau (2012) merkt an, dass die meisten Studien zum Einfluss der gebauten Umwelt und / oder Raumstruktur auf das Verkehrsverhalten sich auf den Alltagsverkehr beziehen und den privaten und geschäftlichen Fernverkehr vernachlässigen. Dieser habe aber aufgrund der Länge der Fahrten trotz derer geringer Anzahl einen hohen Anteil am Gesamtverkehrsaufkommen und sei daher bedeutsam. Die räumliche Differenzierung der im Fernverkehr zurückgelegten Distanzen sei bisher kaum bekannt. Es gebe aber Anhaltspunkte: die höhere Dichte in Städten und die damit verbundenen Probleme könnten zu langen Wegen im Freizeitverkehr führen. Zudem sieht er aufgrund der Lebensstile und den „ökonomischen und sozialen Verflechtungen hoch gebildeter und hochmobiler urbaner Bevölkerungsgruppen“ die Möglichkeit, dass „großräumliche, interurbane Beziehungen“ entstehen, die mit einem hohen Fernverkehrsaufkommen verbunden sind.

Holz-Rau (2012) stellt die These auf, dass sich bei den zurückgelegten Distanzen im Fernverkehr räumlich gegenläufige Effekte zum Alltagsverkehr zeigen. Er stützt diese These durch einen Vergleich der zurückgelegten Distanzen im Alltagsverkehr und im Fernverkehr nach sozialen und räumlichen Merkmalen auf Basis der Untersuchung „Mobilität in Deutschland“ (MiD) 2008. Holz-Rau (2012) sieht in den Ergebnissen einen Grund, den „Ansatz der Verkehrsvermeidung durch raumstrukturelle Konzepte“ zu hinterfragen.

Zum Zeitpunkt der Niederschrift ist lediglich das Abstract von Holz-Rau (2012) verfügbar, welches eine Plausibilitätsprüfung und ein Abschätzen des Ausmasses der beobachteten Wirkung nicht erlaubt. Eine weitere Untersuchung dieser Thematik, z.B. auch anhand des Mikrozensus 2010 der Schweiz, wäre sicher wünschenswert.

Unabhängig von dieser Diskussion sagt ein allfälliger existierender Zusammenhang zwischen gebauter Umwelt und Verkehrsverhalten alleine noch nichts darüber aus, ob sich durch eine Veränderung der gebauten Umwelt effektiv das Verkehrsverhalten beeinflussen liesse oder wie aufwändig respektive teuer eine entsprechende Aktivierung von Elastizitäten wäre.

Beispielsweise haben Weis und Axhausen (2009) anhand einer Analyse des schweizerischen Mikrozensus seit 1974 relativ hohe Elastizitäten der gefahrenen Distanz für die Erreichbarkeit gefunden (0.89 – 1.14). Gleichzeitig sind aber die zur Erhöhung der Erreichbarkeit notwendigen Investitionen immens hoch. Weis und Axhausen (2009) ermittelten, dass der Medianwert der Erreichbarkeit aller Schweizer Gemeinden im Zeitraum 1970 – 2005 um 3.7 % zugenommen hat – wofür Investitionen von etwa 29 Milliarden CHF eingesetzt wurden. Trotz der sehr hohen Elastizität sind also die Kosten zur Aktivierung dieser Elastizität ebenfalls sehr hoch.

Letztlich wären zur Beurteilung der Relevanz eines ermittelten Zusammenhangs zwischen gebauter Umwelt und Verkehrsverhalten also auch die Kosten der Aktivierung der entsprechenden Elastizität zu ermitteln. Dies würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen, sollte aber in Zukunft näher untersucht werden.

Einblick in die Ergebnisse einiger Studien zum Thema

Verkehrsverhalten Allgemein

Die Zahl der Forschungsarbeiten zum Verhältnis gebaute Umwelt – Verkehr ist wie erwähnt sehr gross. Ewing und Cervero (2010) haben über 200 Einzelstudien, 12 Übersichtsaufsätze und 2 Übersichten über die verschiedenen Übersichtsaufsätze zu diesem Thema gefunden. Die Studien variieren sehr stark was Methoden, Messgrössen für die gebaute Umwelt, abhängige Variablen, untersuchte Verkehrszwecke, Kontrollvariablen, Massstab, Datengrundlage und Berücksichtigung von Selbstselektion (siehe Kapitel 4.1.4) angeht. Zudem untersuchen alle feinmassstäblichen Studien zwangsläufig ein geografisch eng begrenztes Gebiet, dessen Charakteristika das Resultat jeweils entscheidend beeinflussen dürften. Im Folgenden soll ein Einblick in die Ergebnisse einiger Studien zum Thema gegeben werden, mit Fokus auf Erklärungen der Zusammenhänge und qualitative Beschreibung der Ergebnisse. Danach wird eine Systematisierung quantitativer Resultate basierend auf Ewing und Cervero (2010) vorgestellt.

Newman und Kenworthy (1996) liefern einen Überblick über die verschiedenen Phasen der Stadtentwicklung insbesondere seit 1850 mit Fokus auf die Verbindung zwischen Flächennutzung und Verkehrssystemen. Sie stellen die These auf, dass diese uralte Verbindung mit der Verbreitung des Automobils aufgelöst wurde, da nun alle denkbaren Verbindungen problemlos möglich wurden. So sind es auch die Folgen der von ihnen als moderne Phase („modernist phase“) der Verkehrsplanung bezeichneten Periode, welche die Autoren interessieren. Sie identifizieren basierend auf ihren früheren Analysen (Newman und Kenworthy, 1989) und auf den Untersuchungen von Cervero (1996) zwei Haupteinflussgrössen auf den Anteil des öffentlichen Verkehrs und des Langsamverkehrs am Modal Split:

- Dichte
Eine höhere Dichte führe zu einem höheren Anteil des ÖV und LV am Modal Split (sofern entsprechende Angebote vorhanden sind) und vereinfache (z.B. ökonomisch) die Einführung entsprechender Angebote.
- Mischnutzungen
Als Ergänzung zu einer hohen Dichte förderten Mischnutzungen den Fussverkehr.

Der Einfluss dieser beiden Grössen wurde dabei nicht quantitativ bestimmt.

Cervero und Kockelman (1997) untersuchen die Auswirkungen der gebauten Umwelt auf die Verkehrsnachfrage, genauer auf die Anzahl Wege pro Einwohner und auf die Verkehrsmittelwahl, v.a. für nicht arbeitsbezogene Fahrten. Die gebaute Umwelt wird dabei durch die sogenannten *3 Ds* beschrieben:

- Dichte („Density“)
- Diversität („Diversity“) (der Flächennutzung)
- Design (fussgängerorientiert)

Dabei wird folgende These überprüft: Höhere Werte bei jedem der drei Bereiche für sich und aller Bereiche zusammen führen zu weniger Wegen pro Fahrzeug, zu einem höheren Anteil nicht-persönlicher Fahrzeuge (i.d.R. ÖV) am Modal Split sowie zu einem höheren Besetzungsgrad der mit dem MIV zurückgelegten Wege. Letztlich geht es also darum, herauszufinden, ob auch die Ausgestaltung der Ausgangs- und Endpunkte von Reisen, und nicht nur die Reise selbst, einen Einfluss auf das Verkehrsverhalten hat.

Die Untersuchungen basieren auf Daten zur San Francisco Bay Area, wobei insgesamt 50 Nachbarschaften untersucht wurden. Für jeden der drei Bereiche Dichte, Diversität und Design wurden mehrere Variablen verwendet. Diese sind in Abbildung 6 wiedergegeben.

Abbildung 6 Erklärende Variablen (gebaute Umwelt) aus Cervero und Kockelman (1997)

1. Density

- Population density: population per developed acre
- Employment density: employment per developed acre
- Accessibility to jobs: expressed in a gravity model form; for zone i , Accessibility Index = $\{\sum_j (\text{jobs})_j \exp[\lambda t_{ij}]\}$, where i = origin (residential) traffic analysis zone, j = destination traffic analysis zone, t_{ij} = travel time between zones i and j , and λ = empirically derived impedance coefficient. The accessibility index serves as a proxy of relative proximity and compactness of land uses

2. Diversity

- Dissimilarity index: proportion of dissimilar land uses among hectare grid cells within a tract. For each tract, computed as: $\{[\sum_j \sum_k (X_{jk}/8)]/K\}$, where K = number of actively developed hectare grid-cells in tract, and X_{jk} = 1 if land-use category of neighboring (i.e. abutting or caddy-corner) hectare grid-cell differs from hectare grid-cell j (0 otherwise). (See Fig. 2)
- Entropy: mean entropy for land-use categories among hectare grid cells within a half mile radius of each hectare grid cell within a tract. For each tract, computed as: $\{\sum_k [\sum_j P_{jk} \ln(p_{jk})]/\ln(J)\}/K$, where: p_{jk} = proportion of land-use category j within a half-mile radius of the developed area surrounding hectare grid-cell k ; j = number of land-use categories; and K = number of actively developed hectares in tract. The mean entropy ranges between 0 (homogeneity, wherein all land uses are of a single type) and 1 (heterogeneity, wherein developed area is evenly distributed among all land use categories)
- Vertical mixture: proportion of commercial/retail parcels with more than one land-use category on the site
- Per developed acre intensities of land uses classified as: residential; commercial; office; industrial; institutional; parks and recreation
- Activity center mixture: (1) entropy of commercial land-use categories computed across all activity centers within a zone; (2) proportion of activity centers with more than one category of commercial-retail uses; (3) proportion of activity centers with stores classified as: convenience; auto-oriented; entertainment/recreational; offices; institutional; supermarkets; service-oriented
- Commercial intensities, measured as per developed acre rates of: convenience stores; retail services; supermarkets; eateries; entertainment and recreational uses; auto-oriented services; mixed parcels
- Proximities to commercial-retail uses: (1) proportion of developed acres within 1/4 mile of: convenience store; retail-service use; (2) proportion of residential acres within 1/4 mile of: convenience store; retail-service use

3. Design

- Streets: (1) predominant pattern (e.g. regular grid, curvilinear grid); (2) proportion of intersections that are: four-way (proxy of grid pattern); (3) per developed acre rates of: freeway miles within or abutting tract; number of freeway under-and over-passes; number of blocks (proxy for the grain of road net); number of dead ends and cul-de-sacs; (4) averages of: arterial speed limits; street widths
- Pedestrian and cycling provisions: (1) proportion of blocks with: sidewalks; planting strips; street trees; overhead street lights; quadrilateral (i.e. rectangular or square) shape; bicycle lanes; mid-block crossings; (2) proportion of intersections with: signalized controls; (3) averages of: block length; sidewalk width; distance between overhead street lights; slope; pedestrian green lights at signalized intersections; (4) bicycle lanes per developed acre
- Site design: proportion of commercial-retail and service parcels with: off-street parking; off-street parking between the store and curb; on-street front or side parking; on-site drive-ins or drive-throughs

Quelle: Cervero und Kockelman (1997, 206)

Zudem wurden die üblichen Variablen mit Einfluss auf die Verkehrsnachfrage (Soziodemographie, Haushalte, Verkehrsangebot, Distanzen) verwendet. Durch Faktoranalyse wurden zudem zwei Faktoren ermittelt, die 66% der Variation der insgesamt 12 Variablen erklären konnten: *Intensity Factor* (beinhaltet: *Retail store density*, *Activity center density*, *Retail intensity*, *Walking accessibility*, *Park intensity* und *Population density*) und *Walking quality factor* (beinhaltet: *Sidewalk provisions*, *Street light provisions*, *Block length*, *Planted strips*, *Lighting distance*, *Flat terrain*). Die statistisch relevanten Ergebnisse sind in Tabelle 2 als Elastizitäten zusammengefasst.

Tabelle 2 Elastizitäten zwischen Messgrössen der gebauten Umwelt und der Verkehrsnachfrage aus Cervero und Kockelman (1997)

Built environment	Travel demand					
	Person vehicle miles traveled per household for*		Probability of travel by			
	All trips	Non-work	Non-SOV for:†		Non-personal vehicle for:†	
Non-work trips			Non-work	Pers. bus.	Work	
<i>Density</i> ‡	—	—	—	—	—	—
Intensity factor§	—	-0.063¶	0.098	0.084	0.113	—
Accessibility index	-0.274	—	—	—	—	—
<i>Diversity</i> ‡	—	—	—	—	—	—
Land use mixing	—	—	0.111	—	—	—
Vertical mixing	—	-0.141	—	—	—	—
Population within 1/4mile of store	—	—	—	—	—	0.365
<i>Design</i> ‡	—	—	—	—	—	—
Walking quality factor§	—	—	0.085	0.183	0.174	0.119
Four-way intersections	—	-0.592	0.501	—	—	—
Quadrilaterals	0.185	0.463	—	—	—	—
Sidewalk width	—	—	—	0.087	—	—
Front and side parking	—	—	-0.505	-0.121	—	—

*Elasticities computed as: $\beta (x/y)$, where: β = estimated coefficient; x = mean of explanatory (built environment) variable; y = mean of dependent (travel demand) variable.

†Elasticities computed as: $\beta(x)(1-\pi)$, where: β = estimated coefficient; x = mean of explanatory (built environment) variable; π = mean estimated probability.

‡See Tables 3 and 8–13 for definitions of variables, and Table 7 for definition of factors.

§Since factor scores are standardized, with means equal to zero, mid-point (i.e. mean-value) elasticities cannot be calculated. Instead, the elasticities for factors were estimated as the proportion point change in probability estimates for the dependent (travel demand) variables given a 1 standard deviation increase in a factor score, setting all other explanatory variables in the models at their mean (or for nominal variables, modal) values, as shown in footnotes (pp. 214 and 216) of this article.

¶For the reason explained in note § above, the elasticity of personal vehicle miles traveled per household as a function of the intensity factor was calculated for values of the dependent variable and intensity factor one standard deviation above the mean (i.e. $y = 50.4$, $x = 1$).

Quelle: Cervero und Kockelman (1997, 218)

Die Untersuchungen von Cervero und Kockelman (1997) stützen zwar deren These, relativieren allerdings auch das Ausmass des Einflusses der 3 *Ds* auf das Verkehrsverhalten. Der *Intensity factor* hatte einen sehr kleinen Einfluss; ähnlich sieht es bei der Diversität aus, auch wenn hier der Einfluss – wo vorhanden – etwas grösser war. Interessant ist, dass das Vorhandensein von Einkaufsmöglichkeiten in Wohnungsnähe einen erheblichen Einfluss auf die Verkehrsmittelwahl hatte (nur statistisch relevant für Pendlerfahrten). Einzelne Designvariablen hatten einen Einfluss auf nicht arbeitsbezogene Trips, insb. der Anteil vierarmiger Kreuzungen (gegenteilige Wirkungen hatten die viereckigen Blocks, deren Einfluss allerdings geringer ist) und die Abwesenheit von Parkplätzen vor und neben Einkaufsmöglichkeiten.

Laut Bento, Cropper, Mobarak und Vinha (2005) sagt die Stadtökonomie voraus, dass die *Vehicle Miles Traveled* (VMT), die ein Haushalt zurücklegt, und die Verkehrsmittelwahl generell von der Struktur der betreffenden Stadt abhängen. Mit Struktur sind dabei die Verteilung der Bevölkerung und der Arbeitsplätze, die Grösse der Stadt, das Verkehrsnetz und das Verkehrsangebot gemeint. Ausgehend von einem monozentrischen Stadtmodell stellen sie entsprechend die These auf, dass die VMT und die Verkehrsmittelwahl beim Pendeln von drei grundlegenden Aspekten der städtischen Form abhängen:

- Strassennetz (*City shape, Road density*)
- Muster der Wohn-Flächennutzung (*Population centrality, Population density*)
- Verteilung der Arbeitsplätze (*Jobs-housing balance*), welche auch als indirekte Messgrösse für die Verteilung von Dienstleistungen dient

Dazu wurden neben soziodemographischen und geographischen Kontrollvariablen auch Variablen für das ÖV-Angebot verwendet.

Die von Bento et al. (2005) gefundenen Zusammenhänge lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Eine hohe Strassendichte führt zu einem hohen Fahrzeugbesitz und zu einem hohen Modal Split des MIV.
- Ein grösseres ÖV-Angebot verkleinert die Wahrscheinlichkeit des Pendelns mit dem Auto.
- Eine höhere Bevölkerungszentralität und eine stärkere Verteilung der Arbeitsplätze führen zu kürzeren Strecken.

Bento et al. (2005) kommen zum Schluss, dass kleine Veränderungen einzelner Messgrössen zur städtischen Form und zum ÖV-Angebot nur kleine, aber statistisch signifikante Auswirkungen auf die Verkehrsnachfrage haben. Werden allerdings die verschiedenen Werte gleichzeitig verändert, sind die Auswirkungen gross.

Sowohl höhere Dichten als auch stärkere Zentralisierung unterstützen laut Kenworthy (2006) Anstrengungen, einen höheren Anteil am Modal Split des ÖV zu erreichen. Zentralisierte Städte hätten in der Tendenz weniger zentrale Parkierungsmöglichkeiten und bessere Bahnsysteme und wiesen eine stärkere Nutzung des ÖV für radiale Fahrten auf. Höhere Dichte wiederum gehe häufig einher mit stärkerer Mischung von Flächennutzungen und dadurch kürzeren Wegen, weshalb dichtere Städte in der Tendenz eine höhere Nutzung des LV aufwiesen. Kenworthy (2006) beobachtet zudem, dass die Zahl der Einwohner des Zentrums einer Stadt umgekehrt proportional zur Anzahl Parkplätze im selben Gebiet zu sein scheint. Er erklärt dies mit dem hohen Flächenverbrauch von Parkplätzen.

Die Analyse der Literatur zum Zusammenhang zwischen Dichte und Energieverbrauch des Verkehrs führt Rickwood et al. (2008) zur Aussage, dass ein solcher Zusammenhang zweifellos in vielen verschiedenen Kontexten nachgewiesen wurde, die Kausalität des Zusammenhangs aber äusserst schwierig zu beweisen ist, da sehr viele weitere mögliche Einflussfaktoren zu berücksichtigen sind. Die Mehrheit der Kritik am Werk von Newman und Kenworthy (1989) sei aber nicht genügend fundiert, da Feedback-Loops zwischen Flächennutzung und Verkehrssystem nicht berücksichtigt, sondern lediglich ein marginaler Effekte erhöhter Dichte in linearen Modellen gesucht würde – und dies zudem häufig in amerikanischen Städten mit extrem tiefer Dichte, so dass leicht erhöhte Dichten tatsächlich kaum Effekte zeigen dürfte (siehe unten).

Rickwood et al. (2008) sehen es mittlerweile erwiesen an, dass eine Messgrösse der Bevölkerungs- oder Aktivitätendichte eine gute Wirkungsvariable („predictor“) für geringeren Auto- und geringere Autonutzung ist, auch wenn der Einfluss anderer Faktoren berücksichtigt wird. Zudem bestätigen sie die These von Newman und Kenworthy (1989), dass die Effekte einer hohen Dichte auf den Energieverbrauch des Verkehrs in Städten erst ab einem Dichteschwellenwert von etwa 30 Pers. / ha ihre Wirkung entfalten. In amerikanischen Städten, die diesen Wert erreichen oder überschreiten, konnten denn auch in diversen Untersuchungen entsprechende Effekte nachgewiesen werden; in Städten mit kleineren Dichten waren die Effekte nicht nachweisbar. Die Begründung für einen solchen Schwellenwert liegt darin begründet, dass darunter ein effizienter Betrieb des ÖV gar nicht möglich ist und deshalb auch eine marginale Veränderung der Dichte kaum einen Effekt haben dürfte. Ab einer Dichte von etwa 70 Pers. / ha wiederum wird die Wirkung durch eine weitere Erhöhung der Dichte sehr klein.

Laut Weisz und Steinberger (2010) ist seit langem (spätestens seit Newman und Kenworthy (1989)) bekannt, dass die urbane Form und im speziellen die Bevölkerungsdichte einen entscheidenden Einfluss auf den Energiebedarf für die Mobilität hat. Auch neuere Studien bestätigten die Korrelation zwischen hoher Bevölkerungsdichte und geringem Transportenergieverbrauch. Allerdings bestehe nach wie vor Uneinigkeit über die kausalen Zusammenhänge. Die Abhängigkeit einer Stadt vom Automobil zu verringern sei eine wichtige Möglichkeit, um die gesamten Energie- und Materialflüsse von Städten zu verringern. Allerdings deute die Literatur darauf hin, dass nicht alleine die Dichte entscheidend sei, sondern verschiedene planerische Instrumente zusammenspielen müssen; insbesondere seien Anreize wie ein gutes ÖV-Angebot und Abschreckungen von der Nutzung des MIV wichtig.

Su (2011) findet eine negative Elastizität des Benzinverbrauchs von Haushalten für die Einwohnerdichte, allerdings ist diese sehr klein (im Bereich von 0.06 bis 0.1). Die Verwendung

von Kontrollvariablen wie Reisezeit, Reisekosten und ÖV-Angebot, erlaubt den Schluss, dass die Bevölkerungsdichte nicht einfach eine indirekte Messgrösse für diese Variablen ist, sondern einen eigenständigen, direkten Einfluss auf den Benzinverbrauch hat. Zudem findet Su (2011) eine positive Elastizität der Dichte des Strassennetzes auf den Benzinverbrauch. Darin wird ein Beleg für die Hypothese des induzierten Verkehrs gesehen, d.h. dass der Bau von mehr Strassen zu mehr Verkehr führt.

Physische Aktivität und Gesundheit

Day et al. (2006) haben in einer Literaturanalyse folgende Merkmale der gebauten Umwelt identifiziert, welche potenziell einen aktiven Lebensstil fördern:

- Charakteristika, die zu einer angenehmeren Umgebung für Fussgänger führen (Bäume entlang von Strasse, attraktive Architektur)
- Komfort der Fortbewegung zu Fuss (Direktheit von Wegen, Nähe von Zielen)
- Sicherheit vor Strassenverkehr und Kriminalität (gesicherte Strassenübergänge, keine Graffiti)

Studien zur Planung haben laut Day et al. (2006) meist einen etwas anderen Fokus als Studien zur öffentlichen Gesundheit. Während erstere auf Erreichbarkeit und die Nutzung des Langsamverkehrs als Verkehrsmittel fokussieren, untersuchen letztere die Bedeutung des Langsamverkehrs als Form der körperlichen Betätigung und als Mittel gegen Übergewicht.

Day et al. (2006) zählen folgende, häufig von Planern in Studien verwendeten Messgrössen der gebauten Umwelt auf:

- Bevölkerungsdichte
- Beschäftigungsdichte
- Flächennutzungsmix
- Muster des Strassenrasters
- Öffentliche Räume wie Parks und Plätze
- Vorhandensein und Qualität der Langsamverkehrsinfrastruktur

Von Gesundheitsforschern häufig untersuchte Aspekte seien:

- Langsamverkehrsinfrastruktur
- Parks, Freiräume und Freizeiteinrichtungen
- Wahrgenommene Sicherheit vor Kriminalität
- Verkehrsberuhigungsmassnahmen
- Zielwahl

- Ästhetik der Umgebung
- Wetter

Es besteht also eine grosse Überlappung bei den untersuchten Charakteristika der gebauten Umwelt, auch wenn die Ziele der Studien verschieden sind.

Für das konzeptuelle Framework des *Irvine–Minnesota Inventory to Measure Built Environments* verwendeten Day et al. (2006) folgende vier Charakteristika der gebauten Umwelt.

Erreichbarkeit („accessibility“)

„is the perceived ease with which destinations can be reached and terrain can be traversed during physical activity for travel and/or recreation“ (Day et al., 2006, 146)

Damit in Zusammenhang stehende Eigenschaften der gebauten Umwelt sind:

- Flächennutzungsmix (→ Nähe der Ziele zu den Quellen)
- Dichte der Quellen
- Dichte der Ziele, inkl. Freizeiteinrichtungen
- Vernetzung der Nutzungen
- Einrichtungen für den öffentlichen Verkehr
- Muster des Strassennetzes
- Steigung von Strassen und Wegen
- Physische Barrieren
- Vorzüge („amenities“) des Langsamverkehrs

Pleasurability

„is the perceived attractiveness of the setting for physical activity for travel and/or recreation“ (Day et al., 2006, 146)

Dies beinhaltet:

- Ästhetik
- Vorhandensein attraktiver Ziele, welche visuell die Umwelt aufwerten (z.B. Bauernmärkte oder Parks)
- Komfort

Es ist auch möglich, *Pleasurability* weiter zu unterteilen, z.B. in Funktionalität und Ästhetik. Allerdings werden laut Day et al. (2006) meist beide simultan durch gewisse Eigenschaften

der gebauten Umwelt aufgewertet (indem menschliche Bedürfnisse so befriedigt werden, dass auch die Attraktivität zunimmt – z.B. mit Verkaufsständen entlang einer Strasse, mit Strassencafés o.ä.), weshalb eine solche Aufspaltung nur beschränkt Sinn macht.

Mit der *Pleasurability* in Zusammenhang stehende Eigenschaften der gebauten Umwelt sind:

- Architektonischer Charakter
- Ästhetische Qualität
- Kontextuelle Vereinbarkeit (visuelle Zusammengehörigkeit der Gebäude und Räume in der Nähe)
- Aussicht
- Attraktive menschliche Umgebung (z.B. aktivierte Fassaden, öffentliche Räume)
- Erfüllung menschlicher Bedürfnisse und Komfortansprüche (z.B. Strassenmöblierung, Gehsteige)
- Vorhandensein anderer Nutzer des Langsamverkehrs (Schaffung einer belebten Umgebung)

Wahrgenommene Sicherheit vor dem Verkehr („perceived safety from traffic“)

„involves individuals’ beliefs that limited opportunities exist in the setting for injury from autos or other vehicles“ (Day et al., 2006, 146)

Diese wahrgenommene Sicherheit ist nicht identisch mit der tatsächlichen Sicherheit, aber eng damit verknüpft.

Damit in Zusammenhang stehende Eigenschaften der gebauten Umwelt sind:

- Physische und / oder psychologische Barrieren zu hohen Verkehrsgeschwindigkeiten (tiefe erlaubte Geschwindigkeit, abgewinkelte Parkierung)
- Umleitung des Strassenverkehrs um eine bestimmte Umgebung (Sackgassensiedlungen, Torsituationen bei Quartieren)
- Sichere Strassenübergänge für Fussgänger und Fahrräder
- Trennung des LV vom Strassenverkehr (Fahrradwege, Gehsteige)
- Erhöhung der Aufmerksamkeit der Pkw-Lenker (z.B. Shared Space)

Wahrgenommene Sicherheit vor Verbrechen („perceived safety from crime“)

„involves individuals’ beliefs that limited opportunities exist in the setting for crime victimization or harassment during physical activity for travel and/or recreation“ (Day et al., 2006)

Diese wahrgenommene Sicherheit ist nur indirekt mit der tatsächlichen Sicherheit verbunden.

Damit in Zusammenhang stehende Eigenschaften der gebauten Umwelt sind:

- Unterhalt (z.B. keine Graffitis)
- Strassenbeleuchtung
- Belebung und aktivierte Fassaden („eyes on the street“)
- Abwesenheit von als bedrohlich empfundenen Landnutzungen und Individuen (Rotlichtviertel, Drogen etc.)

Viele aufgezählte Eigenschaften lassen sich nur vor Ort durch Begehung mit standardisierten Erfassungsbogen messen, nicht aber aus GIS-Daten – sie liefern trotzdem wertvolle Hinweise darauf, wann eine Umgebung als attraktiv wahrgenommen wird. Andere, vor allem aus dem Bereich Erreichbarkeit, sind gut messbar und wurden auch von zahlreichen Verkehrsstudien angewandt.

Es gibt zahlreiche weitere Studien, die analysieren, welche Elemente der gebauten Umwelt die physische Aktivität respektive die Nutzung des LV fördern (siehe z.B. Frank, Sallis, Saelens, Leary, Cain, Conway und Hess (2010)).

4.1.3 Zusammenfassung der Zusammenhänge und Elastizitäten

Ewing und Cervero (2010) ordnen die vorhandene Literatur systematisch und berechnen die Grösse der verschiedenen Wirkungen mit gewichteten Durchschnittswerten für die Elastizitäten in einer Meta-Analyse, die 61 Studien hoher Qualität berücksichtigt. Diese stellt auch eine Weiterentwicklung ihrer früheren Übersichtsarbeit (Ewing und Cervero, 2001) dar. In der neueren Studie berücksichtigen sie den Effekt der Selbstselektion (siehe Kapitel 4.1.4), verwenden eine wesentlich breitere Datenbasis (es waren auch wesentlich mehr Studien verfügbar) und systematisieren die Berechnung von Elastizitäten. Diese Meta-Analyse liefert die umfangreichste und aktuellste verfügbare breite Datenbasis zum Ausmass des Effekts der gebauten Umwelt auf das Verkehrsverhalten. Zudem bietet sie eine hohe Systematisierung der erklärenden und der abhängigen Variablen. Deshalb, und weil die sehr grosse Anzahl an Studien keine eigene, derart umfangreiche Auswertung erlaubt, greift die vorliegende Arbeit in hohem Masse auf diese Meta-Analyse zurück.

Abhängige Variablen

Ewing und Cervero (2010) reduzieren die abhängigen Variablen auf drei zentrale Grössen:

- Gefahrene Kilometer (VKT oder VMT)
- Fussverkehr
- Nutzung des öffentlichen Verkehrs

Einerseits basiert dies auf den in den von Ewing und Cervero (2010) untersuchten Studien verwendeten abhängigen Variablen, andererseits wird mit der Relevanz dieser Grössen argumentiert. Die gefahrenen Kilometer haben laut Ewing und Cervero (2010) eine wichtige Verbindung zu (siehe auch Kapitel 4.1.1):

- Verkehrssicherheit
- Luftqualität
- Energieverbrauch
- Klimawandel
- Andere soziale Kosten des Automobilgebrauchs

Fussverkehr und Nutzung des ÖV haben laut Ewing und Cervero (2010) Folgen für:

- Mobilität
- Lebensqualität
- soziale Gerechtigkeit
- öffentliche Gesundheit

Erklärende Variablen

Viele Studien verwenden die von Cervero und Kockelman (1997) eingeführten sogenannten 3 *Ds* als Messgrössen für die gebaute Umwelt: Dichte („density“), Diversität („diversity“) und Design („design“). Allerdings wurden später weitere Grössen eingeführt, z.B. zwei weitere *D* von Ewing und Cervero (2001): Erreichbarkeit von Zielen („destination accessibility“) und Distanz zum ÖV („distance to transit“). Als sechstes *D* verwenden laut Ewing und Cervero (2010) einige wenige Studien die Nachfragebewirtschaftung („demand management“). Als siebtes *D* wird die Demographie („demographics“) eingeführt, die aber aus verschiedenen Kontrollvariablen besteht und nicht die gebaute Umwelt beschreibt.

Ewing und Cervero (2010) verwenden 5 *Ds* zur groben Gliederung der verschiedenen Arbeiten zum Thema Verkehr und gebaute Umwelt. Dies erscheint plausibel, werden dadurch doch praktisch alle in den verschiedenen berücksichtigten Studien verwendeten Variablen durch einen überschaubaren Satz an Kategorien abgedeckt. Entsprechend wird hier dieselbe Einteilung verwendet:

- Dichte
Anzahl (Einwohner, Wohnungen, Beschäftigte, Geschossfläche) pro Fläche (einer Entität oder entwickelte Fläche)
- Diversität
Betrifft die Anzahl verschiedener Flächennutzungen in einem Gebiet und wie stark diese Nutzungen vertreten sind (Bodenfläche, Geschossfläche, Anz. Beschäftigte).

Meist Entropie-Ansätze oder Verhältnisse Beschäftigte/Wohnungen oder Beschäftigte/Einwohner

- Design
Charakteristika des Strassennetzes
Durchschnittliche Blockgrösse, Anteil an Kreuzungen mit 4 Strassen, Anzahl Kreuzungen pro Flächeneinheit
Seltener wird die Fussgängerfreundlichkeit gemessen: z.B. Anteil der Häuserfronten mit Gehsteigen, Durchschnittliche Strassenbreiten, Anzahl Personenübergänge, Bäume an der Strasse.
- Erreichbarkeit von Zielen
Die Leichtigkeit, mit der ein Ziel erreicht werden kann, regional oder lokal.
Regional: z.B. Distanz zum Stadtzentrum; Anzahl Arbeitsplätze oder Dienstleistungen, die in einer bestimmten Reisezeit erreichbar sind, oder Gravitationsmodell.
Lokal: z.B. Distanz Wohnung – nächstgelegenes Geschäft.
- Entfernung zum ÖV
Durchschnitt der kürzesten Strassenrouten von den Wohnungen oder den Arbeitsplätzen in einem Gebiet zur nächstgelegenen ÖV-Haltestelle oder zum nächstgelegenen Bahnhof. Auch: Länge der ÖV-Routen pro Flächeneinheit, Distanz zwischen ÖV-Haltestellen, Anzahl Haltestellen pro Flächeneinheit.

Ewing und Cervero (2010) weisen auf die Schwächen dieser Einteilung hin: sie ist sehr grob und die Abgrenzungen zwischen den einzelnen Kategorien sind nicht klar (z.B. überlappen sich die Diversität und die Erreichbarkeit von Zielen). Zudem wird darauf hingewiesen, dass der Faktor Design in einer Wechselwirkung mit gewissen anderen Faktoren wie Dichte und Diversität stehen könnte. Dieses Problem werde in einzelnen Studien durch den Entwurf kompositier Messgrössen angegangen (z.B. der *Urban Design Factor* in Portland als Funktion der Dichte von Kreuzungen, der Einwohnerdichte und der Beschäftigtendichte).

In Tabelle 3 sind sämtliche in den von Ewing und Cervero (2010) berücksichtigten Studien vorkommenden erklärenden Variablen der gebauten Umwelt zum Verkehrsverhalten sowie ihre Zuordnung zu zusammenfassenden Bezeichnungen und den 5 *Ds* aufgeführt.

Tabelle 3 Erklärende Variablen der gebauten Umwelt zum Verkehrsverhalten

Kategorie (Ewing und Cervero, 2010)	Zusammenfassende Bezeichnung (Ewing und Cervero, 2010)	Ausprägungen in den von Ewing und Cervero (2010) berücksichtigten Studien
Dichte	<i>Houshold / population density</i>	<i>Household density</i>
		<i>Population density</i>
	<i>Job density</i>	<i>Dwelling unit density</i>
		<i>Job density</i>
		<i>Business density</i>
	<i>Commercial floor area ratio</i>	<i>Retail floor area ratio</i>
Diversität	<i>Land use mix (entropy index)</i>	<i>Land use mix (entropy index)</i>
		<i>Land use mix (diversity index)</i>
		<i>Land use diversity</i>
	<i>Jobs-housing balance</i>	<i>Job-population balance</i>
		<i>Job-housing imbalance</i>
		<i>Non-retail job-housing balance</i>
	<i>Distance to a store</i>	<i>Distance to store</i>
		<i>Distance to nearest store</i>
		<i>Distance to nearest grocery</i>
		<i>Walk opportunities within 1/2 mile of home</i>
		<i>Distance to closest commercial use</i>
	<i>Distance to commercial center</i>	
Design	<i>Intersection / street density</i>	<i>Intersection density</i>
		<i>Street density</i>
		<i>Block size</i>
		<i>Street connectivity</i>
	% 4-way intersections	<i>4-way intersection density</i>
		<i>Proportion 4-way intersections</i>
		<i>% 4-way intersections</i>
		<i>Proportion connected intersections</i>
		<i>Proportion 3-way intersections</i>
		<i>% Culs-de-sac</i>

Erreichbarkeit der Ziele	<i>Job accessibility by auto</i>	<i>Job accessibility by auto</i>
	<i>Job accessibility by transit</i>	<i>Job accessibility by transit</i>
	<i>Distance to downtown</i>	<i>Distance to downtown</i>
	<i>Jobs within one mile</i>	<i>Jobs within one mile</i>
		<i>Job accessibility by walking</i>
Distanz zum ÖV	<i>Distance to nearest transit stop</i>	<i>Distance to nearest transit stop</i>
		<i>Distance to nearest bus stop</i>
		<i>Distance to bus stop squared</i>
		<i>Walk minutes to transit</i>
		<i>Distance to rail station</i>
		<i>Distance to metro</i>

Quelle: Nach Ewing und Cervero (2010, 273-274, 282-294)

Elastizitäten

Ewing und Cervero (2010) ermitteln die Elastizitäten von 62 Studien, die zumindest teilweise vergleichbare erklärende und beobachtete Variablen verwendeten, wichtige Kontrollvariablen berücksichtigten und Qualitätsanforderungen hinsichtlich verwendeter Methoden und Daten genügten. Aus diesen Werten bilden sie nach Stichprobengrösse gewichtete Durchschnittswerte für die Elastizitäten. Die entsprechenden Werte sind in Tabelle 4 dargestellt. Diese Resultate stimmen im Bereich der gefahrenen Kilometer mit der früheren Untersuchung der Autoren (Ewing und Cervero, 2001) überein.

Die Autoren weisen darauf hin, dass sie nicht für die statistische Signifikanz der einzelnen Werte garantieren können und dass in einigen Fällen die Anzahl Studien pro Wert sehr klein ist. Trotzdem bezeichnen sie die Werte als Zusammenfassung des Wissens in diesem Bereich per Ende Jahr 2009.

Tabelle 4 Von Ewing und Cervero (2010) nach Stichprobengrösse gewichtete Durchschnittselastizitäten des Verkehrsverhaltens

Erklärende Variable	Abhängige Variable		
	Gef. Distanz	Fussverkehr	Nutzung ÖV
Dichte			
Haushalts- od. Bevölkerungsdichte	-0.04	0.07	0.07
Beschäftigungsdichte	0.00	0.04	0.01
Anteil Geschäftsflächen		0.07	
Diversität			
Flächennutzungsmix („entropy index“)	-0.09	0.15	0.12
Verh. Beschäftigte / Einwohner	-0.02	0.19	
Entfernung zu einem Geschäft		0.25	
Design			
Kreuzungs- od. Strassendichte	-0.12	0.39	0.23
% vierarmige Kreuzungen	-0.12	-0.06	0.29
Erreichbarkeit der Ziele			
Arbeitsplatzerreichbarkeit mit MIV	-0.20		
Arbeitsplatzerreichbarkeit mit ÖV	-0.05		
Entfernung zum Stadtzentrum (1)	0.22		
Arbeitsplätze innerhalb einer Meile		0.15	
Entfernung zum ÖV			
Entfernung zur nächsten ÖV-Haltes. (2)	0.05	-0.15	-0.29

(1) und (2): Vorzeichen invertiert, ursprüngliches Vorzeichen für Nähe, Zugänglichkeit o.ä.

Quelle: Basierend auf Ewing und Cervero (2010, 273-274)

Auffallend ist, dass die Dichte auf alle drei abhängigen Variablen einen eher kleinen Einfluss ausübt, obschon sie in vielen älteren Studien als sehr wichtig erachtet wurde. Dies wird von Ewing und Cervero (2010) darauf zurückgeführt, dass in solchen älteren Studien andere wichtige erklärende Variablen nicht separat erfasst wurden, d.h. der in solchen Untersuchungen der Dichte zugeordnete Effekt ist in Wahrheit z.B. der durchmischten Landnutzung oder der Erreichbarkeit zuzuordnen. Dichte werde durch die anderen erklärenden Variablen zu einem

grossen Teil repräsentiert: Dichte Siedlungen haben vielfach Mischnutzungen, kurze Blocklängen und eine zentrale Lage (= hohe Erreichbarkeit).

4.1.4 Methodisches Problem: Selbstselektion

Das Problem der Selbstselektion

Laut Mokhtarian und Cao (2008) haben sehr viele Studien beobachtet, dass Bewohner von Nachbarschaften mit höheren Dichten und Mischnutzungen (z.B. im Sinne des *New Urbanism*, siehe Kapitel 3.2.3) in der Tendenz mehr zu Fuss gehen und weniger mit dem Auto fahren als Bewohner typischer suburbaner Nachbarschaften mit nur einer Nutzung (Wohnen) und geringer Dichte. Sie heben allerdings hervor, dass unklar ist, ob die beobachteten Muster des Verkehrsverhaltens auf die gebaute Umwelt selbst zurückzuführen sind oder nicht vielmehr auf die vorausgehende Selbstselektion des Wohnstandortes der Bewohner eines bestimmten Gebiets, die eine gebaute Umwelt wählen, welche mit ihren Neigungen bezüglich einer bestimmten Verkehrsmittelwahl und Flächennutzungsstruktur übereinstimmt.

Ein Beispiel für einen Fall, in dem Selbstselektion entscheidend ist: Eine Person, die vorzugsweise zu Fuss geht zieht deshalb in eine Umgebung, die dem Zufussgehen zuträglich ist und geht in der Folge auch häufiger zu Fuss. Ihr verändertes Verkehrsverhalten ist also nicht auf die gebaute Umwelt, sondern auf ihre Neigungen zurückzuführen, aufgrund derer sie ihre Wohnstandortwahl trifft. Einen solchen Fall erwähnen z.B. Handy und Clifton (2001):

„In other words, having the option to walk to the store is to some extent an effect of the desire to walk to the store. Simply having the option to walk without also having that desire may not be enough to cause a significant amount of walking.“ (Handy und Clifton, 2001, 344)

Mit *effect of the desire to walk to the store* meinen die Autoren, dass aufgrund der Präferenz, zu Fuss ein Geschäft erreichen zu können, die Lage der Wohnung entsprechend gewählt wird.

Eine weitere Erläuterung liefern Cao, Mokhtarian und Handy (2009a): Beim Problem der Selbstselektion geht es darum, ob beobachtete Zusammenhänge zwischen gebauter Umwelt und Verkehrsverhalten wirklich eine Auswirkung jener sind oder nicht vielmehr nur scheinbar ein kausaler Zusammenhang besteht, der in Wahrheit durch den gleichzeitigen Einfluss verursacht wird, den Präferenzen sowohl auf die Wohnstandortwahl (und dadurch auf die gebaute Umwelt) als auch auf das Verkehrsverhalten ausüben. Wäre dies der Fall, würde das Verkehrsverhalten einer entsprechenden Person in keiner Weise von der gebauten Umwelt abhängen. Der beobachtete Zusammenhang zwischen gebauter Umwelt und Verkehrsverhalten

würde ausschliesslich dadurch verursacht, dass z.B. diejenigen Personen, die gerne zu Fuss gehen, auch gerne in einer Umgebung leben, die auf Fussverkehr ausgerichtet ist. Cao et al. (2009a) weisen allerdings auch darauf hin, dass die Existenz von Selbstselektion keinesfalls ausschliesst, dass die gebaute Umwelt einen wirklichen, eigenständigen Effekt auf das Verkehrsverhalten hat. Der oben beschriebene Extremfall existiere in der Realität so nicht.

Selbstselektion wird von Mokhtarian und Cao (2008) hinsichtlich des Zusammenhangs gebaute Umwelt – Verkehrsverhalten als Tendenz der Menschen definiert, ihren Wohnstandort entsprechend ihrer Mobilitätsmöglichkeiten, ihrer Bedürfnisse und ihrer Präferenzen zu wählen. Diese Selbstselektion des Wohnstandorts folge aus Haltungen und soziodemographischen Eigenschaften. Während viele Studien die soziodemographischen Eigenschaften als Kontrollvariablen explizit in die jeweiligen Modelle einbezögen, werde die Selbstselektion des Wohnstandorts aufgrund von Haltungen häufig vernachlässigt.

Methodische Anforderungen zum Einbezug von Selbstselektion

Das Aufzeigen einer Verbindung zwischen der gebauten Umwelt und dem Verkehrsverhalten reicht also nicht aus, um einen kausalen Zusammenhang nachzuweisen. Mokhtarian und Cao (2008) formulieren die vier grundsätzlichen wissenschaftlichen Ansprüche, um Kausalität zwischen einer erklärenden und einer abhängigen Variable ableiten zu können:

“association (a statistically significant relationship)

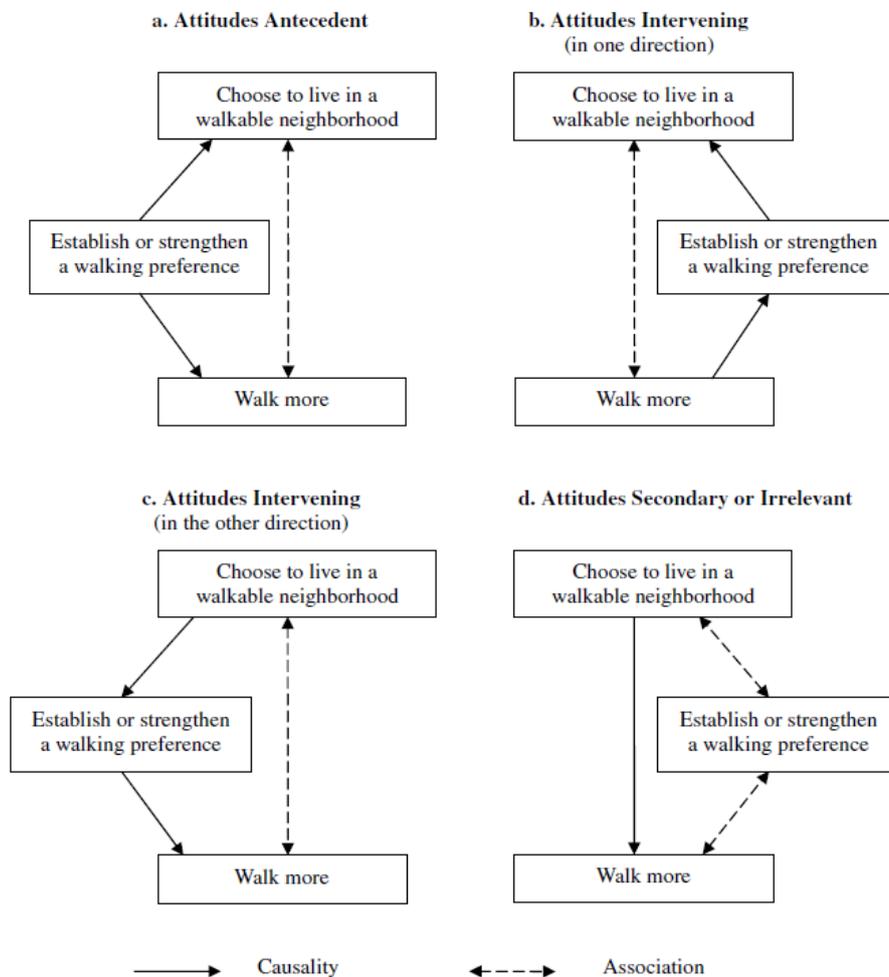
nonspuriousness (a relationship that cannot be attributed to another variable)

time precedence (cause precedes effect)

causal mechanism (a logical explanation for why the alleged cause should produce the observed effect” Mokhtarian und Cao (2008, 205)

Als besonders wichtig erachten Mokhtarian und Cao (2008), sicherzustellen, dass eine beobachtete Beziehung zwischen gebauter Umwelt und Verkehrsverhalten nicht in Wirklichkeit das Resultat einer nicht berücksichtigten Variable wie z.B. die Einstellung einer Person ist, die sowohl Verkehrsverhalten als auch gebaute Umwelt (resp. die Wahl derselben durch die Wohnstandortwahl) verursacht. Es werden vier mögliche Beziehungen zwischen persönlicher Einstellung, gebauter Umwelt und Verkehrsverhalten aufgezeigt (siehe Abbildung 7).

Abbildung 7 Mögliche Zusammenhänge zwischen Haltungen zum Verkehr, gebauter Umwelt und Verkehrsverhalten



Quelle: Mokhtarian und Cao (2008, 206)

Probleme bei der Versuchsanordnung

Wissenschaftlich sauber liesse sich der Zusammenhang zwischen gebauter Umwelt und Verkehrsverhalten mit einem klassischen *before-after random-assignment control group experimental design* erforschen (Cao et al., 2009a). Allerdings ist ein solches nicht umsetzbar: die Kosten wären enorm und es gäbe ethische und politische Probleme.

Um trotzdem Forschung in diesem Bereich betreiben zu können, vergleichen einige Studien (z.B. Krizek (2003)) Veränderungen im Verkehrsverhalten von Individuen, die in eine Nachbarschaft mit anderer Charakteristik der gebauten Umwelt umziehen („Experimentalgruppe“),

und von solchen, die nicht umziehen („Kontrollgruppe“). Allerdings erfolgt die Änderung des Wohnstandorts laut Cao et al. (2009a) nicht zufällig (d.h. es wird nicht durch ein Zufallsverfahren bestimmt, welche Individuen die „Behandlung“ erhalten und welche nicht), sondern ist ein selbstselektioniertes Resultat der Veränderung von Arbeitsort, Alter und Haltung bezüglich Verkehrsverhalten der Individuen.

Andere Studien untersuchen die Effekte von bewussten Eingriffen (z.B. die Schaffung von sicheren Fussgängerrouen von und zu Schulen). Allerdings erfolgen auch solche Eingriffe laut Cao et al. (2009a) nicht zufällig, sondern werden an spezifisch gewählten Orten angewandt (welche z.B. besonders unsicher für Fussgänger sind). Zudem werden die Individuen abhängig von ihrem Wohnstandort und nicht zufällig der „Kontrollgruppe“ oder der „Experimentalgruppe“ zugeordnet.

Modellierung der Beziehung gebaute Umwelt – Verkehrsverhalten

Gemäss Mokhtarian und Cao (2008) wird die Beziehung gebaute Umwelt – Verkehrsverhalten üblicherweise wie folgt modelliert:

$$\text{Verkehrsverhalten} = f(\text{gebauter Umwelt}, X) + \varepsilon$$

Wobei X die übrigen beobachteten Variablen (z.B. soziodemographische Eigenschaften) und ε den kollektiven Einfluss aller nicht beobachteten Variablen auf das Verkehrsverhalten bezeichnet.

Dabei dürfen, und das ist bei vielen Studien das Problem, die beobachteten erklärenden Variablen (*gebauter Umwelt*, X) nicht mit den unbeobachteten erklärenden Variablen (ε) korrelieren. Das Nichteinhalten dieser Bedingung wird als *endogeneity bias* bezeichnet und liefert für die beobachteten Variablen verfälschte Koeffizienten; zusätzlich werden auch die üblichen Signifikanztests verfälscht.

Endogeneity bias kann auf zwei unterschiedliche Arten auftreten:

- Als *simultaneity bias*, wenn eine erklärende Variable gleichzeitig auch eine Funktion der abhängigen Variable ist, die sie erklären sollte, d.h. wenn eine Variable gleichzeitig Ursache und Folge einer anderen Variable ist.
- Als *omitted variables bias*, wenn beobachtete und unbeobachtete erklärende Variablen direkt korrelieren, weil eine Variable Ursache der anderen ist oder beide Funktionen derselben übergeordneten Variable sind).

Mögliche Erkenntnisse aus dem Einbezug der Selbstselektion

Der Einbezug der Selbstselektion ermöglicht es, genauere und weniger verfälschte Aussagen über den Einfluss der gebauten Umwelt auf das Verkehrsverhalten zu machen. Laut Mokhtarian und Cao (2008) stehen zwei Fragen im Zentrum:

- Welcher Anteil der gesamten oder erklärbaren Variation des Verkehrsverhaltens ist wirklich auf die gebaute Umwelt zurückzuführen?
- Welcher Anteil des gesamten Einflusses der gebauten Umwelt auf das Verkehrsverhalten ist auf Selbstselektion des Wohnstandorts zurückzuführen und welcher Anteil auf den separaten Einfluss der gebauten Umwelt selbst?

Beide Fragen sind wichtig, um die Möglichkeiten zur Beeinflussung des Verkehrsverhaltens durch Änderungen der gebauten Umwelt richtig einschätzen zu können, was häufig als gezielte Massnahme propagiert wird. Allerdings wird laut Mokhtarian und Cao (2008) selbst die erste Frage nur von wenigen Studien beantwortet. Sie vermuten, der Grund dafür sei, dass die Antwort üblicherweise „ein sehr kleiner Anteil“ lautet (im Vergleich zum Anteil soziodemographischer und unbeobachteter Variablen); diese Vermutung sehen sie unter anderem durch die von Ewing und Cervero (2001) berechneten Elastizitäten gestützt (diese Beobachtung deckt sich auch mit den Elastizitäten in Tabelle 4). Allerdings weisen sie auch darauf hin, dass dieser „kleine Anteil“ keineswegs bedeute, dass das Verkehrsverhalten nicht durch Änderungen der gebauten Umwelt beeinflusst werden kann. Trotzdem sei eine genaue Quantifizierung natürlich unerlässlich. Zudem wäre es wünschenswert, zu wissen, welche Elemente der gebauten Umwelt das Verkehrsverhalten auf welche Art und Weise wie stark beeinflussen.

Schlussfolgerungen

Mokhtarian und Cao (2008) bezeichnen die Entflechtung der Wirkungen der gebauten Umwelt und der Selbstselektion des Wohnstandorts auf das Verkehrsverhalten sowie die Bestimmung der relativen Wichtigkeit der beiden erklärenden Grössen als eine der wichtigsten Aufgaben zur Klärung des Zusammenhangs zwischen gebauter Umwelt und Verkehrsverhalten.

Aufgrund zahlreicher methodischer Schwächen vieler der von Mokhtarian und Cao (2008) untersuchten Studien können die Autoren keine abschliessende Schlussfolgerung zum Ausmass der Beeinflussung des Verkehrsverhaltens durch die gebaute Umwelt geben.

Cao et al. (2009a) kommen aufgrund ihrer umfangreichen Analyse von 38 Studien, welche den Effekt der Selbstselektion berücksichtigen, zum Schluss, dass die gebaute Umwelt mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit einen eigenständigen Einfluss auf das Verkehrsverhalten hat. Alle analysierten Studien stellten einen statistisch signifikanten Einfluss mindes-

tens einer Messgrösse der gebauten Umwelt auf das Verkehrsverhalten fest, nachdem der Einfluss der Selbstselektion separat erfasst worden war.

Als schwieriger erachten Cao et al. (2009a) die Beurteilung des autonomen Effekts der gebauten Umwelt im Verhältnis zum Effekt der Selbstselektion. In nur 10 Studien wurde das Verhältnis der Grössen der beiden Effekte mindestens qualitativ beschrieben, eine zusätzliche quantitative Beschreibung erfolgte sogar in lediglich 3 Studien. Der Anteil des autonomen Effekts der gebauten Umwelt am kombinierten Effekt von gebauter Umwelt und Selbstselektion betrug in diesen drei Studien zwischen 52 % und 90 %. In 8 der 10 Studien, welche qualitative oder quantitative Aussagen machten, war der Effekt der gebauten Umwelt stärker als der Effekt der Selbstselektion. Cao et al. (2009a) erachten die Informationslage in dieser Frage als zu klein, um Schlüsse mit genügender Sicherheit ziehen zu können.

Der scheinbare Einfluss der gebauten Umwelt auf das Verkehrsverhalten wird laut Cao et al. (2009a) erheblich kleiner, wenn der Effekt der Selbstselektion des Wohnstandorts berücksichtigt wird. Als entsprechend wichtig erachten sie es für die Qualitätsbeurteilung von entsprechenden Studien, ob diese den Effekt der Selbstselektion berücksichtigen.

Cao et al. (2009a) beobachten zudem, dass die meisten der von ihnen analysierten Studien auf Aspekte der gebauten Umwelt im Massstab der Nachbarschaft beschränkt sind. Sie vermuten, dass andere Aspekte wie die Lage der Nachbarschaft im regionalen Kontext ebenfalls einen wichtigen Einfluss auf das Verkehrsverhalten haben.

Grössenordnung der Wirkung

Cao et al. (2009a) weisen insbesondere auf eine Schwäche der Studie von Ewing und Cervero (2001) hin, die über 50 Studien zum Einfluss der gebauten Umwelt auf das Verkehrsverhalten untersuchten: Es wurde nicht unterschieden, ob eine Studie nur die Verbindung zwischen den beiden oder einen kausalen Zusammenhang belegte. Cao et al. (2009a) fokussieren deshalb auf Studien, welche explizit den Effekt der Selbstselektion berücksichtigen, verwenden aber die Ergebnisse von Ewing und Cervero (2001) zur Überprüfung der Plausibilität ihrer Ergebnisse.

Ewing und Cervero (2010) reagieren auf die Kritik von Cao et al. (2009a) an ihrem früheren Übersichtsaufsatz (Ewing und Cervero, 2001), indem sie explizit aufführen, welche Studien Selbstselektion überprüfen und welche nicht. Allerdings behandeln sie anders als Cao et al. (2009a) und Mokhtarian und Cao (2008) sämtliche Methoden zur Überprüfung des Effektes der Selbstselektion als gleichwertig. Zudem geben sie eine Übersicht über einige der quantita-

tiven Ergebnisse der von Cao et al. (2009a) untersuchten Studien. Die entsprechenden Werte sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5 Quantitativer Effekt der Selbstselektion des Wohnstandortes: Effektiver Anteil der gebauten Umwelt am gesamten beobachteten Effekt

Quelle	Abhängige Variable	Erklärende Variable	Effektiver Anteil gebaute Umwelt
Salon (2006)	Walking levels	Bevölkerungsdichte	1/2 – 2/3
Zhou und Kockelman (2008)	VMT	Gebaute Umwelt (nicht spezifiziert)	58 – 90 %
Cao (2010)	Häufigkeit Nutzung Fuss-Nutzverkehr	Nachbarschaftstyp	61 %
	Häufigkeit Nutzung Fuss-Freizeitverkehr	Nachbarschaftstyp	86 %
Cao, Xu und Fan (2009b)	VMT	Gebaute Umwelt (nicht spezifiziert)	48 – 98 %
Bhat und Eluru (2009)	VMT	Nachbarschaftstyp	87 %

Quelle: Nach Ewing und Cervero (2010, 266-267)

In ihrer Meta-Analyse verrechnen Ewing und Cervero (2010) zwar Studien, die den Effekt der Selbstselektion berücksichtigen mit solchen, die das nicht tun, erfassen erstere aber auch separat. Anhand der Elastizitäten der einzelnen Studien schliessen sie, dass die Elastizitäten in Studien, die Selbstselektion berücksichtigen, vergleichbar oder sogar eher stärker als in den übrigen Studien sind. Ewing und Cervero (2010) erklären dies damit, dass die Selbstselektion des Wohnstandorts den Effekt der erklärenden Variablen in gewissen Fällen verstärken kann. Dies würde bedeuten, dass die Nichtberücksichtigung der Selbstselektion zu einer Unterschätzung der Wirkung der gebauten Umwelt auf das Verkehrsverhalten führen kann. Dies steht in einem gewissen Widerspruch zu den oben dargelegten Erkenntnissen von Cao et al. (2009a), den Ewing und Cervero (2010) nicht erklären können.

Umgang mit dem Problem der Selbstselektion

Auch wenn die Datenlage relativ gering ist und Ewing und Cervero (2010) die von Cao et al. (2009a) postulierte Reduktion des Einflusses der gebauten Umwelt auf das Verkehrsverhalten bei Berücksichtigung der Selbstselektion nicht unterstützen, erscheint eine Berücksichtigung ratsam. Dies geschieht durch eine Multiplikation des Durchschnittswerts des effektiven Anteils der gebauten Umwelt aus Tabelle 5 (63.6%) mit den von Ewing und Cervero (2010) er-

mittelten Elastizitäten. Diese extrem einfache Methode birgt die Gefahr, dass der Einfluss der gebauten Umwelt unterschätzt wird. Dies erscheint aber als annehmbarer als das Risiko einer Überschätzung der Wirkung. Tabelle 6 zeigt die entsprechenden Werte.

Tabelle 6 Gewichtete Durchschnittselastizitäten des Verkehrsverhaltens mit Berücksichtigung der Selbstselektion des Wohnstandortes

Erklärende Variable	Abhängige Variable		
	Gef. Distanz	Fussverkehr	Nutzung ÖV
Dichte			
Haushalts- od. Bevölkerungsdichte	-0.025	0.045	0.045
Beschäftigungsdichte	0.000	0.025	0.006
Anteil Geschäftsflächen		0.045	
Diversität			
Flächennutzungsmix (entropy index)	-0.057	0.095	0.076
Verh. Beschäftigte / Einwohner	-0.013	0.121	
Entfernung zu einem Geschäft		0.159	
Design			
Kreuzungs- od. Strassendichte	-0.076	0.248	0.146
% vierarmige Kreuzungen	-0.076	-0.038	0.184
Erreichbarkeit der Ziele			
Arbeitsplatzerreichbarkeit mit MIV	-0.127		
Arbeitsplatzerreichbarkeit mit ÖV	-0.032		
Entfernung zum Stadtzentrum	0.140		
Arbeitsplätze innerhalb einer Meile		0.095	
Entfernung zum ÖV			
Entfernung zur nächsten ÖV-Haltestelle	0.032	-0.095	-0.184
Berechnung: Multiplikation der Werte in Tabelle 4 mit dem aus Tabelle 5 abgeleiteten Faktor 0.636			

Quelle: Basierend auf Ewing und Cervero (2010, 266-267, 273-274)

4.2 Arbeitsproduktivität

4.2.1 Relevanz des Themas

Die Relevanz der Arbeitsproduktivität liegt in der in Kapitel 3.1.3 gezeigten Wichtigkeit des ökonomischen Effizienz-Prinzips für die Durchsetzung des Nachhaltigkeitsansatzes begründet, zeigt sie doch die Effizienz, mit der personelle Ressourcen eingesetzt werden:

„Die Arbeitsproduktivität misst die Bruttowertschöpfung pro Erwerbstätigen. Sie zeigt die Effizienz, mit der die personellen Ressourcen im Produktionsprozess eingesetzt werden.“ (Kämpf und Dietzi, 2006, 19)

Prud'homme und Lee (1999) erachten die Frage, weshalb gewisse Städte effizienter sind als andere, als planerisch und ökonomisch äusserst wichtig. Sie erläutern, dass die Arbeitsproduktivität von der „effektiven“ Grösse des Arbeitsmarkts abhängt, die als durchschnittliche Anzahl Arbeitsplätze definiert ist, die für die Arbeitenden in einer Stadt innerhalb einer bestimmten Zeit erreichbar sind. Die Arbeitsproduktivität, also der ökonomische Output pro Arbeitskraft, diene als gute Messgrösse für die Effizienz einer Stadt.

4.2.2 Stand des Wissens

Grosse Städte gelten laut Cervero (2001) als Inkubatoren für die Verbreitung von Wissen und Innovationen zwischen verschiedenen Wirtschaftssektoren und Firmen. Grössere Arbeitsmärkte und Kooperationsgebiete führten zu einer höheren Arbeitsproduktivität, und damit letztlich zu einem höheren ökonomischen Output. Entsprechend führe eine effiziente Handhabung des Wachstums zu einer hohen Arbeitsproduktivität, da einerseits Firmen einen guten Zugang zu Arbeitskräften haben (und umgekehrt) und andererseits die Transportkosten durch höhere Geschwindigkeiten gesenkt werden.

Ciccone und Hall (1996) erklären ebenfalls, wie sich Dichte auf die Produktivität auswirkt. Sie gehen davon aus, dass eine bestimmte Technologie immer dieselben Erträge erwirtschaftet, dass aber der Transport von Produkten von einem Produktionsschritt zum nächsten Kosten verursacht, die von der Distanz abhängig sind. Entsprechend lassen sich durch die Kombination von Technologien innerhalb eines bestimmten geographischen Raums höhere Erträge erwirtschaften. Zudem erlaube Dichte eine stärkere Spezialisierung.

Cervero (2001) schliesst aus der von ihm analysierten Literatur zu ökonomischen Effekten effizienter Urbanisierung, dass ein positiver Zusammenhang zwischen Produktivität und kompakten, gut erreichbaren und mobilen Regionen besteht. Selbst untersucht er den Einfluss der

gebauten Umwelt auf die Produktivität auf zwei Massstabebenen. Eine Makro-Analyse verwendet die Daten von 47 US-amerikanischen Metropolitanregionen, eine Mikro-Analyse diejenigen der 34 „Super-Districts“ der 9 Counties der San Francisco Bay Area. Das Ziel der Studie war es, nicht nur die durch die Zersiedelung entstehenden Kosten zu berücksichtigen (wie in anderen Studien), sondern vor allem auch einen möglichen Nutzen effizienter Urbanisierung aufzuzeigen, insb. in Form erhöhter Produktivität.

Der ökonomischen Output (Bruttometropolitanprodukt als Mass für die Produktivität pro Arbeitskraft) wird von Cervero (2001) als Funktion von Grösse (S), Erreichbarkeit (A), Urbaner Form (F), Transportinfrastruktur (T) und Kontrollvariablen (C) (insbesondere Zusammensetzung der Beschäftigten nach Sektoren) berechnet: $E = f(S, A, F, T, C)$. Die Berechnung zeigte einen signifikanten Einfluss der urbanen Form und der Mobilitätseigenschaften auf die ökonomische Leistung.

Die Beschäftigungsdichte (Anzahl Arbeitende pro Quadratmeile) hatte einen signifikanten Einfluss auf das Bruttometropolitanprodukt (Elastizität = 0.039). Die Grösse einer Metropolitanregion (gemessen an der Bevölkerung) hingegen hatte keinen statistisch signifikanten Einfluss.

Die Mikro-Analyse von Cervero (2001) zeigt für einen kleineren Massstab einen ähnlichen Zusammenhang auf; der Einfluss der Beschäftigungsdichte war allerdings stärker (Elastizität = 0.053 im bestem Modell).

Diese Resultate stimmen in der Tendenz mit denjenigen von Ciccone und Hall (1996) überein, die aufgrund von Daten auf County- und Bundesstaatsebene in den USA zeigten, dass Dichte wichtiger als Grösse für die Produktivität ist. Der Einfluss der Beschäftigungsdichte auf die Produktivität (Elastizität = 0.06) war ähnlich wie in der Mikro-Analyse von Cervero (2001).

Fallah, Partridge und Olfert (2011) anerkennen zwar die Qualität der Ergebnisse von Ciccone und Hall (1996), erachten sie aber aus zwei Gründen als nicht generalisierbar: Erstens seien die verwendeten Daten zu aggregiert, es müssten Daten auf Metropolitanmassstab verwendet werden. Zweitens sei es notwendig, die Flächennutzung und Nutzungsverteilung zu berücksichtigen da eine ausschliessliche Betrachtung der Dichte Unterschiede in der Verteilung nicht berücksichtigt. Entsprechend entwickeln die Autoren einen Zersiedelungs-Index („sprawl-index“), der die Verteilung der Bevölkerungsdichte innerhalb einer Metropolitanregion berücksichtigt. Sie verwenden Daten auf Ebene von *Census Block Groups*. Zwischen dem Zersiedelungs-Index und der einfachen Dichte besteht eine Korrelation von lediglich 0.42.

Der Zersiedelungs-Index von Fallah et al. (2011) wird wie folgt berechnet:

$$\text{Sprawl} = ((L\% - H\%) + 1) \times 0.5$$

$L\%$ ist der Anteil der metropolitanen Bevölkerung, die in einer Block Group mit einer Dichte unterhalb des Medians der Dichte aller Block Groups der USA lebt; $H\%$ ist entsprechend der Anteil, der in einer Block Group mit einer Dichte oberhalb des Medians lebt.

Es ist zu bemerken, dass der Index nicht wirklich berechnet werden muss, sondern direkt durch $\text{Sprawl} = L\%$ ermittelt werden kann:

$$L\% + H\% = 1 \rightarrow H\% = 1 - L\%$$

$$\begin{aligned} \text{Sprawl} &= ((L\% - H\%) + 1) \times 0.5 = ((L\% - (1 - L\%)) + 1) \times 0.5 \\ &= (L\% - 1 + L\% + 1) \times 0.5 = 2 \times L\% \times 0.5 = L\% \end{aligned}$$

Weshalb die Autoren die aufwändige erstere Formel wählen, ist nicht ersichtlich.

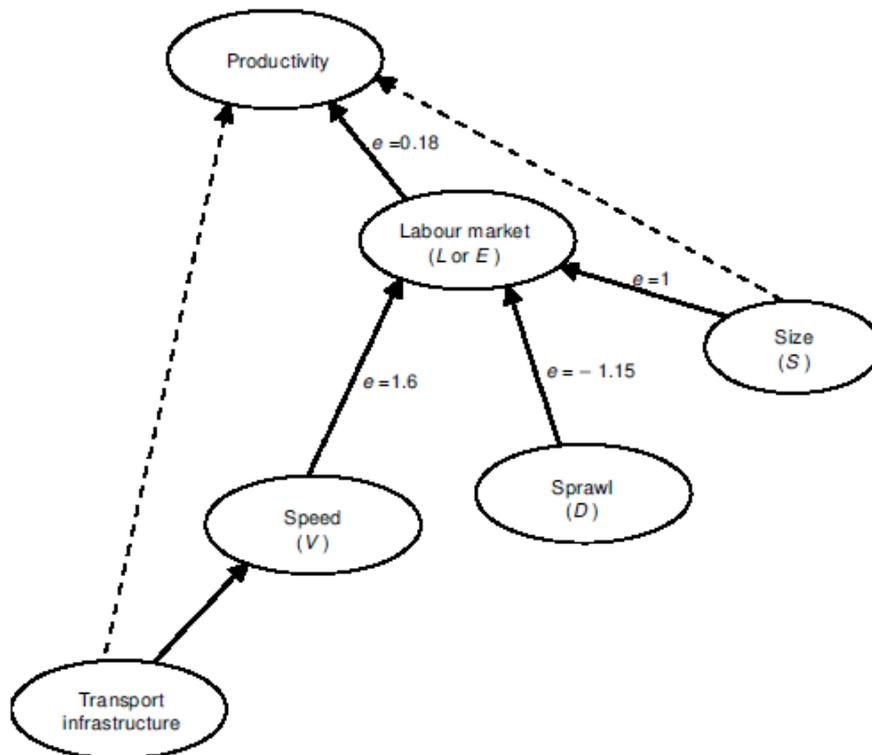
Von Fallah et al. (2011) wurden insgesamt 357 sogenannte *Metropolitan Statistical Areas* in den USA untersucht. Es wurde der natürliche Logarithmus des metropolitanen Bruttoinlandsprodukts geteilt durch die Anzahl metropolitaner Arbeitskräfte als abhängige Variable verwendet. Als erklärende Variablen wurden die Zersiedelung und Kontrollvariablen verwendet. Ein höherer Wert des Zersiedelungs-Indexes führte zu einer geringeren durchschnittlichen Arbeitsproduktivität. Die Elastizität betrug -0.13.

Prud'homme und Lee (1999) untersuchen drei mögliche bestimmende Faktoren von städtischer Effizienz (gemessen durch die Arbeitsproduktivität): Grösse, Transportgeschwindigkeit (als Messgrösse für die Effizienz des Verkehrssystems) und Zersiedelung („Sprawl“, verstanden als relative Lage von Arbeitsplätzen und Wohnungen, gemessen als durchschnittliche Distanz zwischen Wohnungen und Arbeitsplätzen). Es wird die These aufgestellt, dass diese drei Faktoren gemeinsam die effektive Grösse des Arbeitsmarktes bestimmen (durchschnittliche Anzahl Arbeitsplätze, die für die Arbeitenden in einer Stadt innerhalb einer bestimmten Zeit erreichbar sind). Und die effektive Grösse des Arbeitsmarktes wiederum sei eine wichtige erklärende Grösse für die Arbeitsproduktivität.

Die Auswertung von Daten zu drei südkoreanischen und 22 französischen Städten ergab eine durchschnittliche Elastizität der Produktivität für die Arbeitsmarktgrösse von 0.18. Aufgrund einer Analyse der 22 französischen Städte wurden zudem Elastizitäten der Arbeitsmarktgrösse

für Grösse, Zersiedelung und Reisegeschwindigkeit berechnet. Die entsprechenden Resultate sind in Abbildung 8 dargestellt.

Abbildung 8 Elastizitäten betreffend Arbeitsmarktgrösse



Quelle: Prud'homme und Lee (1999, 1857)

Durch einfache Multiplikation der Elastizitäten der Arbeitsmarktgrösse mit der Elastizität der Produktivität lassen sich die Elastizitäten der Produktivität für die Geschwindigkeit ($\epsilon = 0.288$), die Zersiedelung ($\epsilon = -0.207$) und die Grösse ($\epsilon = 0.180$) ermitteln.

Melo, Graham und Noland (2009) untersuchen in einer Meta-Analyse von 729 Elastizitäten aus 34 Studien zu Agglomerationseffekten die Gründe, weshalb die ermittelten Elastizitäten sich stark unterschieden. Sie kommen zum Schluss, dass die Merkmale der Studien respektive der Versuchsanordnung (z.B. berücksichtigte Länder, berücksichtigte Wirtschaftssektoren, Definition von Agglomerationseffekten) einen grossen Einfluss auf die ermittelten Elastizitäten haben. Ihre Ergebnisse legen nahe, dass Studien zu Agglomerationseffekten in ihrem Kontext betrachtet werden sollten und dass nicht von vornherein davon ausgegangen werden kann, dass Studienergebnisse auf andere Wirtschaftssektoren, Städte oder Länder übertragen werden können.

Trotz dieser Einschränkungen werden hier die Ergebnisse der erwähnten Studien als eine erste grobe Annäherung an das Thema verwendet. Eine ausgiebigere Recherche zum Thema Agglomerationseffekte wäre wünschenswert; insbesondere wäre die Frage interessant, ob es trotz der Einwände von Melo et al. (2009) allgemeingültige Zusammenhänge gibt, deren Grössenordnung sich aus einfach zu ermittelnden Daten ableiten lässt.

Auf weitere grundlegende Literatur zu Agglomerationseffekten wird in der kommentierten Bibliographie (Kapitel 11.2.5) verwiesen.

4.2.3 Zusammenfassung der Zusammenhänge und Elastizitäten

Tabelle 7 fasst die Ergebnisse zum Einfluss der gebauten Umwelt auf die Produktivität zusammen. Die Grösse einer Agglomeration oder Stadt wird in dieser Arbeit nicht als Eigenschaft der gebauten Umwelt betrachtet und entsprechend nicht aufgeführt.

Tabelle 7 Zusammenfassung der Elastizitäten der Arbeitsproduktivität für die gebaute Umwelt

Erklärende Variable	Cervero (2001): Makro-Analyse	Cervero (2001): Mikro-Analyse	Ciccone und Hall (1996)	Fallah et al. (2011)	Prud'homme und Lee (1999)
Beschäftigungsdichte	0.039	0.053	0.06		
Zersiedelungs-Index				-0.13	
Geschwindigkeit					0.288
Zersiedelung					-0.207

Quelle: Basierend auf Cervero (2001), Ciccone und Hall (1996), Fallah et al. (2011) und Prud'homme und Lee (1999)

Für die Beschäftigungsdichte wird der Durchschnittswert verwendet (0.051). Eine Verrechnung der Werte für den Zersiedelungs-Index und die Zersiedelung erscheint nicht angebracht, da sie trotz des ähnlichen Namens sehr unterschiedliche Aspekte messen.

4.3 Kosten der öffentlichen Dienste

4.3.1 Relevanz des Themas

Die Kosten für öffentliche Dienste sind für die Effizienz des Einsatzes öffentlicher Mittel und damit für die Maximierung der Wohlfahrt relevant. Wenn durch die Ausgestaltung der gebauten Umwelt die Kosten für die Erbringung der öffentlichen Dienste beeinflusst werden kann, ist dies also aus einfachen Effizienzgründen relevant für eine nachhaltige Entwicklung.

4.3.2 Stand des Wissens

Laut Hortas-Rico und Solé-Ollé (2010) ist der Einfluss, den die gebaute Umwelt auf die Kosten der lokalen öffentlichen Dienste ausübt, relativ schlecht erforscht. Die vorhandenen Studien untersuchen alle den Einfluss der Zersiedelung („sprawl“) und / oder der Dichte, um Schlüsse betreffend optimaler planerischer Entscheidungen für die Stadtentwicklung ziehen zu können. Die entsprechende Fragestellung lautet üblicherweise in etwa: „Was ist bezüglich Kosten der öffentlichen Dienste effizienter: Zersiedelung oder *New Urbanism* / kompakte Entwicklungen?“.

Die Resultate von zwei wichtigen Studien in diesem Bereich aus jüngerer Zeit (Carruthers und Ulfarsson, 2008; Hortas-Rico und Solé-Ollé, 2010) sollen hier vorgestellt werden. Beide kommen zum Ergebnis, dass Zersiedelung die Kosten zumindest einiger lokaler öffentlicher Dienste erhöht. Eine Studie, die den gegenteiligen Zusammenhang gefunden hat (Ladd, 1992), wird den Ergebnissen anschliessend gegenübergestellt und die Differenzen werden kurz besprochen. Zudem wird auf weitere relevante Studien verwiesen.

Carruthers und Ulfarsson (2008)

Carruthers und Ulfarsson (2008) untersuchen mit Daten aus den USA auf Ebene von Counties Zusammenhänge zwischen *Smart Growth* oder Zersiedelung und den öffentlichen Finanzen sowie das Ausmass dieses Zusammenhangs im Vergleich mit anderen Einflussgrössen. Die Daten basieren auf einem sehr aggregierten Massstab (County), und die Autoren warnen davor, sie ohne Überprüfung auf kommunalem oder nachbarschaftlichem Massstab anzuwenden, da innerhalb einer County eine grosse Heterogenität in der gebauten Umwelt bestehen kann. Zudem weisen sie auf die nicht vollständig berücksichtigten Effekte der Lage verschiedener politischer Entitäten zueinander und der Kooperation oder Konkurrenz zwischen ihnen hin. Zudem werden die Ausgaben und nicht die Kosten analysiert – allerdings werden die Ausgaben als gute indirekte Messgrösse für die Kosten angesehen. Trotz aller Einschränkungen

gen und aufgrund der wenigen verfügbaren Studien stellen die Ergebnisse eine wertvolle Grundlage zur groben Abschätzung der Wirkung der gebauten Umwelt auf die Ausgaben für öffentliche Dienste dar.

Abhängige Variablen

Von Carruthers und Ulfarsson (2008) wurden folgende Messgrössen für die Ausgaben verwendet:

Aggregiert:

- Totale direkte Ausgaben

Disaggregiert: Ausgaben für

- Bildung
- Feuerwehr
- Stadtentwicklung / Gemeinwesenarbeit und Wohnungsbau
- Bibliotheken
- Parks, Freizeiteinrichtungen und Kultur
- Polizei
- Strassen
- Abwasser
- Abfall

Erklärende Variablen

Folgende fünf Kategorien wurden von Carruthers und Ulfarsson (2008) als entscheidend für die Höhe der öffentlichen Ausgaben pro Einwohner angesehen:

- Gebaute Umwelt
- Politische Struktur
- Wachstum und Demographie
- Herkunft der Einkünfte
- Grösse und hierarchische Stellung der County

Diese Kategorien wurden weiter unterteilt (siehe Tabelle 8).

Tabelle 8 Erklärende Variablen für die Kosten der Infrastruktur und der öffentlichen Dienste bei Carruthers und Ulfarsson (2008).

Kategorie	Erklärende Variable	Einheit
Gebaute Umwelt	Dichte der entwickelten Fläche	Personen / entwickelter acre
	% der Fläche der County entwickelt	%
	Median der Liegenschaftswerte	\$
Politische Struktur	% der Gebäude vor 1940 gebaut	%
	Gemeinden pro Einwohner	pro 1000 Personen
	<i>Special districts</i> pro Einwohner	pro 1000 Personen
Wachstum und Demographie	Bevölkerungsveränderung	%
	Einkommen pro Einwohner	\$
	Anteil Weisse	%
	Anteil <5 Jahre alt	%
Herkunft der Einküfte	Durchschnittliche Haushaltsgrösse	Personen
	Anteil der Steuereinnahmen aus Vermögenssteuer	%
	Bundesstaatseinnahmen pro Einwohner	\$
	Gliedstaatseinnahmen pro Einwohner	\$
Grösse und hierarchische Stellung der County	Langzeitschulden pro Einwohner	\$
	Fläche der County	1000 acre
	Verhältnis Arbeitsplätze/Einwohner	%
	Durchschnittlicher Lohn im öffentlichen Dienst	\$
	Metropolitan	Dummy
Mikropolitan	Dummy	

Quelle: Carruthers und Ulfarsson (2008)

Elastizitäten

In Tabelle 9, Tabelle 10, Tabelle 11 und Tabelle 12 sind die Elastizitäten der relevanten erklärenden und abhängigen Variablen aus Carruthers und Ulfarsson (2008) dargestellt. Es werden nur erklärende Variablen zur gebauten Umwelt dargestellt (das Verhältnis Arbeitsplätze / Einwohner gehört zur in dieser Arbeit zur gebauten zählenden Raumstruktur).

Tabelle 9 Elastizitäten: Totale direkte Ausgaben der öffentlichen Hand

Erklärende Variable	Elastizität
Gebaute Umwelt	
Dichte der entwickelten Fläche	-0.0136
% der Fläche der County entwickelt	0.0246
Median der Liegenschaftswerte	0.0843
% der Gebäude vor 1940 gebaut	0.0337
Grösse und hierarchische Stellung der County	
Verhältnis Arbeitsplätze/Einwohner	0.2836

Quelle: Carruthers und Ulfarsson (2008)

Tabelle 10 Elastizitäten: Ausgaben für Bildung (1), Feuerwehr (2), Stadtentwicklung und Wohnungsbau (3)

Erklärende Variable	(1)	(2)	(3)
Gebaute Umwelt			
Dichte der entwickelten Fläche	-0.0345	n/s	0.1124
% der Fläche der County entwickelt	0.0128	0.0872	n/s
Median der Liegenschaftswerte	0.0813	n/s	-0.2463
% der Gebäude vor 1940 gebaut	-0.0303	0.1039	n/s
Grösse und hierarchische Stellung der County			
Verhältnis Arbeitsplätze/Einwohner	0.0624	0.6841	0.7240

n/s = nicht signifikant

Quelle: Carruthers und Ulfarsson (2008)

Tabelle 11 Elastizitäten: Ausgaben für Bibliotheken (4), Parks, Freizeiteinrichtungen und Kultur (5), Polizei (6)

Erklärende Variable	(4)	(5)	(6)
Gebaute Umwelt			
Dichte der entwickelten Fläche	n/s	-0.0362	-0.0222
% der Fläche der County entwickelt	0.0534	0.1048	0.0370
Median der Liegenschaftswerte	0.1966	0.1649	0.0968
% der Gebäude vor 1940 gebaut	n/s	n/s	n/s
Grösse und hierarchische Stellung der County			
Verhältnis Arbeitsplätze/Einwohner	0.6151	1.0197	0.3837

n/s = nicht signifikant

Quelle: Carruthers und Ulfarsson (2008)

Tabelle 12 Elastizitäten: Ausgaben für Strassen (7), Abwasser (8), Abfall (9)

Erklärende Variable	(7)	(8)	(9)
Gebaute Umwelt			
Dichte der entwickelten Fläche	-0.0562	n/s	n/s
% der Fläche der County entwickelt	0.0321	0.0718	n/s
Median der Liegenschaftswerte	0.1155	0.2035	n/s
% der Gebäude vor 1940 gebaut	0.1164	0.1451	n/s
Grösse und hierarchische Stellung der County			
Verhältnis Arbeitsplätze/Einwohner	0.2916	0.5946	0.5674

n/s = nicht signifikant

Quelle: Carruthers und Ulfarsson (2008)

Schlussfolgerungen und Bemerkungen

Carruthers und Ulfarsson (2008) zeigen, dass die Dichte der entwickelten Fläche einen negativen Effekt (=tiefere Kosten) auf folgende fünf Messgrössen für die öffentlichen Ausgaben

hat: Totale direkte Ausgaben, Bildung, Parks und Erholung, Polizei, Strassen. Bei weniger strikten Anforderungen an die statistische Signifikanz kommen Feuerwehr, Bibliotheken und Abwasser hinzu. Höhere Kosten verursacht die Dichte im Bereich Stadtentwicklung und Wohnungsbau. Der Prozentsatz der Fläche einer County, der entwickelt ist (=Ausbreitung), hat einen positiven Einfluss (= höhere Kosten) auf alle Messgrössen ausser Abfall und Stadtentwicklung und Wohnungsbau.

Zusammenfassend ziehen Carruthers und Ulfarsson (2008) den Schluss, dass Entwicklungen mit geringer Dichte und grosser räumlicher Ausbreitung (charakteristisch für Zersiedelung) höhere öffentliche Ausgaben pro Person verursachen als Entwicklungen mit höherer Dichte und geringerer Ausbreitung.

Die Ausdehnung (gemessen als prozentualer Anteil entwickelter Fläche) hat vor allem Einfluss auf zentralisierte Dienstleistungen, die bei stärkerer Verteilung mehrmals angeboten werden müssen, obschon dies die Anzahl Einwohner alleine nicht notwendig macht (Parks und Erholung, Feuerwehr, Bibliotheken, Polizei, Bildung) und auf lineare Infrastrukturen, die an zentrale Anlagen anschliessen (Abwasser, Strassen).

Zu bemerken ist, dass soziodemographische Faktoren einen wesentlich stärkeren Einfluss als die Dichte oder die Ausdehnung ausüben. Beispiele: Prozent der Bevölkerung jünger als 5 Jahre (+0.4065); durchschnittliche Haushaltgrösse (-0.7777); Verhältnis von Arbeitnehmern zu Einwohnern (+0.2836). Der Einfluss von Dichte und Ausdehnung ist trotz den vergleichsweise kleinen Werten relevant, da diese Faktoren im Vergleich zur Soziodemographie relativ einfach und direkt durch Massnahmen und Gesetze beeinflusst werden können. Im Beurteilungsmodell (siehe Kapitel 6) werden nur Elastizitäten zur gebauten Umwelt verwendet.

Hortas-Rico und Solé-Ollé (2010)

Hortas-Rico und Solé-Ollé (2010) untersuchen den Effekt der Zersiedelung („Sprawl“) auf die Kosten zur Bereitstellung öffentlicher Dienste anhand von Daten aus dem Jahr 2003 zu 2500 spanischen Gemeinden mit über 1000 Einwohnern (diese decken 85% der Bevölkerung und knapp 31 % der Gemeinden Spaniens ab). Sie berücksichtigen dabei 6 disaggregierte Bereiche der öffentlichen lokalen Ausgaben, bei denen sie eine starke Beeinflussung durch die Zersiedelung erwarten (diese umfassen etwa 70 % der lokalen Gesamtausgaben), sowie die totalen und die laufenden lokalen Ausgaben als aggregierte Grössen. Es werden erklärende Variablen für die Zersiedelung sowie Kontrollvariablen verwendet.

Die Studie untersucht im Gegensatz zu Carruthers und Ulfarsson (2008) nicht nur die Auswirkungen der Zersiedelung auf die Ausgaben für öffentliche Dienste, sondern auch auf die

Kosten für die Erbringung dieser Dienste. Dies, da die Nachfrage nach öffentlichen Diensten durch höhere Preise reduziert wird und also Unterschiede in den Ausgaben nicht als direkter Effekt gewertet werden dürfen. Es wird die Preiselastizität der Nachfrage als Koeffizient der Steuerbeteiligung (siehe Tabelle 13) im Modell mitberechnet; anschliessend wird diese verwendet, um den effektiven Kosteneffekt zu berechnen.

Abhängige Variablen

Von Hortas-Rico und Solé-Ollé (2010) wurden folgende Messgrössen für die Ausgaben verwendet:

Aggregiert:

- Lokale laufende Ausgaben
- Totale Ausgaben

Disaggregiert:

- Öffentliche Einrichtungen
- Grundinfrastruktur und Transport
- Wohnungsbau und Stadtentwicklung / Gemeinwesenarbeit
- Lokale Polizei
- Allgemeine Verwaltungskosten
- Kultur und Sport

Erklärende Variablen

Tabelle 13 zeigt die erklärenden Variablen, welche Hortas-Rico und Solé-Ollé (2010) verwenden. Wichtig ist, dass die zentrale Grösse zur Messung der Zersiedelung („Sprawl“), Entwickelte Fläche pro Einwohner, bei hohen Dichte tiefe Werte ergibt und umgekehrt; sie weicht also von der üblichen Konvention zur Messung der Dichte ab. Um eine mögliche, unter anderem von Ladd (1992) gefundene nicht-lineare Beziehung zwischen Dichte und Kosten der öffentlichen Dienste zu erfassen, wurde die entwickelte Fläche pro Einwohner zudem im Sinne einer stückweisen linearen Funktion in vier Bereiche unterteilt (<75, 75-160, 160-700, >700 m²/Einwohner). Die Berechnungen wurden jeweils ohne und mit dieser Unterteilung durchgeführt.

Tabelle 13 Erklärende Variablen für die Kosten der Infrastruktur und der öffentlichen Dienste bei Hortas-Rico und Solé-Ollé (2010).

Kategorie	Erklärende Variable	Einheit
Zersiedelung („Sprawl“)	Entwickelte Fläche pro Einwohner	m ² / Einwohner
	Anzahl Wohngebäude pro Einwohner	Anzahl / Einwohner
	% zerstreute Bevölkerung	%
	Anz. Wohnbevölkerungszentren pro EW	Anzahl / Einwohner
Demographie	Bevölkerung	Personen
	Anteil <5 Jahre alt	%
	Anteil 5-19 Jahre alt	%
	Anteil >65 Jahre alt	%
	Anteil ohne Ausbildung	%
	Anteil Akademiker	%
Aufgabenbereich	Aufgabenbereich 1 (> 5000 Einwohner)	Dummy
	Aufgabenbereich 2 (> 20000 Einwohner)	Dummy
	Aufgabenbereich 3 (> 50000 Einwohner)	Dummy
Soziale Kosten	Anteil Immigranten	%
	Anteil Arbeitslose	%
	Anteil alter Gebäude (vor 1950)	%
Ökonomische Kosten	Durchschnittslohn	€
	Zentrale Stadt	Dummy
	Teil eines Ballungsgebiets	Dummy
	Anteil Zweitwohnungen	%
	Touristen pro Einwohner	Personen / Einwohner
Steuerkraft	Einkommen (der Gemeinde) pro Einwohner	€
	Steuerbeteiligung	%
	Kurzfristige Transfers	€ / Einkommen
	Kapitaltransfers	€ / Einkommen

Zerstreute Bevölkerung:	Personen, die in Gebäuden leben, die nicht Teil eines Zentrums der Wohnbevölkerung sind.
Wohnbevölkerungszentren:	mind. 10 Gebäude, die zusammen Strassen und Plätze bilden.
Aufgabenbereich:	In Spanien variieren die Aufgaben der Gemeinden mit deren Einwohnerzahl.
Zentrale Stadt:	Provinzhauptstadt oder mehr als 100000 Einwohner
Steuerbeteiligung:	Steuerzahlung des repräsentativen Einwohners / Steuereinnahmen der Gemeinde pro Einwohner

Quelle: Hortas-Rico und Solé-Ollé (2010)

Elastizitäten

In Tabelle 14 sind die hinsichtlich der gebauten Umwelt relevanten aggregierten Ergebnisse zu Ausgaben (laufende Ausgaben, totale Ausgaben) aus der Studie von Hortas-Rico und Solé-Ollé (2010) zusammengefasst. Die Kontrollvariable Anteil alter Gebäude (vor 1950) misst zwar ebenfalls einen Aspekt der gebauten Umwelt, war aber nie statistisch relevant, weshalb sie nicht weiter berücksichtigt wird.

Tabelle 14 Elastizitäten: Laufende Ausgaben, totale Ausgaben, laufende Kosten (Preiselastizität = -0.4486 (linear), -0.4545(stückweise linear))

Erklärende Variable	Totale Ausgaben	Laufende Ausgaben	Laufende Kosten
Entw. Fläche linear berücksichtigt			
Entwickelte Fläche pro Einwohner	0.0617	0.0625	0.1133
Anzahl Wohngebäude pro Einwohner	n/s	0.0878	0.1592
% zerstreute Bevölkerung	0.0058	n/s	n/s
Anz. Wohnbevölkerungszentren pro EW	-0.0485	-0.0554	-0.1016
Entw. Fläche stückweise linear berücksichtigt			
Entw. Fläche pro EW (<75)	0.1207	0.1456	0.2669
Entw. Fläche pro EW (75-160)	0.0788	0.0738	0.1353
Entw. Fläche pro EW (160-700)	n/s	0.0311	0.0570
Entw. Fläche pro EW (>700)	0.1393	0.1281	0.2348
Anzahl Wohngebäude pro Einwohner	n/s	0.0879	0.1611
% zerstreute Bevölkerung	0.0054	0.0027	0.0049
Anz. Wohnbevölkerungszentren pro EW	-0.0480	-0.0551	-0.1010

n/s = nicht signifikant

Quelle: Hortas-Rico und Solé-Ollé (2010)

Zum Vergleich der Ergebnisse von Hortas-Rico und Solé-Ollé (2010) mit denjenigen von Carruthers und Ulfarsson (2008) werden in Tabelle 15 die Auswirkungen der gebauten Umwelt bei Hortas-Rico und Solé-Ollé (2010) auf die einzelnen Kostenbereiche dargestellt. Dabei wird nur die lineare Berücksichtigung der entwickelten Fläche berücksichtigt (da Carruthers und Ulfarsson (2008) die Dichte nur linear berücksichtigen).

Tabelle 15 Elastizitäten: Ausgaben in einzelnen Bereichen

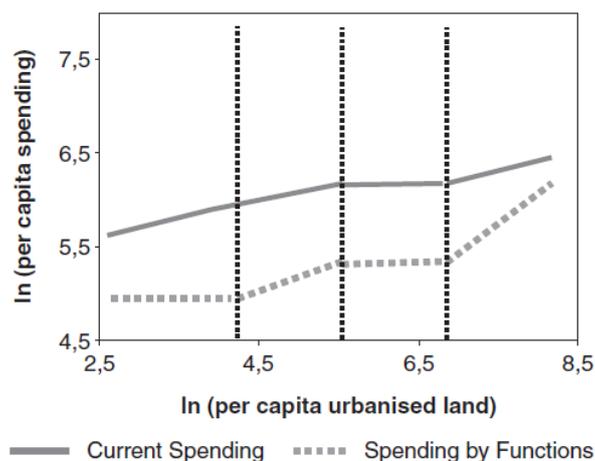
Ausgabenbereich	Entw. Fläche / EW	Wohngebäude / EW	% zerstreute Bevölkerung	Wohnbev.- zentren / EW
Öffentliche Einrichtungen	0.0669	n/s	0.0058	-0.0485
Grundinfr. und Transport	0.1228	-0.2094	n/s	0.0542
Wohnungsbau & Stadtentw.	n/s	0.1618	n/s	-0.0694
Lokale Polizei	0.0913	0.3582	0.0291	-0.1428
Allg. Verwaltungskosten	0.0724	n/s	n/s	-0.0596
Kultur und Sport	0.0793	n/s	n/s	-0.0807

n/s = nicht signifikant

Quelle: Hortas-Rico und Solé-Ollé (2010)

Abbildung 9 zeigt den Verlauf der Ausgaben bei Berücksichtigung der entwickelten Fläche mit einer stückweise linearen Funktion. Eine Berücksichtigung in der Folge wäre zwar wünschenswert, würde aber einen Vergleich mit der Studie von Carruthers und Ulfarsson (2008) stark erschweren.

Abbildung 9 Stückweise lineare Funktion der laufenden Ausgaben und der Ausgaben in den sechs disaggregierten Bereichen.



Quelle: Hortas-Rico und Solé-Ollé (2010, 1532)

Schlussfolgerungen und Bemerkungen

Hortas-Rico und Solé-Ollé (2010) erklären die erhöhten Kosten bei geringeren Dichten damit, dass eine stärkere Verteilung der Bevölkerung die Nutzung von Skaleneffekten verunmöglicht.

Die eher überraschende Wirkung der Anzahl Wohnbevölkerungszentren pro Einwohner auf sämtliche Ausgaben ausser Grundinfrastruktur und Transport erklären Hortas-Rico und Solé-Ollé (2010) damit, dass mehrere vorhandene Bevölkerungszentren in einer Gemeinde auf Siedlungen mit hohem Anteil Zweitwohnungen zurückzuführen sein könnten, deren Nutzer kein Wahlrecht in der Gemeinde haben und entsprechend keine politische Priorität geniessen was die Bereitstellung öffentlicher Dienste betrifft.

Die Ergebnisse von Hortas-Rico und Solé-Ollé (2010) legen nahe, dass Entwicklungen mit tieferer Dichte zu insgesamt höheren Kosten für die Bereitstellung öffentlicher Dienste führen. Sie anerkennen, dass diese höheren Kosten durchaus gerechtfertigt sein könnten, wenn die Entwicklungen die Bedürfnisse der Nutzer besser erfüllen und die höheren Kosten entsprechend von diesen akzeptiert und gedeckt werden. Probleme sehen sie vor allem, wenn nicht alle generierten Kosten internalisiert werden, also z.B. die gesamte Bevölkerung einer Gemeinde mit höheren Steuerzahlungen die höheren Kosten für öffentliche Dienste in gewissen Entwicklungen begleichen muss.

Zudem wird darauf hingewiesen, dass höhere Kosten alleine noch keine Schlüsse zur Entwicklung der finanziellen Lage einer Gemeinde zulassen, da Entwicklungen mit geringer Dichte möglicherweise zu höheren Einkünften aus dem Verkauf öffentlichen Lands und mit dem Bau von Gebäuden verbundenen Steuern und Gebühren führen könnten. Eine abschliessende Beurteilung der gesamten Auswirkungen der Zersiedelung auf die Finanzen einer Gemeinde sei mit dem heutigen Stand des Wissens noch nicht möglich.

Weitere Studien und Diskussion

Bereits 1992 hatte Ladd (1992), wenn auch mit wesentlich kleinerer Datenbasis, ähnliche Zusammenhänge wie die beiden vorgestellten Studien untersucht und kam zum Ergebnis, dass ein U-förmiger Zusammenhang zwischen der Anzahl Personen pro Fläche eines Counties (nicht entwickelte Fläche!) und den öffentlichen Ausgaben pro Einwohner besteht. Die tiefsten Ausgaben traten bei einer Dichte von rund 250 Personen pro Quadratmeile (= ca. 0.97 Personen pro ha) auf. Da diese „optimale“ Dichte sehr tief ist, folgert Ladd (1992), dass in den allermeisten Fällen eine höhere Dichte zu höheren Ausgaben der öffentlichen Hand pro Einwohner führt.

Laut Hortas-Rico und Solé-Ollé (2010) erklärt Ladd (1992) den von ihr gefundenen Zusammenhang unter anderem mit sozialen Faktoren, wie zunehmender Armut oder Kriminalität bei höherer Dichte („for moderately populated counties an increase in population density apparently creates a harsher environment for, and thereby raises the costs of, providing public services“ (Ladd, 1992, 292)). Die unterschiedlichen Ergebnisse werden von Hortas-Rico und Solé-Ollé (2010) damit erklärt, dass Ladd (1992) grobe Daten (überbautes und überbaubares Land gemeinsam auf County-Ebene) verwendet, während Hortas-Rico und Solé-Ollé (2010) über eine sehr viel feinere Datengrundlage verfügen (tatsächlich überbautes Land auf Gemeindeebene) und dass letztere die Kosten und nicht nur die Ausgaben untersuchen. Zusätzlich wird Ladd (1992) ein Mangel an Kontrollvariablen vorgeworfen, was aber schwer nachvollziehbar ist (es wurden ähnliche Variablen wie in den beiden besprochenen Studien verwendet). Die beiden übrigen Unterscheidungen sind zwar vorhanden, erklären aber nicht die Unterschiede zwischen Ladd (1992) und Carruthers und Ulfarsson (2008), die ebenfalls Daten auf County-Ebene und Ausgaben und nicht Kosten als Ergebnis verwenden.

Die Ergebnisse von Hortas-Rico und Solé-Ollé (2010) und Carruthers und Ulfarsson (2008) sind nicht direkt vergleichbar. Es wurden unterschiedliche Massstäbe (Gemeinden, Counties), erklärende und abhängige Variablen verwendet. Zudem unterscheiden sich die öffentlichen Aufgaben der Gemeinden und Counties der beiden untersuchten Länder, weshalb grosse Unterschiede hinsichtlich der absoluten Beträge der Ausgaben pro Einwohner pro Bereich vorhanden sind. Zudem ist zu beachten, dass unterschiedliche Messgrößen für die Dichte verwendet wurden. Trotz eingeschränkter Vergleichbarkeit zeigen die Resultate in beiden Fällen aber eine ähnliche Tendenz auf: Dichte reduziert die Ausgaben für die Erbringung öffentlicher Dienste.

Der wesentlich stärkere Einfluss, den die Dichte in der spanischen Studie ausübt, kann wahrscheinlich dadurch erklärt werden, dass die übrigen Messgrößen von Carruthers und Ulfarsson (2008) wesentlich stärkere Erklärungskraft im Modell haben. Insbesondere scheint die Ausbreitung wichtig zu sein – gemäss Carruthers und Ulfarsson (2008) sind Dichte und Ausbreitung zwei verschiedene Dinge und haben jeweils einen eigenständigen Einfluss auf die öffentlichen Ausgaben – und diese wird bei Hortas-Rico und Solé-Ollé (2010) nicht als erklärende Variable berücksichtigt. Eine weitere Erklärung könnte in den geringeren Dichten in den USA liegen, sollte wie von Hortas-Rico und Solé-Ollé (2010) gezeigt ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen Dichte und Ausgaben bestehen (siehe Abbildung 9).

Rickwood et al. (2008) bestätigen, dass eine höhere Dichte zu kleineren Infrastrukturkosten pro Einwohner führt; allerdings kann die Frage nicht eindeutig beantwortet werden, ob die entsprechende Funktion monoton (unbegrenzte Zunahme der Effizienz mit höherer Dichte)

oder U-förmig verläuft (Vorhandensein einer optimalen Dichte), auch wenn die Autoren letzteres vermuten.

Edwards und Xiao (2009) untersuchen zwar nicht direkt den Einfluss der gebauten Umwelt auf die öffentlichen Ausgaben, sondern die Folgen von Eingemeindungen in den USA für die finanzielle Situation von Gemeinden. Dabei weisen sie aber einen wichtigen Einfluss der Dichte auf die öffentlichen Finanzen nach. Eine Erhöhung der Landfläche einer Gemeinde führt zwar zu geringeren Ausgaben (Elastizität = -0.17), gleichzeitig führt eine tiefere Dichte aber zu einer stärkeren Erhöhung der Ausgaben (Elastizität = -0.29). Die gefundene Elastizität ist aufgrund der groben Messgrösse (Einwohner pro Fläche der Gemeinde) nicht direkt weiter nutzbar, bestätigt aber den Trend der beiden ausführlich besprochenen Studien.

Für die Schweiz wurde in einer breit angelegten Studie zum Thema „Siedlungsentwicklung und Infrastrukturkosten“ (ARE, 2000; Ecoplan, 2000) ermittelt, dass die Zersiedelung kostensteigernde Auswirkungen auf die Infrastruktur hat. Eine räumlich disperse Siedlungsentwicklung könne in den Bereichen Wasserversorgung, Abwasserentsorgung, Verkehrserschliessung und Stromversorgung zu bis zu dreimal höheren Kosten pro Kopf führen als eine verdichtete Siedlungsentwicklung nach innen. Ebenfalls angesprochen wird die von Hortas-Rico und Solé-Ollé (2010) angesprochene fehlende Internalisierung dieser höheren Kosten. Die angesprochenen Infrastrukturbereiche sind wichtige Teile der Erbringung öffentlicher Dienste; die Resultate geben daher einen Hinweis auf den möglichen Zusammenhang zwischen Siedlungsform und öffentliche Ausgaben.

Insgesamt scheint ein relativ breiter Konsens zum Zusammenhang zwischen Dichte und öffentlichen Ausgaben zu bestehen. Allerdings sind die abweichenden Resultate von Ladd (1992) nicht abschliessend zu erklären.

Lieske, McLeod, Coupal und Srivastava (2012) untersuchen ebenfalls den Einfluss der gebauten Umwelt auf die Kosten der Bereitstellung öffentlicher Dienste. Ihre Studie berücksichtigt nur Ausgaben respektive Kosten der öffentlichen Sicherheit (lokale Polizei) in Albany County, Wyoming, USA – entsprechend sind ihre Resultate nicht dazu geeignet, den allgemeinen Einfluss der gebauten Umwelt auf die öffentlichen Ausgaben zu beurteilen (auch wenn sie ebenfalls aufzeigen, dass die gebaute Umwelt einen signifikanten Einfluss auf die Ausgaben hat; schwächere Clusterung führt zu höheren Ausgaben, und je schwächer die Clusterung, desto stärker die Zunahme der Ausgaben). Vielmehr stellt ihre Studie eine neue Untersuchungsmethode vor, die sehr vielversprechend ist. Es wurde ein räumlicher Index entwickelt, der die gebaute Umwelt weitergehend charakterisiert als die Dichte oder Distanzen. Dieser Index basiert auf dem Moran's I Wert und misst die Intensität der gebauten Umwelt pro Flä-

chennutzungskategorie und wird als erklärende Variable in einem ökonometrischen Modell eingesetzt, welches auf Produktions- und Verteilungsfunktionen für öffentliche Dienste basiert. Dadurch lässt sich die finanzpolitische Effizienz räumlich explizit ermitteln (entsprechend der verwendeten räumlichen Auflösung). Weitere Ergebnisse, welche auf dieser Methode basieren, könnten wesentlich genauere Resultate als die vorgängig aufgezeigten Studien produzieren sowie das Verständnis zu den entscheidenden Einflussfaktoren der gebauten Umwelt auf die Kosten der Bereitstellung öffentlicher Dienste vertiefen.

4.3.3 Zusammenfassung der Zusammenhänge und Elastizitäten

Abhängige Variablen

Es werden vereinfachend nur die totalen lokalen Ausgaben berücksichtigt.

Erklärende Variablen

Es werden möglichst alle erklärenden Variablen aus beiden Studien verwendet. Es gibt neben der Hauptmessgrösse (Dichte) keine Übereinstimmung zwischen den Variablen der beiden Studien.

- Dichte der entwickelten Fläche / Entwickelte Fläche pro Einwohner
- % der Fläche der County entwickelt
- Median der Liegenschaftswerte
- % der Gebäude vor 1940 gebaut
- Durchschnittliche Haushaltsgrösse
- Verhältnis Arbeitsplätze/Einwohner
- Anzahl Wohngebäude pro Einwohner
- % zerstreute Bevölkerung
- Anz. Wohnbevölkerungszentren pro EW

Um die die Hauptmessgrösse der gebauten Umwelt (Dichte) vergleichen zu können, müssend die unterschiedlichen Einheiten der beiden Studien zuerst vereinheitlicht werden. Da die Dichte üblicherweise in Einheiten / Fläche gerechnet wird, soll die von Hortas-Rico und Solé-Ollé (2010) verwendete Einheit [Fläche / EW] in die übliche Einheit der Dichte [EW / Fläche] übertragen werden. Dies geschieht einfach durch:

$$Dichte = \frac{1}{Entwickelte\ Fläche\ pro\ EW}$$

Elastizitäten

Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, muss die Elastizität für die entwickelte Fläche pro Einwohner in die Elastizität für die Dichte umgerechnet werden. Bei der Erläuterung dieser Umrechnung gelten folgende Bezeichnungen:

D	Dichte
F	Entwickelte Fläche pro Einwohner
A	Ausgaben
δ	Prozentualer Unterschied
ε	Elastizität

Es gilt:

$$D = \frac{1}{F}, \quad F = \frac{1}{D}$$

Der prozentuale Unterschied δ_D zwischen zwei Dichten D_1 und D_2 beträgt:

$$\delta_D = \frac{D_2 - D_1}{D_1}$$

Analog beträgt der prozentuale Unterschied δ_F zwischen zwei Werten für die entwickelte Fläche pro Einwohner F_1 und F_2 :

$$\delta_F = \frac{F_2 - F_1}{F_1}$$

Mit der Formel $F = \frac{1}{D}$ ergibt dies:

$$\delta_F = \frac{\frac{1}{D_2} - \frac{1}{D_1}}{\frac{1}{D_1}} = \frac{D_1}{D_2} - 1$$

In diese Formel kann für D_2 eingesetzt werden:

$$\delta_D = \frac{D_2 - D_1}{D_1} \rightarrow D_2 = \delta_D \times D_1 + D_1$$

Woraus sich ergibt:

$$\delta_F = \frac{D_1}{\delta_D \times D_1 + D_1} - 1 = \frac{D_1}{D_1(\delta_D + 1)} - 1 = \frac{1}{\delta_D + 1} - 1 = \frac{1}{\delta_D + 1} - \frac{\delta_D + 1}{\delta_D + 1} = -\frac{\delta_D}{\delta_D + 1}$$

Die Elastizität der Ausgaben für die Dichte ε_D beträgt:

$$\varepsilon_D = \frac{\delta_A}{\delta_D}$$

Analog beträgt die Elastizität der Ausgaben für die entwickelte Fläche pro Einwohner ε_F :

$$\varepsilon_F = \frac{\delta_A}{\delta_F} \rightarrow \delta_A = \varepsilon_F \times \delta_F$$

Durch Einsetzen des Terms für δ_A in die Formel für ε_D und Ersetzen von δ_F mit dem entsprechenden Term weiter oben erfolgt die Umrechnung der Elastizität der Ausgaben für die entwickelte Fläche pro Einwohner ε_F in die Elastizität der Ausgaben für die Dichte ε_D :

$$\varepsilon_D = \frac{\delta_A}{\delta_D} = \frac{\varepsilon_F \times \delta_F}{\delta_D} = \frac{\varepsilon_F \left(-\frac{\delta_D}{\delta_D + 1} \right)}{\delta_D} = -\frac{\varepsilon_F \times \delta_D}{\delta_D(\delta_D + 1)} = -\frac{\varepsilon_F}{\delta_D + 1}$$

Dies bedeutet, dass die Elastizität von der prozentualen Veränderung der Dichte abhängt. Entsprechend können die Werte nicht allgemeingültig in eine einfache Zahl übertragen werden. Allerdings kann für kleine prozentuale Veränderungen der Dichte δ_{Dichte} näherungsweise der negative Wert der Elastizität der entwickelten Fläche pro Einwohner $\varepsilon_{entw.}$ als Elastizität der Dichte ε_{Dichte} verwendet werden.

Tabelle 16 zeigt zusammenfassend die relevanten Elastizitäten auf. Die Messgrösse „Anzahl Wohngebäude pro Einwohner“ aus Hortas-Rico und Solé-Ollé (2010) war für die totalen Ausgaben nicht statistisch signifikant, weshalb sie hier nicht aufgeführt wird.

Tabelle 16 Zusammenfassung der Elastizitäten der totalen lokalen Ausgaben für die gebaute Umwelt

Erklärende Variable	Carruthers und Ulfarsson (2008)	Hortas-Rico und Solé-Ollé (2010)
Gebaute Umwelt i.e.S.		
Dichte der entwickelten Fläche	-0.0136	$= -\frac{0.0617}{\delta_{Dichte} + 1}$
% der Fläche der County entwickelt	0.0246	
% der Gebäude vor 1940 gebaut	0.0337	
% zerstreute Bevölkerung		0.0058
Anz. Wohnbevölkerungszentren pro EW		-0.0485
Zusätzliche relevante Grössen		
Median der Liegenschaftswerte	0.0843	
Durchschnittliche Haushaltsgrösse	-0.7777	
Verhältnis Arbeitsplätze/Einwohner	0.2836	
Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf Carruthers und Ulfarsson (2008) und Hortas-Rico und Solé-Ollé (2010)		

Die Elastizität für die Dichte aus Hortas-Rico und Solé-Ollé (2010) beträgt für kleine Veränderungen der Dichte näherungsweise -0.0617. Eine Verrechnung mit dem Wert von Carruthers und Ulfarsson (2008) erscheint für eine grobe Abschätzung von Grössenordnungen gerechtfertigt. Entsprechend wird in der Folge der gerundete Durchschnittswert von -0.04 verwendet.

4.4 Materialintensität der Infrastruktur

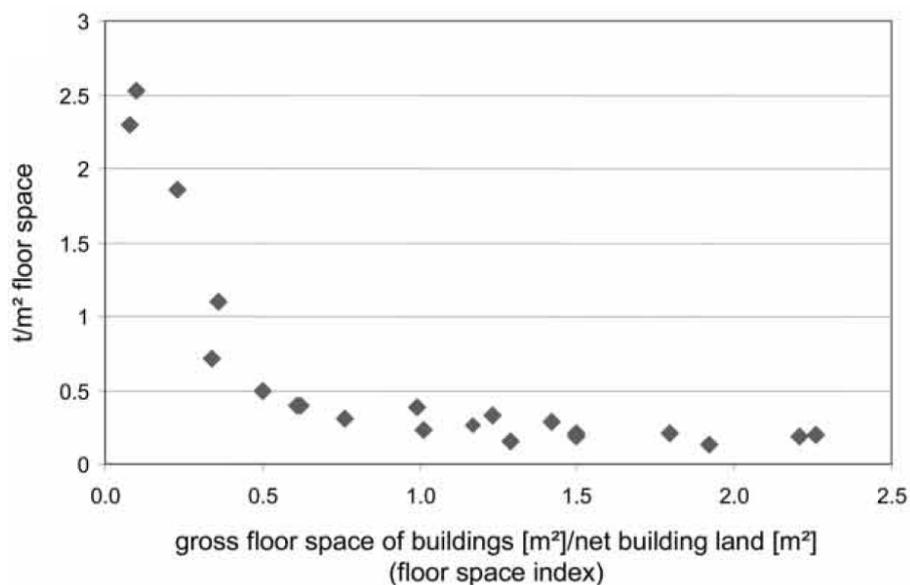
4.4.1 Relevanz des Themas

Städtische Infrastrukturen sind langlebig und kapitalintensiv. Wie Schiller (2007) zeigt, beinhalten sie einen wesentlichen Teil der Masse der gebauten Umwelt; ihre Erstellung bindet daher natürliche Ressourcen (v.a. mineralische Rohstoffe). Zudem ist die Materialintensität auch eine indirekte Messgrösse für den Erstellungs-, Unterhalts- und Abbruchaufwand sowie die graue Energie.

4.4.2 Stand des Wissens

Schiller (2007) zeigt, dass zahlreiche Studien einen Zusammenhang zwischen Geschossflächenzahl („floor space index“ = Geschossfläche / Grundstücksfläche) und dem Anteil der Infrastruktur an der gesamten gebauten Masse (Gebäude + Infrastruktur) nachgewiesen haben. Eine geringere Dichte führt zu einem höheren Anteil der Infrastruktur an der gesamten Masse, wobei der Zusammenhang unterhalb einer Geschossflächenzahl von 0.5 exponentiell zu verlaufen scheint (siehe Abbildung 10).

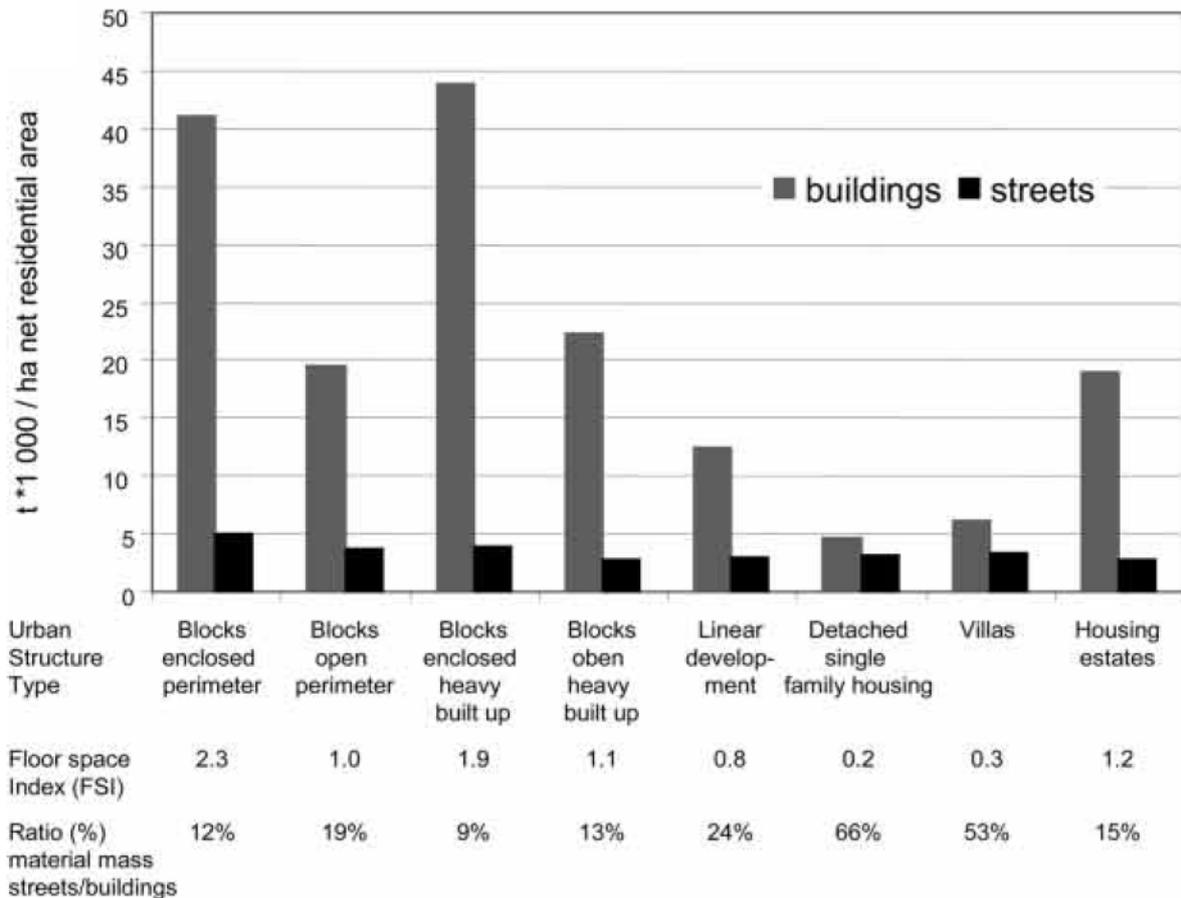
Abbildung 10 Material der Strassen und Gehsteige in t / m² Geschossfläche in Wohngebäuden abhängig von der Geschossflächenzahl („floor space index“)



Quelle: Schiller (2007, 402)

Abbildung 11 zeigt die Massenanteile der Infrastruktur und der Wohngebäude für verschiedene Typologien.

Abbildung 11 Material der Strassen und Gehsteige in 1000 t / m² Geschossfläche in Wohngebäuden abhängig von der Gebäudetypologie



Quelle: Schiller (2007, 402)

Schiller (2007) benutzt die aufgezeigten Zusammenhänge zur Entwicklung eines Modells zur Bestimmung des Infrastrukturbedarfs (Masse) künftiger Siedlungsentwicklungsszenarien auf Bundesebene in Deutschland. Stehen Informationen zur jeweiligen Strasseninfrastruktur zur Verfügung, ist eine einfachere, wesentlich direktere Bestimmung der Materialintensität möglich. In diesem Sinne gehen Quinn und Fernandez (2010) sowie Quinn, Wiesmann und Sarralde (2011) vor. Sie berechnen die Materialintensität pro Einwohner ausgehend von der Strassenoberfläche mithilfe von Annahmen zu Bauweise und Materialstärke (z.B. aus Normen abhängig vom Strassentyp), wobei sie nur lokale Strassen direkt den Bewohnern eines Quartiers zurechnen.

Laut Schiller (2007) beträgt die Masse der Versorgungs- und Entsorgungsinfrastrukturen (Wasser, Abwasser, Gas) etwa 10 % der Masse der Strasseninfrastruktur. Allerdings könne

diese Zahl je nach Ausprägung der gebauten Umwelt variieren und die Datengrundlage sei zu klein, um allgemeingültige Aussagen treffen zu können.

Ein Life Cycle Assessment (LCA, Ökobilanz) würde es erlauben, die Auswirkungen der Infrastruktur auf die Umwelt genau zu bestimmen. Allerdings gibt es dabei zahlreiche praktische Hindernisse im Kontext dieser Arbeit (siehe Kapitel 5.2).

4.5 Energieverbrauch des Gebäudeparks

4.5.1 Relevanz des Themas

Wie in Kapitel 4.1.1 erwähnt, bildet der Energieverbrauch das Ausmass vieler Umweltauswirkungen wie z.B. Treibhauseffekt und Luftverschmutzung pauschal ab (SIA, 2004; Lenzen et al., 2008).

Baccini (1997) kommt zum Schluss, dass der Gebäudepark und das Grund-/Ausgangsmaterial der Energietransformation die entscheidenden Faktoren dafür sind, wie nachhaltig eine Stadt ist. Ein Grund dafür ist insbesondere, dass der Gebäudepark sehr langsam transformiert wird (1 – 2 % pro Jahr). Entsprechen müsse der Fokus für eine künftige nachhaltige bauliche Entwicklung auf der Transformation des Bestandes liegen.

Ebenfalls mit der Erneuerungsrate der gebauten Umwelt argumentiert Schiller (2007); sie beträgt in Industriestaaten zwischen 0.7 % (Deutschland, 2002, Vereinigtes Königreich, 2002) und 2.8 % (Japan, 1997).

Laut Weisz und Steinberger (2010) sind Gebäude der grösste einzelne Endverbraucher von Energie weltweit. Gebäude verursachen zudem auch grosse Stoffflüsse und bilden grosse Lager an Stoffen. Bergsdal, Brattebo, Bohne und Mueller (2007) bezeichnen den Bausektor als einen der Hauptproduzenten von Abfall und einen der Hauptkonsumenten von Primärressourcen.

4.5.2 Stand des Wissens

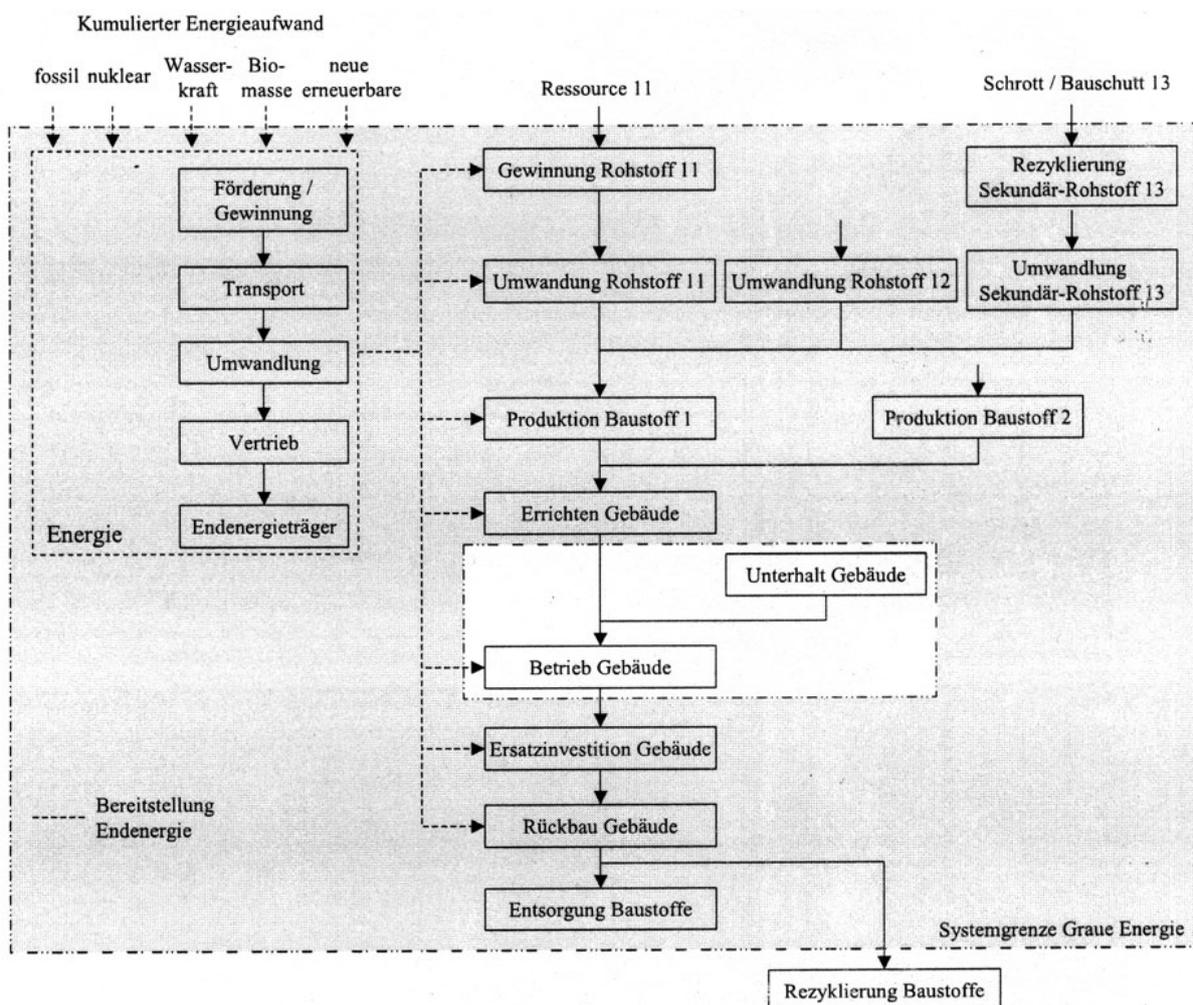
Bei der Untersuchung des Betrags des Gebäudeparks zum Energieverbrauch ist laut Weisz und Steinberger (2010) grob eine Unterscheidung in betriebliche („operational“) und graue („embodied“) Energie vorzunehmen.

Die graue Energie eines Gebäudes wird wie folgt definiert:

„Gesamte Menge nicht erneuerbarer Primärenergie, die für alle vorgelagerten Prozesse, vom Rohstoffabbau über Herstellungs- und Verarbeitungsprozesse und für die Entsorgung, inkl. der dazu notwendigen Transporte und Hilfsmittel, erforderlich ist.“ (SIA, 2010, 8)

Abbildung 12 zeigt anschaulich die Energie im Lebenszyklus eines Gebäudes. Der grau hinterlegte Bereich repräsentiert dabei die graue Energie, während der weisse Bereich in der Mitte der betrieblichen Energie entspricht.

Abbildung 12 Energie im Lebenszyklus eines Gebäudes



Quelle: SIA (2010, 11)

Der betriebliche Energieverbrauch von Gebäuden ist laut Weisz und Steinberger (2010) eine Funktion des Klimas, der Qualität des Gebäudeparks, der urbanen Form und der spezifischen Flächeninanspruchnahme für Wohn- und geschäftliche Zwecke. Letztere wiederum ist eine

Funktion des Einkommens und der Lage. So werden z.B. häufig Qualitätsgewinne der Baustanz, welche durch höhere Einkommen finanziert werden und zu einem geringeren Energieverbrauch pro Fläche führen, durch eine höhere spezifische Flächeninanspruchnahme kompensiert. Ebenfalls eine wichtige Rolle spielen Gewohnheiten und Ansprüche der Nutzer, z.B. auf welche Temperatur ein Innenraum geheizt oder gekühlt wird.

Der betriebliche Energieverbrauch von Gebäuden übertrifft gemäss Weisz und Steinberger (2010) die graue Energie von Gebäuden um ein Vielfaches. Diese Aussage deckt sich jedoch nicht mit den Erkenntnissen des SIA (2010), wonach moderne Niedrigenergiehäuser in der Schweiz einen durchschnittlichen betrieblichen Energieverbrauch von etwa 40 MJ pro m² Energiebezugsfläche (EBF) und Jahr haben, wohingegen die auf die Nutzungsdauer umgerechnete graue Energie im Schnitt 80 – 100 MJ pro m² Geschossfläche und Jahr beträgt. Häufig wird viel in einen kleineren betrieblichen Energieverbrauch investiert, was aber die graue Energie erhöht. Deshalb, und weil die Entwicklung des Gebäudeparks in Zukunft weiter in Richtung Niedrigenergiebauweise gehen dürfte, „gewinnt die graue Energie eines Gebäudes als ein Aspekt zur Beurteilung der ökologischen Nachhaltigkeit zunehmend an“ (SIA, 2010, 4). Um eine energetische Optimierung zu erreichen, müsse unbedingt die Summe aus grauer und betrieblicher Energie betrachtet werden, eine einseitige Optimierung könne zu suboptimalen Ergebnissen führen.

Laut dem SIA (2010) sind Gebäudeform und –grösse die wichtigsten Einflussgrössen für die graue Energie eines Gebäudes, während der Einfluss der Materialisierung wesentlich geringer ist.

Ein eindeutiger Zusammenhang besteht laut Rickwood et al. (2008) zwischen spezifischer Wohnfläche und sowohl grauer Energie als auch betrieblichem Energieverbrauch (mehr Material, mehr Fläche zu beheizen/kühlen). Ebenfalls klar ist gemäss Rickwood et al. (2008), dass sehr hohe Gebäude (ab ca. 7 bis 11 Geschossen) die höchste Menge an grauer Energie pro nutzbare Geschossfläche aufweisen, da ihre Konstruktion materialintensiv ist und ihre Errichtung und Entsorgung aufwändig sind.

Ob Einfamilienhäuser aufgrund der grösseren spezifischen Oberfläche prinzipiell ineffizienter im Gebrauch sind, konnte laut Rickwood et al. (2008) bisher nicht eindeutig nachgewiesen werden (zu viele Faktoren ausser dem Volumen spielen eine Rolle).

Ebenfalls unklar ist, ob ein grundsätzlicher Zusammenhang zwischen Dichte und grauer Energie und / oder betrieblichem Energieverbrauch besteht. Weisz und Steinberger (2010) kommen in ihrem Review zum Schluss, dass der betriebliche Gesamtenergieverbrauch von Gebäuden mit höherer Dichte abnimmt. Rickwood et al. (2008) hingegen kommen in ihrem

Review zu keinem eindeutigen Schluss. Einige der in den Reviews berücksichtigten Studien haben den fraglichen Zusammenhang zwar bei Wohngebäuden festgestellt, allerdings wurde eine Kausalität dieses Zusammenhangs nicht schlüssig belegt. Sehr viele Einflussfaktoren müssten dafür als Kontrollvariablen überprüft werden, insb. soziodemographische Faktoren. So besteht eine Korrelation der Lage einer Wohnung mit deren Grösse und damit über die spezifische Wohnfläche mit dem Heiz- und Kühlenergieverbrauch, allerdings auch mit dem Einkommen. Unterschiedliche Quartiere haben eine unterschiedliche Dichte, und weniger dichte Quartiere verfügen in der Regel über grössere Wohneinheiten. Allerdings dürfte das erwähnte Einkommen, das gerade in weniger dichten Quartieren häufig höher als in dichten ist, ein wesentlich wichtigerer Einflussfaktor sein als Dichte selbst. Diese könnte also eher eine Folge des Einkommens sein, welches gleichzeitig die spezifische Wohnfläche und damit die graue Energie und den betrieblichen Energieverbrauch beeinflusst. Ebenfalls konnte nicht abschliessend bestimmt werden, ob der Typus einer Behausung an sich einen eindeutigen Einfluss auf den Energieverbrauch während des Betriebs hat.

Ähnlich wie bei der Materialintensität der Infrastruktur (Kapitel 4.4) besteht die Möglichkeit, die graue Energie des Gebäudeparks über eine direkte Erfassung der Grundflächen und der Höhe oder der Geschossflächen und (z.B. an Gebäudenutzungen geknüpfte) Annahmen zur Materialintensität pro Volumen zu berechnen. Gebäudeparkstudien, Gebäudestatistiken und Normen bieten sich dafür als Datengrundlage an. Sie erlauben theoretisch ebenfalls Aussagen zum betrieblichen Energieverbrauch pro Geschossfläche, wiederum abhängig von gewissen Faktoren wie dem Alter, dem Typus und der Nutzung eines Gebäudes.

Auch beim Gebäudepark würde ein LCA die Bestimmung aller Auswirkungen auf die Umwelt erlauben; dies würde sowohl betriebliche als auch graue Energie beinhalten. Auf praktische Hindernisse im Kontext dieser Arbeit wird in Kapitel 5.2 eingegangen.

Zur Ermittlung des Energiebedarfs von Bauten sei auf das Merkblatt 2032 des SIA zur Berechnung der grauen Energie (SIA, 2010), die SIA-Norm 380/1 zur Ermittlung der thermischen Energie im Hochbau (SIA, 2009), die Berechnungshilfe der Stadt Zürich für Architekturwettbewerbe (Lalive d'Epinay, 2010) und die Berechnungshilfe zum SIA Merkblatt 2032 (Lenzlinger, 2010) verwiesen.

4.6 Versiegelung

Boden ist eine begrenzte Ressource, die durch praktisch sämtliche Bautätigkeit beeinträchtigt oder konsumiert wird. Und Böden sind äusserst wichtig für das Ökosystem:

„Böden spielen als Nährstoff- und Wasserspeicher, als Puffer und Lebensraum eine zentrale Rolle im Naturhaushalt. [...] Eine der Nachhaltigkeit verpflichtete Planung [...] strebt daher einen möglichst geringen Flächenbedarf an. (VSS, 2009, 23)

Entsprechend gilt es, die Opportunitätskosten der Versiegelung zu berücksichtigen. Mögliche Ansätze dazu sind Ersatzkosten für die Versiegelung und / oder die Bewertung der von einem Boden erbrachten Eco-System-Services (z.B. CO₂-Absorption, Wasseraufnahme und –haushalt, Erholung).

Die versiegelte Fläche kann direkt aus Daten zur gebauten Umwelt ermittelt werden.

4.7 Konsumverhalten der Haushalte

4.7.1 Relevanz des Themas

Weisz und Steinberger (2010) schliessen in ihrem Review aus der analysierten Literatur zum mit dem Konsum von Haushalten verbundenen Energieverbrauch, dass Urbanisierung per se nicht zu einem höheren Energieverbrauch führt, sondern dieser vielmehr durch die oft mit Urbanisierung einhergehenden Lebensstile der Haushalte mit hohem Einkommen verursacht wird. Das Konsumverhalten von Haushalten hat also einen erheblichen Einfluss auf die Menge der konsumierten Energie, welche wie gezeigt ein guter Indikator für verschiedene Umweltauswirkungen ist.

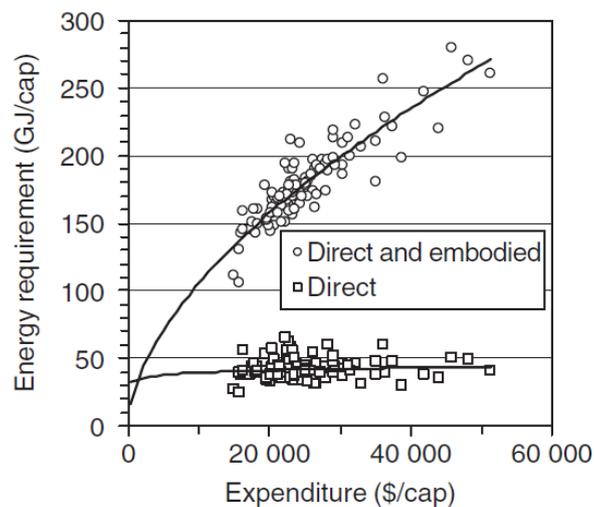
4.7.2 Stand des Wissens

Bei der Untersuchung des mit dem Konsum von Haushalten verbundenen Energieverbrauchs ist sowohl der direkte als auch der indirekte Verbrauch von Energie zu berücksichtigen. Zum direkten Energieverbrauch von Haushalten gehören laut Lenzen et al. (2008) die Bereiche Wohnen (Elektrizität für den Betrieb von Geräten, Brennstoffe wie Gas, Heizöl oder Holz zum Heizen und / oder Kochen) und Verkehr (Brennstoff- oder Elektrizitätsverbrauch in eigenen Fahrzeugen, Booten etc.). Der indirekte Energieverbrauch von Haushalten bezeichnet laut Lenzen et al. (2008) die graue Energie von konsumierten Gütern und Dienstleistungen. Güter sind „materiell“, z.B. Lebensmittel, Bekleidung, Wasser, Geräte, Fahrzeuge oder Ausrüstung, während Dienstleistungen „immateriell“ sind, wie beispielsweise Unterhaltung, öffentlicher Verkehr, Versicherungen oder Krankenpflege. Die graue Energie dieser Güter und Dienstleistungen entspricht derjenigen Energiemenge, die während des gesamten Lebenszyk-

lus‘ des entsprechenden Gutes oder der entsprechenden Dienstleistung benötigt wird, von der Extraktion von Rohmaterialien bis zur Entsorgung.

Die direkte Nachfrage wird laut Lenzen et al. (2008) mit zunehmenden Haushaltsausgaben gesättigt, während der gesamte Verbrauch (direkt und indirekt) mit zunehmenden Ausgaben weiter zunimmt (siehe Abbildung 13).

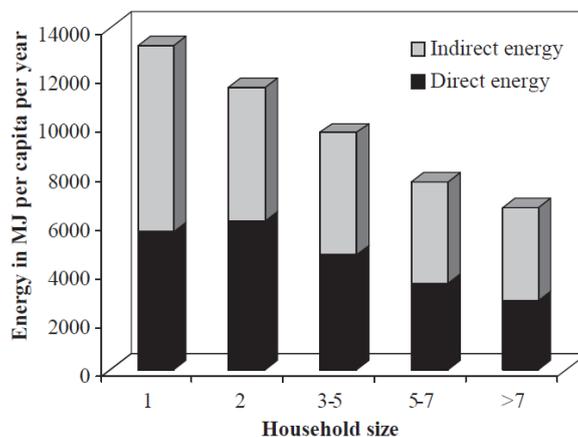
Abbildung 13 Nachfrage nach direkter und indirekter Energie australischer Haushalte in Abhängigkeit der Haushaltsausgaben



Quelle: Lenzen et al. (2008, 97)

Grössere Haushalte haben einen kleineren Energieverbrauch, sowohl direkt als auch indirekt. Laut Weisz und Steinberger (2010) kamen verschiedene Studien zu diesem Ergebnis, exemplarisch sei hier diejenige von Pachauri (2004) über indische Familien angeführt (siehe Abbildung 14). Einkommen war die wichtigste erklärende Variable für Variationen im Energieverbrauch, die Elastizität zwischen gesamten Haushaltsausgaben und gesamtem Energieverbrauch des Haushalts betrug 0.67.

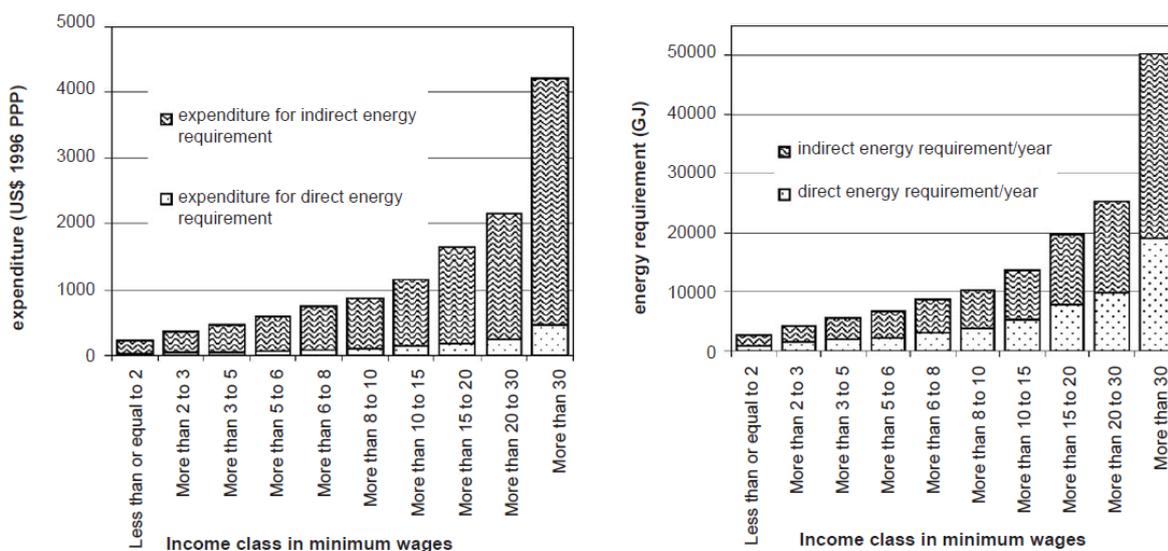
Abbildung 14 Durchschnittliche Energienachfrage (direkt und indirekt) von indischen Haushalten in Abhängigkeit von der Haushaltsgrösse



Quelle: Pachauri (2004, 1728)

Zudem scheint der Anteil der indirekten Energie am Gesamtenergieverbrauch mit zunehmendem Einkommen zuzunehmen, wie Cohen, Lenzen und Schaeffer (2005) für brasilianische Haushalte ermittelt haben (siehe Abbildung 15).

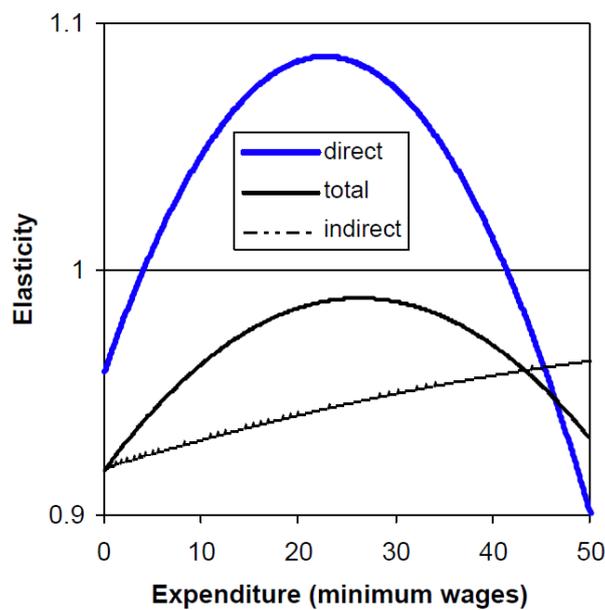
Abbildung 15 Ausgaben für direkte und indirekte Energie sowie Energienachfrage nach Einkommensklassen für brasilianische Haushalte



Quelle: Cohen et al. (2005, 559)

Für die direkte Energienachfrage war bei Cohen et al. (2005) die Ausgabenelastizität für die meisten Einkommensklassen höher als 1, nahm aber in den hohen Einkommensklassen stark ab. Im Gegensatz dazu nahm die Ausgabenelastizität für die indirekte Energienachfrage beinahe linear zu, blieb aber unter 1 (siehe Abbildung 16).

Abbildung 16 Durchschnittliche Ausgabenelastizität für direkte und indirekte Energie nach Einkommen



Quelle: Cohen et al. (2005, 560)

Ein Zusammenhang zwischen gebauter Umwelt und Konsumverhalten wurde nicht eindeutig nachgewiesen und es ist äusserst schwierig, aus den verschiedenen beobachteten Korrelationen kausale Zusammenhänge abzuleiten.

4.8 Gebrauchswert der gebauten Umwelt

4.8.1 Relevanz des Themas

Sind andere Themen (z.B. Kapitel 4.3) eher der Effizienz des Einsatzes öffentlicher Mittel gewidmet, geht es beim Gebrauchswert um die Erfüllung menschlicher Bedürfnisse und um die Lebensqualität, also eher um Effektivität. Die beschränkten Ressourcen sollten so eingesetzt werden, dass sie einen möglichst grossen Nutzen generieren. Dieser Nutzen ist aber von den Ansprüchen der Nutzer abhängig. Es ist also elementar, diese zu erfüllen. Werden die An-

sprüche erfüllt, verlängert dies auch die „Haltbarkeit“. Um dem Umstand Rechnung zu tragen, dass Ansprüche sich im Laufe der Zeit, muss zudem Anpassungsfähigkeit erreicht werden.

Ein hoher Gebrauchswert der gebauten Umwelt hat auch weitere positive Auswirkungen. Kenworthy (2006) merkt an, dass im globalen Wettbewerb der Städte, insbesondere um Firmensitze und die kreative Klasse, diese die Standorte jener zu einem gewissen Masse diktiert, so dass die Erfüllung der Erwartungen und Anforderungen von Menschen an die gebaute Umwelt auch wirtschaftliche Vorteile bringe – denn genau dadurch werde die kreative Klasse angezogen. Wenn gut ausgebildete und stark spezialisierte Arbeitskräfte auf einem Arbeitsmarkt verfügbar sind, erhöht dies die Produktivität. Zudem sei in den verschiedenen Rankings von Städten zur Lebensqualität immer zu beobachten, dass stark auf das Automobil ausgerichtete Städte niemals gute Plätze erreichten; hingegen hätten die in solchen Ranglisten führenden Städte fast immer sehr gute öffentliche Verkehrssysteme.

4.8.2 Stand des Wissens

Die Elemente der gebauten Umwelt, welche das zu Fuss Gehen fördern (siehe Kapitel 4.1.2, *Irvine–Minnesota Inventory to Measure Built Environments* (Day et al., 2006)), scheinen geeignet als Mass für die generelle Attraktivität einer Umgebung, da es letztlich diese Attraktivität ist, welche die Menschen dazu bringt, zu Fuss zu gehen. Attraktivität wiederum widerspiegelt in einem gewissen Masse die Erfüllung von Bedürfnissen und Ansprüchen. Sie könnte als helfen, den Gebrauchswert der gebauten Umwelt zu bestimmen.

Hecker und Kunert (2004) erwähnen, dass Synergieeffekte der Nutzungsmischung einen Beitrag zu Wohn- und Aufenthaltsqualität, zu sozialer Ausgewogenheit und zum Erlebniswert des städtischen Umfelds leisten können. Auch für Gewerbebetriebe könne Nutzungsmischung positive Auswirkungen haben, da die Qualität des Umfelds gesteigert werde, d.h. weiche Standortfaktoren verbessert werden.

Carruthers und Ulfarsson (2008) schlagen vor, den Einfluss von Dichte und anderen Messgrössen für die gebaute Umwelt nicht nur auf die öffentlichen Ausgaben, sondern auch auf die dadurch erreichten Lebensumstände der Bewohner zu untersuchen. Als Ausgangspunkt für die Entwicklung entsprechender Kriterien schlagen sie ein Framework basieren auf Lynch's zentralen Anforderungen an die gebaute Umwelt vor (Lynch, 1981):

- *Vitality*
- *Sense*
- *Fit*

- *Access*
- *Control*
- *Efficiency*
- *Justice*

Auch Kenworthy (2006) verweist auf Lynch (1960) und Lynch (1981), um Prinzipien zur Gestaltung der physischen Umgebung in Städten abzuleiten. Zudem fasst er fünf Entwurfsqualitäten basierend auf Bentley, Alcock, Murrain, McGlynn und Smith (1985) zusammen, die es in städtischen Entwicklungen zu berücksichtigen gelte:

“Permeability – places that are permeable provide access and a number of alternative routes through an area, a choice of how to get to places and have a clear definition between public and private places.

Variety – variety is concerned with the range of uses available to people. Places that have variety offer experiential choice, but only if they can be accessed, and they attract a variety of people at various times for varied reasons.

Legibility – legibility is about how easily people can understand a place, and how quickly they can interpret what goes on there. Legible places enable an understanding of how to negotiate an area. Legibility can be achieved through street function, landmarks and different land uses.

Robustness – robustness is the flexibility to use a place for a variety of purposes, especially over a long period of time. Robustness is the means by which cities survive and are “recycled” according to the needs of each era.

Visual appropriateness, richness and personalization – these qualities are about the appearance and enjoyment of places. Places that display visual appropriateness and richness contain buildings that seem to “fit” with the streetscape. They can be interpreted easily by many people and create satisfying sensory experiences. Visually appropriate places have uses that match their physical appearance. Personalization is concerned with how comfortable and familiar a place is and how well it engenders a sense of belonging.” (Kenworthy, 2006, 79)

Kenworthy (2006) bezeichnet diese Kriterien als messbar, unterlässt es aber, dies näher zu erläutern. Vorstellbar wäre allenfalls eine qualitative Bewertung vor Ort, z.B. mit Standardisierten Checklisten, ähnlich wie dies auch Day et al. (2006) vorschlagen. Die Bewertung aufgrund von räumlichen Daten hingegen erscheint für die meisten Punkte kaum denkbar.

Oswald, Baccini und Michaeli (2003) haben folgende Kriterien zur Bewertung urbaner Qualitäten identifiziert, wobei sich wiederum grosse Probleme bei der Messbarkeit stellen:

- Identifikation
- Diversität
- Flexibilität
- Versorgungsgrad
- Ressourceneffizienz

Ein anderer Ansatz wäre die Auswertungen von Forschungsarbeiten zur Wohnstandortwahl (z.B. Schirmer, Belart und Axhausen (2011)). Die Faktoren betreffend gebauter Umwelt, welche die Wahl des Wohnstandorts beeinflussen, dürften Hinweise auf Möglichkeiten zur Bestimmung des Gebrauchswerts geben.

Generell wäre die Berücksichtigung einiger der gezeigten Ansätze zur Ermittlung des Gebrauchswerts äusserst wünschenswert, war allerdings im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich.

4.9 Zusammenfassung des Einflusses der gebauten Umwelt

In Tabelle 17 sind die relevanten Elastizitäten für die gebaute Umwelt aus diesem Kapitel zusammengefasst. Die im Beurteilungsmodell weiter verwendeten erklärenden Variablen (siehe Kapitel 6.4.3) sind fett gesetzt.

Die erklärenden Variablen aus Kapitel 4.3 „% der Fläche der County entwickelt“, „% zerstreute Bevölkerung“ und „Anz. Wohnbevölkerungszentren pro EW“ werden nicht weiter berücksichtigt, da sie nur für sehr grosse Untersuchungsgebiete relevant sind. Diese liegen ausserhalb des Fokus‘ dieser Arbeit. Auch die „zusätzlichen relevanten Grössen“ aus Kapitel 4.3 werden hier weggelassen, da sie die Soziodemographie und nicht die gebaute Umwelt betreffen. Eine Ausnahme bildet das Verhältnis Arbeitsplätze / Einwohner, das in vielen Studien als Element der gebauten Umwelt (respektive der häufig unter diesem Titel mitgemeinten Raumstruktur) angesehen wird.

Tabelle 17 Zusammenstellung der Elastizitäten für die gebaute Umwelt
 (1) Gefahrene Distanz; (2) Fussverkehr; (3) Nutzung ÖV; (4) Arbeitsproduktivität;
 (5) Ausgaben für öffentliche Dienste

Erklärende Variable	Abhängige Variable				
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Dichte					
Haushalts- od. Bevölkerungsdichte	-0.025	0.045	0.045		-0.04
Beschäftigungsdichte	0.000	0.025	0.006	0.051	
Anteil Geschäftsflächen		0.045			
Diversität					
Flächennutzungsmix (entropy index)	-0.057	0.095	0.076		
Verh. Beschäftigte / Einwohner	-0.013	0.121			0.2836
Entfernung zu einem Geschäft		0.159			
Design					
Kreuzungs- od. Strassendichte	-0.076	0.248	0.146		
% vierarmige Kreuzungen	-0.076	-0.038	0.184		
Erreichbarkeit der Ziele					
Arbeitsplatzerreichbarkeit mit MIV	-0.127				
Arbeitsplatzerreichbarkeit mit ÖV	-0.032				
Entfernung zum Stadtzentrum	0.140				
Arbeitsplätze innerhalb einer Meile		0.095			
Entfernung zum ÖV					
Entfernung zur nächsten ÖV-Haltest.	0.032	-0.095	-0.184		
Zersiedelung					
Sprawl-Index (Fallah et al., 2011)				-0.13	
Sprawl (Prud'homme und Lee, 1999)				-0.207	
Gebäudepark					
% der Gebäude vor 1940 gebaut					0.0337

Fett gesetzt sind im Beurteilungsmodell verwendete Werte (siehe Kapitel 6.4.3)

5 Methoden in der Literatur

5.1 Konzepte zur Erforschung der Nachhaltigkeit von Städten

Laut Weisz und Steinberger (2010) wurde seit Mitte der 1990er Jahre die potentielle Rolle von Städten bei der Reduktion des Material- und Energieumsatzes untersucht. Entsprechend entstanden Konzepte und Forschungsgebiete wie *Urban Metabolism*, *Urban Energy Use*, *Sustainable Cities*, *Carbon-neutral Cities* uvm.

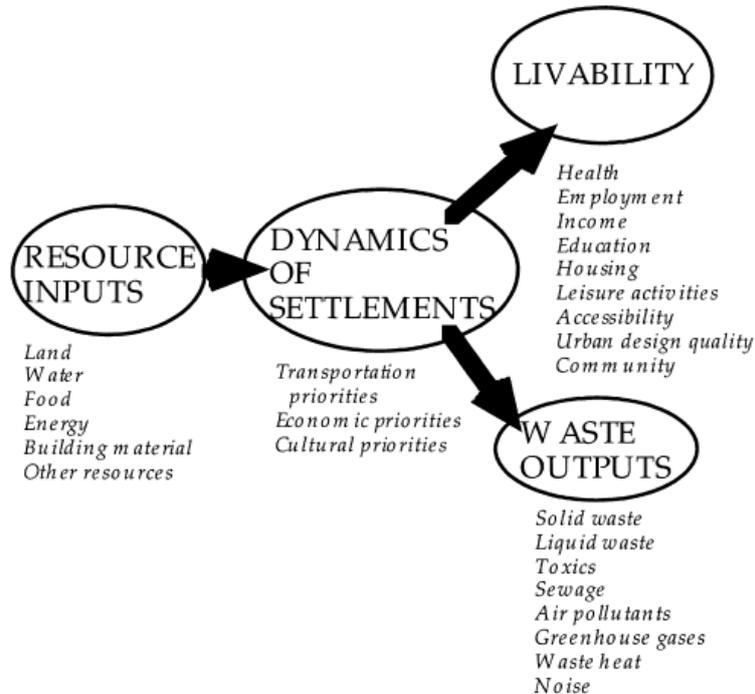
Alle diese Konzepte können letztlich unter dem Begriff *Urban Metabolism* zusammengefasst werden, denn letztlich geht es immer um Flüsse und Lager von Stoffen und Energie, also um den Metabolismus oder Stoffwechsel einer Stadt.

Urban Metabolism bedeutet die quantitative Beschreibung der gesamthaften Inputs und Outputs von Material und Energie, sowie von speziellen Substanzen wie Nährstoffen und Wasser in Städte und aus Städten (Weisz und Steinberger, 2010).

Es gibt gemäss Weisz und Steinberger (2010) zwei grundlegende Ansätze, um mit der Offenheit von Städten in solchen Berechnungen umzugehen: *produktionsorientiert* (alle in der Stadt produzierten Emissionen und konsumierte Energie und Materialien werden berücksichtigt) oder *konsumorientiert* (sämtliche Flüsse entlang der Produktionslinie von in der Stadt konsumierten Gütern und Dienstleistungen werden berücksichtigt).

Newman (1999) erweitert das übliche Metabolismus-Modell, indem er neben den Materialflüssen den Faktor „livability“ mit einbezieht (siehe Abbildung 17). Dadurch sollen letztlich auch Aspekte der sozialen und der ökonomischen Nachhaltigkeit in das bis dahin v.a. ökologisch ausgerichtete Konzept des Metabolismus einer Stadt mit einbezogen werden.

Abbildung 17 Erweitertes Metabolismus-Modell



Quelle: Newman (1999, 220)

Es wurden verschiedene Methoden entwickelt, um die Stoffflüsse von Städten im Sinne des *Urban Metabolism* zu untersuchen. Einige davon sollen in der Folge vorgestellt werden. Nicht alle Methoden verstehen sich explizit als Teil einer Analyse im Sinne des *Urban Metabolism*, letztlich setzen sich aber alle mit Flüssen und Lagern von Stoffen und Energie auseinander, behandeln also mindestens einen Teilaspekt des Metabolismus‘ einer Stadt.

5.1.1 Analyse von Stadtstrukturen

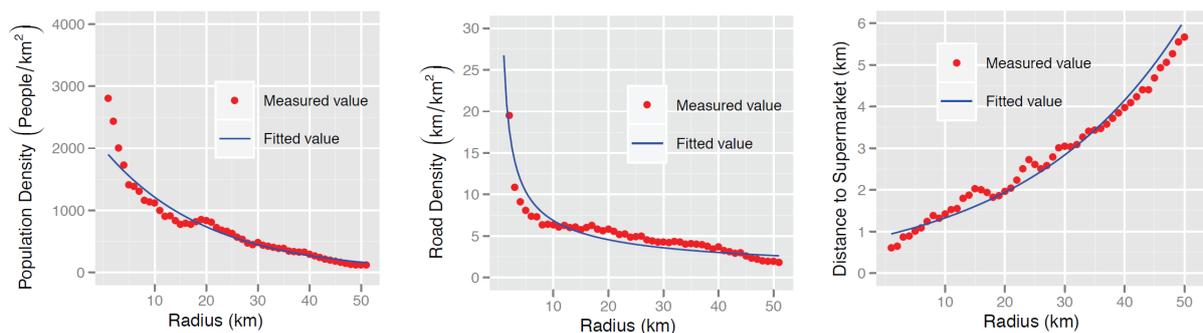
Quinn und Fernandez (2011) entwickelten drei Gradienten, die eine vergleichende Untersuchung der Struktur verschiedener Städte sowie Aussagen über die Performance dieser Strukturen erlauben sollen:

- *population density gradient*
- *road density gradient*
- *distance to service gradient*

Die drei Gradienten sind in Abbildung 18 für die Stadt Atlanta dargestellt und stehen in einem Zusammenhang zur Materialmenge, welche für die Infrastruktur benötigt wird, sowie zur Energiemenge, welche für das Funktionieren des täglichen Lebens notwendig ist. Untersucht wurde in diesem Zusammenhang insbesondere der Energieverbrauch für den Verkehr der Bevölkerung zu und von Dienstleistungen.

Als Grundlage diente ein monozentrisches Stadtmodell, dessen Zentrum vom Gebiet mit der höchsten Wirtschaftsaktivität gebildet wird. Als wichtigste Grösse wurde der Abstand einer untersuchten Einheit von diesem Zentrum verwendet (x-Achse), welche dann gegen die jeweilige Messgrösse geplottet wurde.

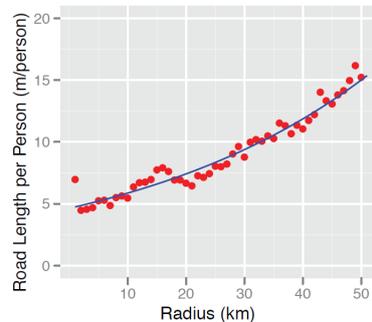
Abbildung 18 Bevölkerungsdichte-Gradient, Strassendichte-Gradient und Dienstleistungsdistanz-Gradient (am Bsp. Weglänge eines Haushalts pro Woche zur Dienstleistung Supermarkt), für die Stadt Atlanta



Quelle: Quinn und Fernandez (2011, 4-5)

Zusätzlich wurde die kombinierte Grösse Strassenlänge pro Person (m / Person) berechnet und wiederum gegen den Abstand vom Zentrum aufgetragen (siehe Abbildung 19). Zudem wurden für die Strassen durchschnittliche Materialintensitäten aus den Normen verwendet, um die Strasseninfrastruktur in kg / Person in Abhängigkeit des Abstandes vom Zentrum berechnen zu können.

Abbildung 19 Strassendichtegradient, normiert nach Bevölkerungszahl, für die Stadt Atlanta



Quelle: Quinn und Fernandez (2011, 4)

Für die Ermittlung der Distanz zu Dienstleistungen (exemplarisch wurden Supermärkte untersucht) wurde ein Raster mit 200 Meter Rasterweite verwendet. Für jedes Rasterfeld wurde dann die Luftliniendistanz zum nächsten Supermarkt ermittelt. Zusätzlich wurden statistische Daten verwendet, die Auskunft darüber geben, wie oft ein Haushalt im Durchschnitt pro Woche einen Supermarkt besucht. Unter Berücksichtigung der Anzahl Haushalte pro Rasterfeld konnte so der durchschnittlich von jedem Haushalt pro Woche zurückgelegte Weg zur Dienstleistung Supermarkt für jedes Rasterfeld berechnet werden. Zusätzlich wurde auch der Modal Split (95 % MIV) und der Durchschnittsenergieverbrauch eines Autos verwendet, um den Energieverbrauch für die Wege zu dieser Dienstleistung zu berechnen.

Die empirischen Messungen wurden jeweils mittels Regression in allgemeine Funktionen umgewandelt. Die Arbeit stellt einen ersten Schritt dar, das langfristige Ziel wäre, schnell und einfach die Ressourceneffizienz von Städten ermitteln und vergleichen zu können.

Der *distance to service gradient* ist ein äusserst vielversprechender Ansatz, der allerdings nur für einen einzigen Fall berechnet wurde (Supermarkt). Zudem weisen die Autoren selbst darauf hin, dass wesentliche Vereinfachungen vorgenommen wurden, deren Zulässigkeit nicht nachgewiesen wurde:

- Annahme, dass immer der nächst gelegene Supermarkt besucht wird
- Keine Differenzierung der Supermärkte nach Grössen
- Luftliniendistanz anstelle der Distanz im Strassennetz oder im ÖV
- Annahme, dass keine Aktivitätenketten existieren, sondern nur Touren von zu Hause zum Supermarkt und direkt zurück nach Hause („no trip chaining“)

Die korrekte Berücksichtigung dieser Aspekte sowie die Anwendung auf alle an bestimmte Orte gebundenen Aktivitäten (als z.B. neben Dienstleistungen auch Arbeit, Freizeit etc.) wäre zwar äusserst vielversprechend und interessant, der Aufwand andererseits aber beträchtlich. Eine Berücksichtigung des Energieverbrauchs wäre im Kontext der Schweiz ebenfalls sehr aufwändig, da nicht einfach ein beinahe hundertprozentiger MIV-Anteil angenommen werden kann und für die Ermittlung des Modal Split in Szenarien auf Verkehrsmodelle zurückgegriffen werden müsste (der Modal Split müsste für Aussagen auf Quartier- oder Siedlungsebene auch relativ fein aufgelöst räumlich explizit bekannt sein).

5.1.2 Ressourcenintensität von Städten

Quinn et al. (2011) analysieren die Materialintensität des Gebäudeparks von London, wobei Wohngebäude und Strassen berücksichtigt werden. Das Ziel war es, eine standardisierte Methode zur Berechnung des Ressourcenverbrauchs auf Nachbarschaftsmaassstab zu entwickeln. Zu diesem Zweck wurden Gebiete von 0.49 km² Grösse (sog. LLSOA = *Lower Layer Super Output Area* des UK Zensus) mit einem Algorithmus automatisiert einer von drei Typologien zugeordnet. Dabei wurden folgende Grössen verwendet, um die urbane Form zu beschreiben:

- *Plot Ratio*:
total floor space / LLSOA area
- *Green Space Fraction*:
total green space / LLSOA area
- *Built Area Fraction*:
total built footprint / LLSOA area
- *Average Building height*:
average height of buildings in LLSOA

Nach der Berechnung dieser Werte für jede LLSOA wurden Gruppen mit einer statistischen Clustering-Technik („k-means algorithm“) identifiziert, wobei drei Clustering-Gruppen verwendet wurden; diese Gruppen wurden dann als Typologien verwendet.

Ein Vergleich mit der Bevölkerungsdichteverteilung Londons, die nicht als Ausgangsgrösse verwendet wurde, sowie visuelle Stichprobenvergleiche mit einem 3-D-Gebäudemodell ergaben, dass die entwickelte Methode eine adäquate Charakterisierung von urbaner Form erlaubt.

Zusätzlich verwendeten (Quinn et al., 2011) durchschnittliche Materialstärken für den Querschnitt von Strassen und die Umhüllungen von Wohngebäuden, um die benötigten Materialien für Wohngebäude und Strassen in kg / Haushalt für jede der drei Typologien zu berechnen. Dabei war der Materialaufwand erwartungsgemäss höher, je weniger dicht die Typolo-

gie. Der Effekt war bei der Strasseninfrastruktur stärker ausgeprägt als bei den Wohngebäuden.

Es wurden zahlreiche Vereinfachungen und Annahmen verwendet, insb. bei der Berechnung der Materialintensität:

- Nur Umhüllende bei Wohngebäuden (kein Innenausbau, keine Zwischendecken und Trennwände)
- Annahme derselben Konstruktion bei allen Gebäuden (eine Art generische Durchschnittskonstruktion); also keine Berücksichtigung von Unterschieden bei der Wandstärke von höheren Gebäuden usw.
- Annahme, dass alle Strassen im Durchschnitt genau den Normen entsprechen.

Die von Quinn et al. (2011) verwendeten Messgrößen können auf einfache Art und Weise berechnet werden. Schwierig sind die Zuordnungen der Materialintensitäten, da diese grosse lokale Unterschiede aufweisen.

5.1.3 Netzstadt

Das Netzstadtmodell von Oswald et al. (2003) erlaubt die Analyse von Siedlungsstrukturen aufgrund der Bestandteile Knoten, Verbindungen und Grenzen auf verschiedenen Massstabsebenen. Dabei werden generische Aktivitäten- und Terrorientypen verwendet.

Die zugehörige Netzstadtmethode umfasst zahlreiche morphologische Indikatoren und physiologische Instrumente.

Folgende morphologische Indikatoren werden von Oswald et al. (2003) verwendet:

- Baudichte (konkreter: Ressourceneffizienz in der Bodennutzung → gewachsene Bodenfläche / gebaute Nutzflächen)
- Zerstückelung
- Körnung
- Erschliessung

Dabei wird keine Wertung von Indikatorenergebnissen vorgenommen (im Sinne von gut / schlecht oder bezüglich Nachhaltigkeit). Die Indikatoren dienen eher der Identifikation von Knoten im Netz und der Charakterisierung des Raumes.

Bei den von Oswald et al. (2003) entwickelten physiologischen Instrumenten geht es um die Analyse des Stoffwechsels urbaner Systeme, welcher sich folgendermassen zusammenfassen

lässt: Transport und Transformation von Material und Energie in anthropogenen Ökosystemen. Im Fokus stehen dabei die vier Hauptressourcen:

- Wasser
- Nahrungsmittel
- Baumaterialien
- Energie

Die für eine umfassende Analyse benötigten Daten lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Personendichten
- Güterdichten
- Personenflüsse
- Güterflüsse

Allerdings erwähnen die Autoren, dass eine vollständige Erfassung dieser Daten für ganze Siedlungsräume kaum möglich ist und liefern Hinweise auf mögliche Vereinfachungen.

Die physiologischen Instrumente dienen wie die morphologischen Indikatoren vor allem der Analyse des Raumes und insbesondere der Identifikation und Einordnung von Knoten in der Netzstadt.

5.2 Ökobilanz / Life Cycle Assessment (LCA)

Eine Ökobilanz ist „eine Methode zur Abschätzung der Auswirkungen eines Produktes und seines Herstellungsprozesses auf die Umwelt“ (Lexikon der Nachhaltigkeit, 2011). D.h., sie wird auf Produkte oder Verfahren angewandt und es wird die Umweltrelevanz der verschiedenen Lebensstadien untersucht. Aus dieser Betrachtung des gesamten Lebenszyklus‘ wird auch der Begriff Lebenszyklusanalyse abgeleitet, eine wörtliche Übersetzung des englischen Begriffs *Life Cycle Assessment* (LCA). Allerdings gibt es laut Lexikon der Nachhaltigkeit (2011) keine scharfe Abgrenzung dieser Begriffe, so dass häufig die Begriffe Ökobilanz und Lebenszyklusanalyse / LCA synonym verwendet werden.

Ein LCA für ein einzelnes Produkt ist relativ aufwändig in der Durchführung, da unter anderem sämtliche Produktionsprozesse auch von Zulieferern, Transportauswirkungen in der Produktions- und Vertriebslogistik, die Gewinnung der ursprünglichen Rohstoffe, die Auswirkungen während der Nutzung sowie die Entsorgung analysiert werden müssen. Verschiedene Datenbanken wie z.B. ecoinvent (www.ecoinvent.org) dienen als Informationsquelle über die einzelnen Materialien und Prozesse.

Im Gebäudebereich werden ebenfalls LCA durchgeführt, es gibt auch entsprechende Bauspezifische Datenbanken, z.B. den Bauteilkatalog (www.bauteilkatalog.ch). Wenn die Konstruktion eines Gebäudes bekannt ist, lassen sich also Werte wie graue Energie, betrieblicher Energieverbrauch, CO₂-äquivalenter Treibhausgasausstoss und weitere Umweltauswirkungen über die gesamte Lebensdauer ermitteln. Ähnliches wäre auch bei der Infrastruktur möglich.

Im Kontext dieser Arbeit stellt sich das Problem, dass aggregierte Daten benötigt werden, z.B. Auswirkungen pro m² Nutzfläche, m³ Gebäudevolumen oder m² Strasse. Eine Ökobilanz hingegen erfordert einen relativ hohen Detaillierungsgrad. Allerdings sind Ökobilanzen die Grundlage zur Bereitstellung aggregierter Daten, die z.B. auch vom SIA (2010) genutzt werden, um die graue Energie von Gebäuden anhand weniger Angaben zu einem Gebäude zu ermitteln.

Weitere Informationen zu Ökobilanzen finden sich beispielsweise in Guinée (2002) oder Klöpffer und Grahl (2009); zu Ökobilanzen bei Gebäuden finden sich Informationen z.B. in Crawford (2011).

5.3 Indikatoren

In den meisten Fällen folgt gemäss Billing (2004) die Methodik zur Auswahl von Indikatoren im Bereich Nachhaltigkeit und deren Anwendung dem folgenden Schema:

Definition von Zielen → Erarbeiten von Kriterien → Ableiten von Indikatoren → Vergleich Zustand zum Zeitpunkt 1 mit Zustand zum Zeitpunkt 2 (anhand der Werte der Indikatoren)

Laut Mori und Christodoulou (2012) werden in der Literatur vor allem folgende nicht inhaltliche Anforderungen an Messgrössen zur Nachhaltigkeit erwähnt: Validität, Zuverlässigkeit, Vergleichbarkeit, Einfachheit, Datenverfügbarkeit. Zudem weisen Mori und Christodoulou (2012) darauf hin, dass Nachhaltigkeitsindikatoren sowohl Lager („stock“) als auch Flüsse berücksichtigen müssen.

Munier (2011) verwendet einen interessanten Ansatz, um aus einem Satz Indikatoren ein sogenanntes *Core Set* zu extrahieren, das möglichst viele Aspekte des ursprünglichen Sets abdeckt. Er verwendet dazu *Linear Programming* zur Auswahl von Indikatoren (*Linear Programming* ist eine mathematische Methode zur Entscheidungsunterstützung; für einen Satz Alternativen – im konkreten Fall mögliche Indikatoren – welche gewissen Kriterien unterliegen, wird durch Maximierung oder Minimierung einer linearen Zielfunktion die beste Lösung gesucht; für weitere Informationen siehe Dantzig (1963)). Weiterhin wendet er das Entropie-

Konzept von Shannon und Weaver (1949) zur Maximierung der im Datensatz enthaltenen Informationen an (das Konzept wurde ursprünglich entwickelt, um die Informationsmenge in einer Nachricht quantitativ zu messen und wird von Munier (2011) verwendet, um die im Indikatorensetz enthaltene Menge an Informationen zu maximieren; die Entropie-Werte werden für die Gewichtungskoeffizienten der einzelnen Indikatoren in der Zielfunktion verwendet).

Zudem berücksichtigt Munier (2011) die indirekten Wirkungen, welche durch einen Indikator gemessen werden, sowie die gegenseitige Beeinflussung von Indikatoren. Allerdings ist die Methodik noch nicht ausgereift und weist zahlreiche Schwächen auf.

5.4 Nachhaltigkeitsindizes und –Indikatoren

Billing (2004) beschreibt das Vorgehen zur Erstellung eines Indikatorenkatalogs für eine nachhaltige Stadtentwicklung wie folgt:

- Erstellen von Listen mit Kriterien, die geeignet sind, den Erhalt folgender Aspekte sicherzustellen:
 - ökologische Tragfähigkeit
 - ökonomische Funktionsfähigkeit
 - soziokulturelle Brauchbarkeit
- Zuordnung dieser Kriterien zu Indikatoren, welche den Zustand und Veränderungen gesellschaftlichen Kapitals anzeigen. Für substituierbare Kapitalelemente sollen die Indikatoren derart ausgestaltet werden, dass sie aggregierbar sind (z.B. durch Monetarisierung).

Eine Entwicklung ist gemäss Billing (2004) basierend auf einem derart aufgebauten Indikatorenkatalog dann nachhaltig, wenn

- Die Belastbarkeitsgrenze des Naturkapitals im Sinne der kritischen ökologischen Nachhaltigkeit eingehalten wird (siehe Kapitel 3.1)
- Die Summe aus Erhöhungen und Minderungen des gesellschaftlichen Kapitals pro Kopf positiv ist

Die vielen Versuche, Nachhaltigkeit mit Hilfe von Indikatoren greifbar zu machen, gliedert Billing (2004) grob in zwei Gruppen:

- Ökonomische Systeme mit monetären Werten als Messgrösse
- Ökologische Systeme mit physischen Grössen als Messgrösse

Beispiele für beide Gruppen werden in Billing (2004) auf Seite 55f aufgeführt.

Tanguay, Rajaonson, Lefebvre und Lanoie (2010) analysierten 17 Studien zur Verwendung von *Sustainable Development Indicators* (SDI) in entwickelten westlichen Ländern. Dabei identifizieren sie eine grosse Uneinheitlichkeit was Herangehensweise, Konzept sowie Art und Anzahl der verwendeten Indikatoren angeht; dies führen sie hauptsächlich auf unterschiedliche zugrundeliegende Definitionen von Nachhaltigkeit, Ziele, Methoden und Datenverfügbarkeit zurück.

Viele Methoden zur Nachhaltigkeitsbeurteilung verwenden einen Index, also einen aggregierten Wert aus verschiedenen Indikatoren. Wie in Kapitel 3.1 erläutert, kann dies je nach Nachhaltigkeitsverständnis problematisch sein, da durch die Aggregation explizit oder implizit eine Substitution zwischen Naturkapital und menschengemachtem Kapital als zulässig erachtet wird. Mori und Christodoulou (2012) schlagen vor, mindestens für die drei Säulen der Nachhaltigkeit einen eigenen Wert zu ermitteln oder – je nach Anzahl der Indikatoren – die einzelnen Indikatoren nicht weiter miteinander zu verrechnen, da so wesentliche Informationen erhalten bleiben. Verschiedene Entitäten könnten dann jeweils paarweise hinsichtlich eines einzelnen Indikators verglichen werden, eine eigentliche Rangfolge aber nicht erstellt werden. Andererseits ist anzumerken, dass sofern bei der Anwendung z.B. um die Auswahl einer Variante geht, letztlich durch die Wahl in jedem Fall eine Aggregation aller Indikatoren vorgenommen wird – entsprechend scheint es sinnvoller, diese Aggregation bereits innerhalb eines Beurteilungsmodells kontrolliert vorzunehmen.

Es existieren zahlreiche Werkzeuge zur Nachhaltigkeitsbewertung von Projekten auch im städtebaulichen Massstab. So hat das BRE in England z.B. eine Checkliste für die Nachhaltigkeit von Entwicklungen herausgegeben (Brownhill und Rao, 2002), und Standards für nachhaltiges Bauen wurden auf dem Gebäude übergeordnete Massstäbe erweitert (z.B. LEED for Neighborhood Development oder SBTool). Solche Werkzeuge sind ohne Zweifel wertvoll, bieten sich aber für die Verwendung in der vorliegenden Arbeit nicht an, aus hauptsächlich zwei Gründen:

- Viele Kriterien sind auf Aspekte bezogen, die nicht mit der gebauten Umwelt zusammenhängen (z.B. Mitwirkung der Bevölkerung bei der Planung) und / oder nicht quantitativ gemessen werden können.
- Die Grundlagen sind nicht vollständig zugänglich oder ungenügend. Bei der Checkliste von Brownhill und Rao (2002) werden z.B. für sehr viele Aspekte Punkte vergeben, deren maximale Anzahl meistens im Bereich zwischen 10 und 50 liegt. Da die Punkte für die Bewertung aufaddiert werden, wird durch unterschiedliche Maximalpunkteanzahlen eine Wertung der Wichtigkeit der einzelnen Aspekte vorgenommen. Diese wird nicht begründet; ob die entsprechenden Wirkungen analysiert und quantifiziert wurden, ist nicht ersichtlich.

Vielfach geht es bei bestehenden Indikatorensets und Nachhaltigkeits-Assessments zum Thema Stadt darum, Pläne, Planungen oder Massnahmenprogramme („Policies“) zu bewerten; dabei spielt insbesondere der Faktor der Mitwirkung und Beteiligung der Bevölkerung eine zentrale Rolle, geht es doch zu einem grossen Teil auch darum, deren Bedürfnisse zu ermitteln und anschliessend deren Erfüllung zu überprüfen.

In der kommentierten Bibliographie (0) sind zahlreiche weitere Werkzeuge zur Beurteilung der Nachhaltigkeit aufgeführt.

5.5 Ansatz der Social Welfare Function

Proost (in Vorbereitung) schlägt zur Bewertung von Massnahmenpaketen („Policies“) im Rahmen des Projekts *SustainCity* die Verwendung der Social-Welfare-Function vor:

$$\begin{aligned}
 SWF_{city} = & \sum_{t=0}^T \frac{1}{(1+\delta)^t} \sum_{inhabitants\ now} \phi(U_i) \times U_{i,t}(I, H, tc) \\
 & + \chi \sum_{t=0}^T \frac{1}{(1+\delta)^t} U_{com,t}(I, H, tt) + \xi \phi(U_w) U_w(GHG, \dots) \\
 & + \rho \text{ Local Stock}(T) - INV + \sum_{t=0}^T \frac{1}{(1+\delta)^t} Rev(t)
 \end{aligned}$$

wobei:

SWF_{city}	Social Welfare der Stadt
δ	Diskontierungszinssatz
I	Einkommen
H	Wohnkosten
tc	generalisierte Kosten des Verkehrs
$i = 1, \dots, I$	Einwohner
$t = 0 \dots T$	berücksichtigter Zeithorizont
$\phi(U_i)$	Gewicht des Individuums i
U_i	Nutzen von Individuum i
χ	Gewicht der Pendler
U_{com}	Nutzen der Pendler
ξ	Wert des Effekts auf den Rest der Welt

$\phi(U_w)$	Gewicht des Effekts auf den Rest der Welt
U_w	Nutzen des Rests der Welt
GHG	Treibhausgasemissionen
ρ	Gewicht des lokalen Kapitalstocks
INV	Implementierungskosten des Massnahmenprogramms („Policy“) zum heutigen Wert
Rev	Gesamteinnahmen (aus Steuern, Zöllen, Fahrkarten)

Die zu bewertenden Massnahmenprogramme („Policies“) haben Auswirkungen, die in entsprechenden Szenarien beobachtet werden können. Diese Auswirkungen wiederum bilden einen Teil der Variablen der Social Welfare Function. Die Variable INV beschreibt das Massnahmenpaket („Policy“) selbst.

Für die Bewertung der Nachhaltigkeit der gebauten Umwelt anhand von GIS-Daten ist die Social Welfare Function als Modell nicht geeignet, auch wenn sie sehr ganzheitliche Resultate ermöglichen würde. Der Grund dafür ist, dass viele Variablen nicht von der gebauten Umwelt per se abhängen und somit auch nicht aus ihr abgeleitet werden können.

6 Modell zur Beurteilung der Nachhaltigkeit

Aus der Literaturanalyse zum Einfluss der gebauten Umwelt auf die Nachhaltigkeit (siehe Kapitel 4) sowie weiteren Quellen wird in diesem Kapitel ein Modell zur Beurteilung der Nachhaltigkeit von städtischen Entwicklungen aufgebaut. Dieses Modell erfüllt nicht alle Anforderungen (wie sie z.B. in Kapitel 5.4 formuliert werden) und behandelt nicht alle für die Nachhaltigkeit relevanten Fragen. Es ist der Versuch, möglichst viele Aspekte der gebauten Umwelt zu bewerten und in einem Beurteilungsergebnis zu vereinen. Es stellt das im Rahmen dieser Arbeit Mögliche dar; denk- und wünschbare Erweiterungen und Verbesserungen werden in Kapitel 9 besprochen.

6.1 Modellübersicht

6.1.1 Ableitung von Indikatoren aus der Literaturanalyse

In Kapitel 4 wird der Einfluss der gebauten Umwelt auf die Nachhaltigkeit behandelt. In den verschiedenen Unterkapiteln wird jeweils unter dem Titel „Relevanz des Themas“ auf die Auswirkungen eines bestimmten, durch die gebaute Umwelt beeinflussten Themenbereichs eingegangen. Diese Auswirkungen sind es, welche im Modell zur Beurteilung der Nachhaltigkeit als Indikatoren dienen.

In Kapitel 4.1 wird beispielsweise der Einfluss der gebauten Umwelt auf das Verkehrsverhalten erläutert. Eine Veränderung des Verkehrsverhaltens – also z.B. der gefahrenen Fahrzeugkilometer oder der zurückgelegten Fussdistanz – sagt allerdings direkt nichts über die entsprechende Veränderung der Nachhaltigkeit aus. Vielmehr wird eine solche Aussage erst durch die Ermittlung von Auswirkungen der Veränderung des Verkehrsverhaltens möglich – z.B. durch die Auswirkungen einer Veränderung der gefahrenen Fahrzeugkilometer auf die Luftqualität. Entsprechend wird im Modell der Indikator Luftverschmutzung berücksichtigt.

Im Modell zur Beurteilung der Nachhaltigkeit können nicht alle in Kapitel 4 erwähnten Auswirkungen berücksichtigt werden. Vielmehr kommt eine beschränkte Anzahl von Indikatoren zum Einsatz, welche quantitativ erfassbar sind. Eine Erweiterung des Modells mit zusätzlichen Indikatoren wäre wünschenswert, war aber im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich.

Im Folgenden werden die im Modell verwendeten Indikatoren aufgeführt, im Anschluss wird für jeden Indikator der Zusammenhang mit den in Kapitel 4 behandelten Themen kurz erläutert.

Folgende Indikatoren werden im Beurteilungsmodell verwendet:

- Unfälle
- Lärm
- Luftverschmutzung
- Klima
- Gesundheit
- Bruttoinlandprodukt (BIP)
- Kosten für öffentliche Dienste
- Versiegelung

Unfälle, Lärm und Luftverschmutzung

Diese drei Indikatoren erfassen gewisse Auswirkungen des Verkehrsverhaltens (siehe Kapitel 4.1). Sie hängen im Modell ausschliesslich von den gefahrenen Fahrzeugkilometern ab.

Klima

Der Indikator Klima fasst die bei mehreren Themenbereichen in Kapitel 4 erwähnte Auswirkung der Emissionen von Klimagasen zusammen. Folgende Aspekte werden berücksichtigt:

- Verkehrsverhalten (Kapitel 4.1): Emissionen von Klimagasen durch Fahrzeuge
- Materialintensität der Infrastruktur (Kapitel 4.4): Graue Emissionen der Strassen
- Energieverbrauch des Gebäudeparks (Kapitel 4.5): Emissionen aus dem Betrieb von Gebäuden und graue Emissionen des Gebäudeparks

Gesundheit

Der Indikator Gesundheit erfasst die Auswirkung des Verkehrsverhaltens (siehe Kapitel 4.1), konkret der Nutzung des Fussverkehrs, auf die Gesundheit.

Bruttoinlandprodukt

Mit dem Indikator BIP wird die Auswirkung der Arbeitsproduktivität (siehe Kapitel 4.2) erfasst.

Kosten für öffentliche Dienste und Versiegelung

Die Indikatoren Kosten für öffentliche Dienste und Versiegelung berücksichtigen die entsprechenden Themen direkt (siehe Kapitel 4.3 und 4.6).

6.1.2 Bewertung der Indikatoren

Um die acht Indikatoren in einem Modell rechnerisch kombinieren zu können, müssen sie gewichtet oder bewertet werden. Im Beurteilungsmodell werden Kosten- und Nutzenfaktoren verwendet, mit deren Hilfe für jeden Indikator ein monetärer Wert als Ergebnis ermittelt wird. Diese einzelnen Werte können im Anschluss verrechnet werden. Entsprechend erfolgt keine zusätzliche Gewichtung, diese ist implizit in den Bewertungsfaktoren enthalten. Die verwendeten Faktoren werden in Kapitel 6.7 aufgeführt.

6.1.3 Modellprinzip

Wie in Kapitel 3.1.4 erwähnt, werden das Problem der Ermittlung kritischer Grenzwerte für die Nutzung des Naturkapitals und die Umrechnung dieser kritischen Grenzen in menschliche Aktivitäten in dieser Arbeit nicht behandelt. Entsprechend wird bei der Nachhaltigkeitsbeurteilung nur die zweite der von Billing (2004) formulierten Anforderungen berücksichtigt (siehe Kapitel 5.4): Die Summe aus Erhöhungen und Minderungen des gesellschaftlichen Kapitals muss positiv sein, damit eine Entwicklung als nachhaltig gilt. Dies deckt sich auch mit der in Kapitel 3.1.4 erläuterten zentralen Rolle des ökonomischen Effizienz-Prinzips bei der Durchsetzung des Nachhaltigkeitsansatzes.

Um diese Anforderung in einem Modell zur Beurteilung der Nachhaltigkeit zu operationalisieren, wird die gebaute Umwelt monetär bewertet (Aufsummierung diskontierter Kosten und Nutzen über einen Betrachtungszeitraum, siehe 6.6). Dies geschieht mittels der in Kapitel 6.1.1 abgeleiteten acht Indikatoren, deren Berechnung in Kapitel 6.5 erläutert wird.

Für die Berechnung der Indikatoren werden benötigt:

- Wertgerüst zur monetären Bewertung (siehe Kapitel 6.7)
- Emissionsfaktoren für Klima- und Luftverschmutzungskosten (siehe Kapitel 6.8)
- Sogenannte Eingangsgrößen zur gebauten Umwelt (siehe Kapitel 6.4):
 - Gefahrene Fahrzeugkilometer
 - Nutzung des Fussverkehrs
 - Arbeitsproduktivität
 - Ausgaben für öffentliche Dienste

- Fläche aller entwickelten Parzellen
- Geschossflächen mit Wohnnutzung
- Geschossflächen mit Nicht-Wohnnutzung
- Oberfläche der Strassen
- Graue Emissionen des Gebäudeparks

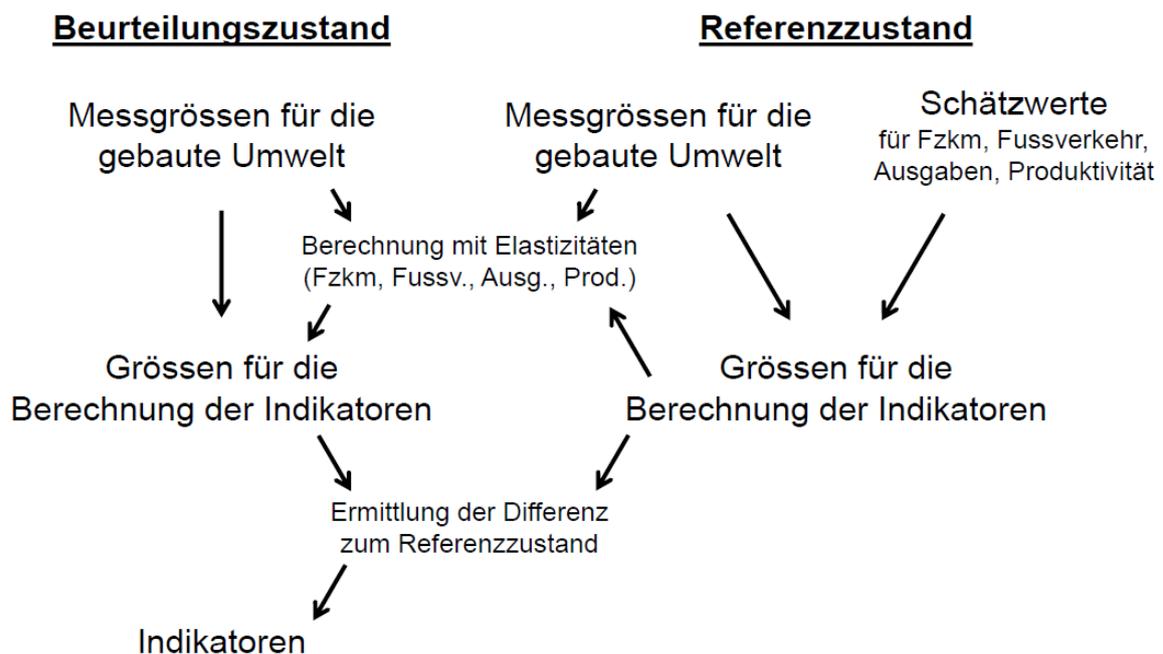
Einige dieser Eingangsgrössen können direkt aus Daten zur gebauten Umwelt ermittelt werden, während andere mit Umrechnungsformeln oder mit den in Kapitel 4.9 zusammengefassten Elastizitäten berechnet werden. Alle Eingangsgrössen werden normiert.

Die Indikatoren werden nicht für absolute Werte der Eingangsgrössen, sondern für deren Differenz zu den analogen Grössen eines Referenzzustandes (siehe Kapitel 6.3) berechnet. Dieser Referenzzustand wird zusätzlich auch benötigt, um die Berechnungen gewisser Eingangsgrössen mittels Elastizitäten durchführen zu können.

Die Ermittlung und Berechnung der Eingangsgrössen für die Berechnung der Indikatoren basieren auf Messgrössen zur gebauten Umwelt (siehe Kapitel 6.2). Diese stehen am Anfang des Modells und werden aus Daten zur gebauten Umwelt ermittelt.

Abbildung 20 verdeutlicht das Modellprinzip graphisch.

Abbildung 20 Modellprinzip



6.2 Messgrößen

Bei den im Modell verwendeten Messgrößen gilt es zu unterscheiden zwischen globalen Messgrößen, welche einen einzigen Wert für ein räumliches Gebiet theoretisch unbegrenzten Ausmasses ergeben, und individuellen Messgrößen, welche einen Wert pro Untersuchungsgegenstand ergeben (konkret sind nur Gebäude betroffen). Dabei sind gewisse globale Messgrößen einfach die Summe individueller Messgrößen. Bis auf den Entropie-Index und die Geschosshöhe werden alle im Folgenden beschriebenen Größen direkt aus Daten zur gebauten Umwelt gemessen. Der Entropie-Index $I_{Entropie}$ für den Flächennutzungsmix wird aufgrund von Messgrößen für die gebaute Umwelt berechnet. Die Berechnung wird weiter unten erläutert. Zur Geschosshöhe wird eine Annahme getroffen. Diese wird ebenfalls weiter unten erläutert.

Globale Messgrößen:

A_{Entw}	Fläche der entwickelten Parzellen [ha]
EW	Anzahl Einwohner [EW]
AP	Anzahl Arbeitsplätze [AP]
d_{EW}	Bevölkerungsdichte, bezogen auf die entw. Fläche A_{Entw} [EW / ha]
d_{AP}	Beschäftigungsdichte, bezogen auf die entw. Fläche A_{Entw} [AP / ha]
$r_{AP/EW}$	Verhältnis Beschäftigte / Einwohner [-]
d_{Str}	Strassendichte, bezogen auf die entw. Fläche A_{Entw} [m / ha]
$S_{Geb1940}$	Anteil der Gebäude mit Baujahr vor 1940 an allen Gebäuden [%]
A_{St}	Strassenoberfläche [m ²]
$I_{Entropie}$	Entropie-Index (Flächennutzungsmix) [-]
$dist_{CBD}$	Ø Entfernung zum nächstgelegenen Stadtzentrum für alle Einwohner [m]
$dist_{ÖV}$	Ø Entfernung zur nächsten ÖV-Haltestelle für alle Einwohner [m]
AP_{mile}	Ø Anzahl Arbeitsplätze innerhalb einer Meile für alle arbeitstätigen Personen [AP]
GF_{Wohnen}	Geschossfläche mit Wohnnutzung aller Gebäude [m ²]
$GF_{Nicht-Wohnen}$	Geschossfläche mit Nicht-Wohnnutzung aller Gebäude [m ²]

Individuelle Messgrößen:

$A_{Geb,g}$	Fussabdruck des Gebäudes g [m ²]
$U_{Geb,g}$	Umfang des Gebäudes g [m]

$Anz_{Gesch,g}$	Anzahl Geschosse des Gebäudes g [-]
$H_{Gesch,g}$	Geschosshöhe des Gebäudes g [m]
$GF_{Wohnen,g}$	Geschossfläche mit Wohnnutzung des Gebäudes g [m ²]
$GF_{Nicht-Wohnen,g}$	Geschossfläche mit Nicht-Wohnnutzung des Gebäudes g [m ²]

6.2.1 Berechnung des Entropie-Indexes

Der Entropie-Index $I_{Entropie}$ wird analog zu Cervero und Kockelman (1997) als durchschnittliche Entropie über sogenannte Entropie-Untersuchungsgebiete bestimmt. Diese Entropie-Untersuchungsgebiete unterteilen das Untersuchungsgebiet in kleinere räumliche Gebiete, wobei allerdings die Anzahl der Entropie-Untersuchungsgebiete auch eins betragen kann. Die konkrete Unterteilung eines zu untersuchenden Gebiets in kleinere räumliche Gebiete zur Berechnung des Entropieindex hängt von der jeweiligen Situation ab. Bei der Untersuchung eines Kantons könnten die Entropie-Untersuchungsgebiete z.B. die Gemeinden oder die Zonen des Verkehrsmodells sein, bei der Untersuchung einer Stadt z.B. die Quartiere oder Kreise.

$$I_{Entropie} = \frac{\sum_k^K \frac{E_k}{\ln(J_k)}}{K}$$

wobei:

$k = 1 \dots K$	Entropie-Untersuchungsgebiet
K	Anzahl Entropie-Untersuchungsgebiete
E_k	Entropie des Entropie-Untersuchungsgebietes k
J_k	Anzahl verschiedener Flächennutzungstypen in Gebiet k

Die Entropie eines Entropie-Untersuchungsgebietes k wird dabei wie folgt bestimmt:

$$E_k = - \sum_j^{J_k} p_{jk} \ln(p_{jk})$$

wobei:

$j = 1 \dots J_k$	Flächennutzungstyp
p_{jk}	Flächenmässiger Anteil der Flächennutzung j im Entropie-Untersuchungsgebietes k an allen vorhandenen Flächennutzungen [%]

6.2.2 Annahme zur Geschosshöhe

Für die Geschosshöhe H_{Gesch} wird in dieser Arbeit grundsätzlich ein Wert von 3 Metern angenommen. Dieser Wert basiert nicht auf einer Auswertung des Gebäudebestandes, sondern soll als grobe, erste Annäherung dienen. Eine Differenzierung nach Nutzung, Gebäudealter usw. wäre wünschenswert; die Beschaffung und Auswertung entsprechender Daten war im Rahmen dieser Arbeit aber nicht möglich.

6.3 Referenzzustand

Der Referenzzustand hat zwei wichtige Funktionen. Erstens müssen zur Berechnung gewisser Eingangsgrössen für die Berechnung der Indikatoren mit Hilfe von Elastizitäten die absoluten Werte dieser Eingangsgrössen sowie der Messwerte für die gebaute Umwelt für einen Referenzzustand bekannt sein (siehe Kapitel 6.4.3). Zweitens dienen die Eingangsgrössen für die Berechnung der Indikatoren des Referenzzustandes als Vergleichswerte für die Beurteilungszustände. So kann z.B. ermittelt werden, wie viele gefahrene Fahrzeugkilometer mehr oder weniger ein Beurteilungszustand im Vergleich zum Referenzzustand verursacht. Dieser Unterschied dient dann zur Ermittlung der Kosten und Nutzen.

Die Messgrössen für die gebaute Umwelt werden für den Referenzzustand analog zum Beurteilungszustand erhoben. Für die vier Eingangsgrössen für die Berechnung der Indikatoren, welche für den Referenzzustand bekannt sein müssen (siehe Kapitel 6.4.3), ist es im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich, genaue Werte zu ermitteln. Wichtig ist, dass die Werte eine realistische Grössenordnung aufweisen, so dass die mit Elastizitäten ermittelten Unterschiede ebenfalls in einem realistischen Rahmen liegen. Die im Folgenden aufgezeigten Werte für diese vier Grössen sollten diesem Anspruch genügen.

6.3.1 Gefahrene Fahrzeugkilometer

Die gefahrenen Fahrzeugkilometer des Referenzzustands werden grob anhand eines Durchschnittswertes pro Einwohner erhoben. Zu einem späteren Zeitpunkt könnten Daten aus einer Simulation verwendet werden.

Der verwendete Durchschnittswert basiert auf dem Mikrozensus 2010 (BFS und ARE, 2012) und beträgt 5452 Fzkm pro Einwohner und Jahr.

Grundlage der Berechnung sind die mittlere Tagesdistanz pro Person mit dem Auto als Fahrer/in im Inland von 17.3 km sowie die mittlere Tagesdistanz pro Person mit dem Auto als

Mitfahrer/in von 6.6 km (BFS und ARE, 2012, 47). Daraus ergibt sich die gesamte mittlere Tagesdistanz pro Person mit dem Auto (als Fahrer/in oder Mitfahrer/in): 23.9 km.

Der durchschnittliche distanzgewichtete Besetzungsgrad für Fahrten im Inland mit dem Auto beträgt 1.6 Personen pro Auto (BFS und ARE, 2012, 50) (Seite 50). Die resultierenden Fahrzeugkilometer pro Person und Tag betragen damit: $23.9 \text{ km} / 1.6 = 14.938 \text{ km}$. Wird dieser Wert auf ein Jahr hochgerechnet, ergibt dies 5452 Fahrzeugkilometer pro Person und Jahr.

Es scheint eine Inkonsistenz in der Berechnung zu geben: Die Anzahl Fzkm pro Person und Tag ist kleiner als die Anzahl km, die pro Person im Schnitt täglich mit den Auto als Fahrer/in zurückgelegt wird. Dieser Widerspruch konnte nicht aufgelöst werden.

Es geht bei der Bestimmung der gefahrenen Fahrzeugkilometer im Referenzzustand nicht darum, genaue Prognosen zu erstellen; dazu wäre ein Verkehrsmodell notwendig. Vielmehr soll ein Wert von realistischer Grössenordnung generiert werden, damit die mit Hilfe von Elastizitäten ermittelten Unterschiede zwischen räumlichen Gebieten ebenfalls in einem realistischen Rahmen liegen. Aus diesem Grund scheint die Verwendung eines schweizerischen Durchschnittswerts angebracht.

6.3.2 Nutzung des Fussverkehrs

Für die Nutzung des Fussverkehrs wird als Referenzwert die durchschnittliche Jahresdistanz zu Fuss pro Einwohner gemäss Mikrozensus 2010 (BFS und ARE, 2012) verwendet: 730 km.

6.3.3 Arbeitsproduktivität pro Arbeitsplatz

Da Daten zum Bruttoinlandprodukt der Kantone erst im Herbst 2012 veröffentlicht werden (Statistisches Amt, 2012b), wird zur Berechnung des Referenzwertes der Arbeitsproduktivität das durchschnittliche Bruttoinlandprodukt der Schweiz pro Einwohner 2010, 69'887 CHF (BFS, 2012b), die Einwohnerzahl der Schweiz 2010, 7'870'100 (BFS, 2012a), und die Beschäftigtenzahl der Schweiz 2010, 4'023'000 (BFS, 2012d), verwendet.

Die Arbeitsproduktivität berechnet sich gemäss Kämpf und Dietzi (2006) wie folgt:

$$Prod_{Arbeit} = BIP \times \frac{EW}{AP}$$

Die als Referenz verwendete Arbeitsproduktivität beträgt also 136'718 CHF.

6.3.4 Ausgaben für öffentliche Dienste pro Einwohner

Als Referenz wird der Durchschnittswert aller Gemeinden des Kantons Zürich für den Gesamt-Nettoaufwand ohne Finanzen und Steuern pro Einwohner im Jahr 2010 von 3987 CHF verwendet (Statistisches Amt, 2012a). Es ist allerdings zu bemerken, dass dieser Wert zwischen den einzelnen Gemeinden stark variiert. Von den Gemeinden, für welche Daten vorlagen, war der Gesamt-Nettoaufwand ohne Finanzen und Steuern pro Einwohner im Jahr 2010 in Ottenbach mit 1340 CHF am tiefsten, in der Stadt Zürich mit 6231 CHF am höchsten.

6.4 Eingangsgrößen für die Berechnung der Indikatoren

Für die Berechnung der Indikatoren werden folgende Eingangsgrößen verwendet:

- Gefahrene Fahrzeugkilometer VKT
- Nutzung des Fussverkehrs N_{Fuss}
- Arbeitsproduktivität $Prod_{Arbeit}$
- Ausgaben für öffentliche Dienste $Ausg_{Dienste}$
- Fläche aller entwickelten Parzellen A_{Entw}
- Geschossflächen mit Wohnnutzung GF_{Wohnen}
- Geschossflächen mit Nicht-Wohnnutzung $GF_{Nicht-Wohnen}$
- Oberfläche der Strassen A_{St}
- Graue Emissionen des Gebäudeparks $GE_{Gebäudepark}$

Um Normierungen vornehmen zu können müssen zudem bekannt sein:

- Anzahl Einwohner EW
- Anzahl Arbeitsplätze AP

Gewisse der Eingangsgrößen für die Berechnung der Indikatoren können direkt aus Daten zur gebauten Umwelt gemessen werden, andere müssen aufgrund solcher Daten berechnet werden. Die genaue Berechnung wird im Folgenden erläutert.

6.4.1 Direkte Messung aus Daten zur gebauten Umwelt

Folgende Eingangsgrößen für die Berechnung der Indikatoren können direkt aus den Daten zur gebauten Umwelt gemessen werden:

- Fläche aller entwickelten Parzellen
- Geschossflächen mit Wohnnutzung

- Geschossflächen mit Nicht-Wohnnutzung
- Oberfläche der Strassen
- Anzahl Einwohner
- Anzahl Arbeitsplätze

6.4.2 Berechnung mit Umrechnungsformeln: Graue Emissionen des Gebäudeparks

Die grauen Emissionen des Gebäudeparks werden mit speziellen Umrechnungsformeln ermittelt. Die Berechnung ist aus dem Vorgehen nach SIA (2010) zur Bestimmung der grauen Energie von Gebäuden abgeleitet, wonach für verschiedene Bestandteile eines Gebäudes Flächen oder Volumen erhoben und mit entsprechenden Emissionsfaktoren multipliziert werden, welche abhängig von der Konstruktionsweise sind. Allerdings werden hier vereinfachend zahlreiche Annahmen getroffen, um die Flächen und Volumen der relevanten Gebäudebestandteile aus einfachen und in den vorhandenen Daten verfügbaren Grössen abzuleiten – die so entwickelte Berechnung der grauen Emissionen eines Gebäudes basiert letztlich auf nur vier Grössen:

$$GE_{Geb,g} = f(A_{Geb,g}, Anz_{Gesch,g}, U_{Geb,g}, GF_{Wohnen,g})$$

wobei:

$$GE_{Geb,g} = \text{Graue Emissionen des Gebäudes } g \text{ pro Jahr, CO}_2\text{-äqu. [g / a]}$$

SIA (2010) berücksichtigt die durchschnittliche Lebensdauer von Bauteilen in Abhängigkeit von der Konstruktionsweise und liefert Werte für die grauen Emissionen pro Jahr.

Gewisse der hier getroffenen Annahmen basieren auf einer Auswertung von Beispielen. Diese Auswertung sowie die in diesem Kapitel verwendeten Emissionsfaktoren werden in Kapitel 6.8.3 näher erläutert.

Das Fundament wird in der Grösse des Fussabdrucks des Gebäudes angenommen. Weiterhin wird angenommen, dass jedes Gebäude über ein vollständig unterirdisches Geschoss verfügt (Fläche = Fussabdruck des Gebäudes) und das Aushubvolumen näherungsweise dem Volumen dieses Untergeschosses entspricht.

$$A_{Fundament,g} = A_{Geb,g}$$

$$A_{AW,UT,g} = H_{Gesch} \times U_{Geb,g}$$

$$V_{Aushub,g} = H_{Gesch} \times A_{Geb,g}$$

wobei:

$A_{Fundament,g}$	Fundament des Gebäudes g, Bauteilfläche [m ²]
$A_{AW,UT,g}$	Aussenwand unter Terrain des Gebäudes g, Bauteilfläche [m ²]
$V_{Aushub,g}$	Aushubvolumen des Gebäudes g [m ³]

Es wird angenommen, dass die Geschossfläche (GF) pro Geschoss (inkl. Untergeschoss), die Decken pro Geschoss sowie das Dach die Fläche des Fussabdrucks des Gebäudes aufweisen.

$$GF_{Geb,g} = (Anz_{Gesch,g} + 1) \times A_{Geb,g}$$

$$A_{Decke,g} = Anz_{Gesch,g} \times A_{Geb,g}$$

$$A_{Dach,g} = A_{Geb,g}$$

wobei:

$GF_{Geb,g}$	Geschossfläche des Gebäudes g [m ²]
$A_{Decke,g}$	Decke des Gebäudes g, Bauteilfläche [m ²]
$A_{Dach,g}$	Dach des Gebäudes g, Bauteilfläche [m ²]

Es wird weiterhin angenommen, dass die Aussenwände über Terrain zu 60 % aus opaker Wandfläche und zu 40 % aus Einbauten (Fenster, Türen) bestehen (siehe Beispielauswertung in Kapitel 6.8.3).

$$A_{AW,OT,g} = 60\% \times Anz_{Gesch,g} \times U_{Geb,g} \times H_{Gesch,g}$$

$$A_{AW,EB,g} = 40\% \times Anz_{Gesch,g} \times U_{Geb,g} \times H_{Gesch,g}$$

wobei:

$A_{AW,OT,g}$	Aussenwand über Terrain des Gebäudes g, Bauteilfläche [m ²]
$A_{AW,EB,g}$	Einbauten zu Aussenwand des Gebäudes g, Bauteilfläche [m ²]

Die Balkonfläche wird mit 10 % der Wohnfläche angenommen (siehe Beispielauswertung in Kapitel 6.8.3).

$$A_{Balkon,g} = 10\% \times GF_{Wohnen,g}$$

wobei:

$A_{Balkon,g}$ Balkon des Gebäudes g, Bauteilfläche [m²]

Zu guter Letzt wird angenommen, dass die Energiebezugsfläche (EBF) 90 % der GF beträgt (siehe Beispielauswertung in Kapitel 6.8.3).

$$EBF_{Geb,g} = 90\% \times GF_{Geb,g}$$

wobei:

$EBF_{Geb,g}$ Energiebezugsfläche des Gebäudes g [m²]

Die grauen Treibhausgasemissionen eines Gebäudes lassen sich aufgrund der getroffenen Annahmen wie folgt berechnen:

$$\begin{aligned} GE_{Geb,g} = & V_{Aushub,g} \times EF_{Aushub} + A_{Fundament,g} \times EF_{Fundament} + A_{AW,UT,g} \times EF_{AW,UT} \\ & + A_{AW,OT,g} \times EF_{AW,OT} + GF_{Geb,g} \times EF_{IW} + A_{Decke,g} \times EF_{Decke} + A_{Balkon,g} \\ & \times EF_{Balkon} + A_{Dach,g} \times EF_{Dach} + EBF_{Geb,g} \times EF_{Haustech} + A_{AW,EB,g} \\ & \times EF_{AW,EB} \end{aligned}$$

wobei:

EF_i Emissionsfaktor zur Grösse i, CO₂-äqu. [g / m² oder m³]

EF_{IW} Emissionsfaktor zur Innenwand [g / m² GF]

$EF_{Haustech}$ Emissionsfaktor zu Elektoranlage, Wärmeanlage, Lüftung und Sanitäreanlage [g / m² EBF]

Die grauen Treibhausgasemissionen des gesamten Gebäudeparks ergeben sich durch die Aufsummierung der Emissionen der einzelnen Gebäude:

$$GE_{Gebäudepark} = \sum_g^G GE_g$$

wobei:

$GE_{Gebäudepark}$ Graue Emissionen des Gebäudeparks pro Jahr, CO₂-äqu. [g / a]

g Gebäude g

G Anzahl Gebäude im Gebäudepark

6.4.3 Berechnung mit Hilfe von Elastizitäten und Referenzzustand

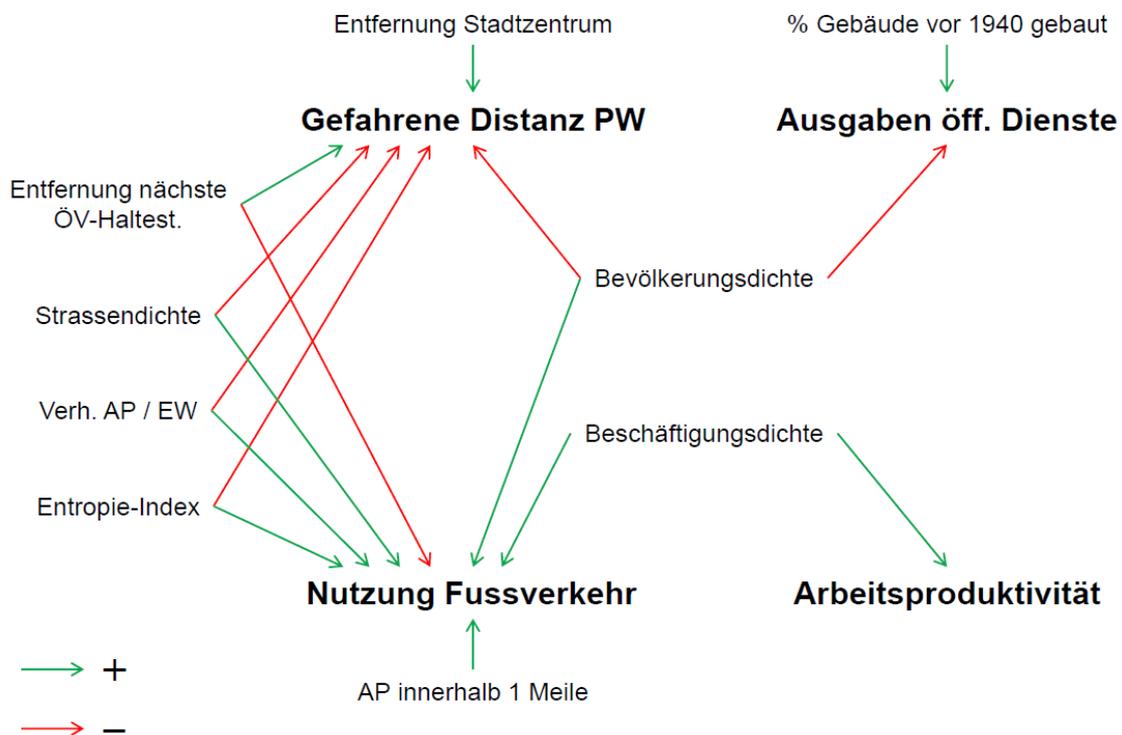
Folgende Eingangsgrössen für die Berechnung der Indikatoren werden mit Elastizitäten und Daten zu einem Referenzzustand berechnet:

- Gefahrene Fahrzeugkilometer
- Nutzung des Fussverkehrs
- Arbeitsproduktivität
- Ausgaben für öffentliche Dienste

Ermittlung prozentualer Unterschiede zum Referenzzustand

Es wird für jede der vier betroffenen Eingangsgrössen für die Berechnung der Indikatoren der prozentuale Unterschied der Werte für den Beurteilungszustand und für den Referenzzustand berechnet. Die dafür verwendeten Faktoren (Elastizitäten) werden in Kapitel 4.9, Tabelle 17 zusammenfassend dargestellt (die fett gesetzten Werte werden im Modell verwendet). Die verwendeten Elastizitäten werden zudem in Abbildung 21 qualitativ dargestellt.

Abbildung 21 Qualitative Darstellung der im Beurteilungsmodell verwendeten Elastizitäten



Gewisse in Tabelle 17 vorhandene Elastizitäten für erklärende Variablen können aufgrund der verfügbaren Daten zur gebauten Umwelt nicht verwendet werden. Dies ist z.B. bei der Arbeitsplatzreichbarkeit der Fall.

δ wird als Zeichen für einen prozentualen Unterschied verwendet. Zum Beispiel benennt δd_{EW} den prozentualen Unterschied der Einwohnerdichte zwischen Referenzzustand und Beurteilungszustand.

Der Referenzzustand wird in Kapitel 6.3 näher erläutert.

Gefahrene Fahrzeugkilometer [Fzkm / (EW x a)]

$$\delta VKT = -0.025 \times \delta d_{EW} - 0.057 \times \delta I_{Entropie} - 0.013 \times \delta r_{AP/EW} - 0.076 \times \delta d_{Str} \\ + 0.140 \times \delta dist_{CBD} + 0.032 \times \delta dist_{\ddot{O}V}$$

Nutzung des Fussverkehrs [km / (EW x a)]

$$\delta N_{Fuss} = 0.045 \times \delta d_{EW} + 0.025 \times \delta d_{AP} + 0.095 \times \delta I_{Entropie} + 0.121 \times \delta r_{AP/EW} + 0.248 \\ \times \delta d_{Str} + 0.095 \times \delta AP_{mile} - 0.095 \times \delta dist_{\ddot{O}V}$$

Arbeitsproduktivität [CHF / (AP x a)]

$$\delta Prod_{Arbeit} = 0.051 \times \delta d_{AP}$$

Ausgaben für öffentliche Dienste [CHF / (EW x a)]

$$\delta Ausg_{Dienste} = -0.04 \times \delta d_{EW} + 0.2836 \times \delta r_{AP/EW} + 0.0337 \times \delta s_{Geb1940}$$

Ermittlung der absoluten Werte

Mit Hilfe der berechneten prozentualen Unterschiede lassen sich die absoluten Werte für die Eingangsgrößen für die Berechnung der Indikatoren für den Beurteilungszustand ermitteln:

$$VKT_{Beurteilungszustand} = (1 + \delta VKT) \times VKT_{Referenzzustand}$$

$$N_{Fuss,Beurteilungszustand} = (1 + \delta N_{Fuss}) \times N_{Fuss,Referenzzustand}$$

$$Prod_{Arbeit,Beurteilungszustand} = (1 + \delta Prod_{Arbeit}) \times Prod_{Arbeit,Referenzzustand}$$

$$Ausg_{Dienste,Beurteilungszustand} = (1 + \delta Ausg_{Dienste}) \times Ausg_{Dienste,Referenzzustand}$$

6.4.4 Normierung

Um die Vergleichbarkeit von Gebieten mit unterschiedlicher Anzahl Arbeitsplätze und Einwohner zu gewährleisten, müssen alle Eingangsgrößen zur Berechnung der Indikatoren normiert sein. Die Eingangsgrößen gefahrene Fahrzeugkilometer, Nutzung des Fussverkehrs und Ausgaben für öffentliche Dienste wurden bereits pro Einwohner ermittelt, die Arbeitsproduktivität wird pro Arbeitsplatz erfasst. Sie müssen deshalb nicht weiter normiert werden. Die übrigen Größen werden entweder mit der Summe der Anzahl Einwohner und Anzahl Arbeitsplätze in einem Gebiete oder in besonderen Fällen nur mit der Anzahl Einwohner oder der Anzahl Arbeitsplätze normiert. Es wird jeweils erläutert, weshalb welche Art der Normierung zum Einsatz kommt.

Fläche aller entwickelten Parzellen

Die Fläche der entwickelten Parzellen, welche der Ermittlung der Kosten der Versiegelung dient, wird mit der Summe aus der Anzahl Einwohner und der Anzahl Arbeitsplätze normiert, da eine Zuordnung zu Nutzungen nicht auf einfache Art und Weise möglich ist.

$$A_{Entw.,norm} = \frac{A_{Entw}}{EW + AP}$$

Oberfläche der Strassen

Die Fläche der Strassen, welche der Berechnung der grauen Emissionen der Strassen dient, wird mit der Summe der Anzahl Einwohner und der Arbeitsplätze normiert, da eine Zuordnung zu einer Nutzung nicht möglich ist.

$$A_{St,norm} = \frac{A_{St}}{EW + AP}$$

Graue Emissionen des Gebäudeparks

Die grauen Emissionen des Gebäudeparks werden mit der Summe der Anzahl Einwohner und der Arbeitsplätze normiert, da eine Zuordnung zu einer Nutzung nicht auf einfache Art und Weise möglich ist.

$$GE_{Gebäudepark,norm} = \frac{GE_{Gebäudepark}}{EW + AP}$$

Geschossflächen mit Wohnnutzung und mit Nicht-Wohnnutzung

Die Geschossflächen, welche der Berechnung der Emissionen aus dem Betrieb von Gebäuden dienen, werden im Falle von Wohnflächen mit der Anzahl Einwohner, im Falle von Nicht-Wohnflächen mit der Anzahl Arbeitsplätze normiert.

$$GF_{Wohnen,norm} = \frac{GF_{Wohnen}}{EW}$$

$$GF_{Nicht-Wohnen,norm} = \frac{GF_{Nicht-Wohnen}}{AP}$$

Bemerkungen zur Normierung

Eine Normierung wäre auch über andere Grössen möglich. Beispielsweise könnte die Strassenoberfläche auch mit der entwickelten Fläche normiert werden, die normierte Grösse wäre dann die Strassenoberfläche in m² pro ha entwickelte Fläche. Auch die Ermittlung der grauen Emissionen des Gebäudeparks pro ha entwickelte Fläche wäre sinnvoll.

Letztlich wird der Ansatz mit Einwohnern und Arbeitsplätzen vor allem verwendet, um die Vergleichbarkeit und damit eine direkte kombinierte Nutzung der normierten Grössen zur Berechnung der Indikatoren zu gewährleisten. Andere Ansätze zur Normierung könnten aber zu wertvollen Ergänzungen und Verbesserungen des Modells führen. Ihre Anwendung war im Rahmen dieser Arbeit aber nicht möglich.

6.4.5 Ermittlung des Unterschieds zum Referenzzustand

Für die Eingangsgrössen für die Berechnung der Indikatoren eines Beurteilungszustandes wird die Differenz zwischen dem jeweiligen Wert und dem analogen Wert des Referenzzustandes ermittelt. Erst mit diesen Differenzwerten werden dann die Indikatoren und damit die Kosten und Nutzen berechnet. Dadurch wird für einen Beurteilungszustand die durch Unterschiede in der gebauten Umwelt verursachte Abweichung der Kosten und Nutzen vom Referenzzustand ermittelt.

Entsprechend gilt:

$$VKT_{Diff} = VKT_{Beurteilungszustand} - VKT_{Referenzzustand}$$

$$N_{Fuss,Diff} = N_{Fuss,Beurteilungszustand} - N_{Fuss,Referenzzustand}$$

$$Prod_{Arbeit,Diff} = Prod_{Arbeit,Beurteilungszustand} - Prod_{Arbeit,Referenzzustand}$$

$$Ausg_{Dienste,Diff} = Ausg_{Dienste,Beurteilungszustand} - Ausg_{Dienste,Referenzzustand}$$

$$A_{Entw,Diff} = A_{Entw,norm,Beurteilungszustand} - A_{Entw,norm,Referenzzustand}$$

$$GF_{Wohnen,Diff} = GF_{Wohnen,norm,Beurteilungszustand} - GF_{Wohnen,norm,Referenzzustand}$$

$$\begin{aligned} GF_{Nicht-Wohnen,Diff} \\ &= GF_{Nicht-Wohnen,norm,Beurteilungszustand} \\ &- GF_{Nicht-Wohnen,norm,Referenzzustand} \end{aligned}$$

$$A_{St,Diff} = A_{St,norm,Beurteilungszustand} - A_{St,norm,Referenzzustand}$$

$$\begin{aligned} GE_{Gebäudepark,Diff} \\ &= GE_{Gebäudepark,norm,Beurteilungszustand} \\ &- GE_{Gebäudepark,norm,Referenzzustand} \end{aligned}$$

6.5 Berechnung der Indikatoren

Zur Berechnung der Indikatoren werden neben den in Kapitel 6.4 erläuterten Eingangsgrössen auch Kosten- resp. Nutzenraten und Emissionsfaktoren verwendet. Die Herleitung und Quellen dieser zusätzlichen Faktoren werden in den Kapiteln 6.7 (Wertgerüst) und 6.8 (Emissionsfaktoren) erläutert.

6.5.1 Unfälle

$$K_{Unfall} = V_{Unfall} \times VKT_{Diff}$$

wobei:

K_{Unfall}	Unfallkosten [CHF / a]
V_{Unfall}	Unfallkostenrate [CHF / Fzkm]

6.5.2 Lärm

$$K_{Lärm} = (V_{Lärm,Miete} + V_{Lärm,Gesundheit}) \times VKT_{Diff}$$

wobei:

$K_{Lärm}$	Lärmkosten [CHF / a]
$V_{Lärm,Miete}$	Lärmkostenrate Mietzinsausfälle [CHF / Fzkm]
$V_{Lärm,Gesundheit}$	Lärmkostenrate Gesundheitskosten [CHF / Fzkm]

6.5.3 Luftverschmutzung

$$K_{Luft} = (EF_{PM10}(V_{Luft,PM10,Ges,lok} + V_{Luft,PM10,Ges,reg} + V_{Luft,PM10,Geb,lok} + V_{Luft,PM10,Geb,reg}) + EF_{NOx} \times V_{Luft,NOx} + EF_{Zink} \times V_{Luft,Zink}) \times VKT_{Diff}$$

wobei:

K_{Luft}	Luftverschmutzungskosten [CHF / a]
EF_{PM10}	Emissionsfaktor PM10 (Feinstaub („Particulate Matter“) mit einem Durchmesser von unter 10 Mikrometer) [g / Fzkm]
EF_{NOx}	Emissionsfaktor NOx [g / Fzkm]
EF_{Zink}	Emissionsfaktor Zink [g / Fzkm]
$V_{Luft,PM10,Ges,lok}$	Luftverschmutzungskostenrate Gesundheitskosten für PM10 lokal [CHF / g]
$V_{Luft,PM10,Ges,reg}$	Luftverschmutzungskostenrate Gesundheitskosten für PM10 regional [CHF / g]
$V_{Luft,PM10,Geb,lok}$	Luftverschmutzungskostenrate Gebäudeschäden für PM10 lokal [CHF / g]
$V_{Luft,PM10,Geb,reg}$	Luftverschmutzungskostenrate Gebäudeschäden für PM10 regional [CHF / g]
$V_{Luft,NOx}$	Luftverschmutzungskostenrate Ernteauffälle und Waldschäden für NOx regional [CHF / g]
$V_{Luft,Zink}$	Luftverschmutzungskostenrate für Zink regional [CHF / g]

6.5.4 Klima

$$K_{Klima} = \left((EF_{CO_2} + GWP_{CH_4} \times EF_{CH_4} + GWP_{N_2O} \times EF_{N_2O}) \times VKT_{Diff} + EF_{Wohnen} \right. \\ \left. \times GF_{Wohnen,Diff} + EF_{Nicht-Wohnen} \times GF_{Nicht-Wohnen,Diff} \right. \\ \left. + GE_{Gebäudepark,Diff} + EF_{St} \times A_{St,Diff} \right) \times V_{CO_2}$$

wobei:

K_{Klima}	Klimakosten [CHF / a]
EF_{CO_2}	Emissionsfaktor CO ₂ [g / Fzkm]
EF_{CH_4}	Emissionsfaktor CH ₄ [g / Fzkm]
EF_{N_2O}	Emissionsfaktor N ₂ O [g / Fzkm]
GWP_{CH_4}	Global Warming Potential von CH ₄ [-] = 23
GWP_{N_2O}	Global Warming Potential von N ₂ O [-] = 296
V_{CO_2}	Klimakosten CO ₂ -äquivalent [CHF / g]
EF_{Wohnen}	Emissionsfaktor Gebäude mit Wohnnutzung [g / (m ² x a)]
$EF_{Nicht-Wohnen}$	Emissionsfaktor Gebäude mit Nicht-Wohnnutzung [g / (m ² x a)]
EF_{St}	Emissionsfaktor graue Emissionen Strassen [g / (m ² x a)]

6.5.5 Gesundheit

$$U_{Gesundheit} = V_{Fuss} \times N_{Fuss,Diff}$$

wobei:

$U_{Gesundheit}$	Gesundheitsnutzen [CHF / a]
V_{Fuss}	Gesundheitsnutzenrate [CHF / Fusskm]

6.5.6 Bruttoinlandprodukt

Um die von der gebauten Umwelt beeinflusste Variation der Arbeitsproduktivität zu bewerten, wird die Veränderung eines fiktiven durchschnittlichen schweizerischen Bruttoinlandproduktes (BIP) erfasst. Diese Veränderung würde sich aus einer Veränderung der durchschnittlichen nationalen Arbeitsproduktivität in der Höhe von $Prod_{Arbeit,Diff}$ ergeben. Die Veränderung dieses fiktiven BIP wird direkt als Nutzen betrachtet.

$$\Delta BIP = Prod_{Arbeit,Diff} \times \frac{AP_{CH}}{EW_{CH}}$$

wobei:

ΔBIP	Veränderung des BIP [CHF / a]
AP_{CH}	Arbeitsplätze in der Schweiz [AP]
EW_{CH}	Einwohner der Schweiz [EW]

Für die Anzahl Einwohner und Beschäftigte werden die Werte aus dem Jahr 2010 verwendet. Die Einwohnerzahl der Schweiz betrug im Jahr 2010 7'870'100 (BFS, 2012a). Für die Anzahl Arbeitsplätze wird die Beschäftigtenzahl im Jahr 2010 von 4'023'000 verwendet (BFS, 2012d).

6.5.7 Kosten für öffentliche Dienste

Die Ausgaben für die öffentlichen Dienste werden direkt als Kosten betrachtet.

$$K_{Dienste} = Ausg_{Dienste,Diff}$$

wobei

$K_{Dienste}$	Kosten für öffentliche Dienste [CHF / a]
---------------	--

6.5.8 Versiegelung

$$K_{Versiegelung} = V_{Versiegelung} \times A_{Entw,Diff}$$

wobei:

$K_{Versiegelung}$	Versiegelungskosten [CHF / a]
$V_{Versiegelung}$	Versiegelungskostenrate [CHF / ha]

6.6 Diskontierung und Aufsummierung der Kosten und Nutzen

Um die Auswirkungen der gebauten Umwelt über mehrere Jahre betrachten zu können, müssen die Auswirkungen diskontiert werden. Mit der Diskontierung, auch Abzinsung genannt, wird der Wert einer künftigen Zahlung für einen früheren Zeitpunkt berechnet. Der Grund dafür, dass eine künftige Zahlung nicht zu jedem Zeitpunkt den gleichen Wert hat, ist die Existenz von Zinsen. Mit dem sogenannten Diskontsatz wird die Höhe des Zinses berücksichtigt.

Der Wert einer Zahlung zu einem 10 Jahre früher gelegenen Zeitpunkt beträgt:

$$\text{Wert 10 Jahre früher} = \frac{1}{(1 + \text{Diskontsatz})^{10 \text{ Jahre}}} \times \text{Zahlung}$$

Die Diskontierung wird hier auf die Kosten und Nutzen, erfasst durch die Indikatoren, angewandt. Die Rechnung wird für jedes Jahr in einem sogenannten Betrachtungszeitraum durchgeführt und die einzelnen Ergebnisse aufsummiert. Für jedes Jahr müssen die Werte für die einzelnen Indikatoren neu berechnet werden, da sich gewisse Faktoren zur Bewertung und zu Emissionen im Laufe der Zeit verändern (siehe Kapitel 6.7 und 6.8). Diese Veränderung hat nichts mit der Diskontierung zu tun, sondern wirkt parallel dazu.

Es wird ein Diskontsatz δ von 2 % gemäss der VSS-Norm zum Diskontsatz bei Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr verwendet (VSS, 2006a).

Die Festlegung des Betrachtungszeitraums ist schwierig, da über die Lebensdauer der gesamten gebauten Umwelt kaum verlässliche Prognosen vorliegen. Diese müssten aus den Prognosen zu Lebensdauern der einzelnen Bestandteile wie Gebäude und Strassen sowie deren Komponenten abgeleitet werden, was im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich war. Ein Betrachtungszeitraum von 30 bis 50 Jahren erscheint angebracht.

Das Resultat der Nachhaltigkeitsbeurteilung wird wie folgt berechnet:

$$R = \sum_{t=0}^T \frac{1}{(1 + \delta)^t} (-K_{Unfall,t} - K_{Lärm,t} - K_{Luft,t} - K_{Klima,t} + U_{Gesundheit,t} + \Delta BIP_t - K_{Dienste,t} - K_{Versiegelung,t})$$

wobei:

R	Resultat der Beurteilung [CHF]
δ	Diskontsatz [-] = 2%
T	Betrachtungszeitraum [Jahre]
$t = 0 \dots T$	Jahr im Betrachtungszeitraum

Je höher R ausfällt, desto nachhaltiger ist der entsprechende Beurteilungszustand.

Wird eine detaillierte Aufschlüsselung der Beurteilung für die einzelnen Indikatoren gewünscht, kann auch jeder Kosten- und Nutzenfaktor separat diskontiert und danach als Gesamtergebnis die Summe der einzelnen diskontierten Faktoren gebildet werden.

6.7 Wertgerüst

Tabelle 18 zeigt die für die Berechnung der Indikatoren verwendeten Kosten- und Nutzenraten, deren Veränderung über die Zeit sowie die jeweilige Quelle. Im Anschluss wird die Berechnung der Gesundheitsnutzenrate, des Faktors für die Berücksichtigung der Bevölkerungsentwicklung sowie des Faktors für die Berücksichtigung der Reallohnentwicklung erläutert.

Tabelle 18 Wertgerüst des Modells zur Beurteilung der Nachhaltigkeit
Preisstand 2005, Werte für 2005 (ausser CO₂, für 2010)

Indikator, Kosten- od. Nutzenrate	Einheit	Wert	Anpassung	Quelle
Unfälle				
V_{Unfall}	[CHF / Fzkm]	0.2471	-2% / a; RL	VSS (2010)(2)
Lärm				
$V_{Lärm,Miete}$	[CHF / Fzkm]	0.0087	+0.3% / a	VSS (2009)(3)
$V_{Lärm,Gesundheit}$	[CHF / Fzkm]	0.0009	+0.3% / a	ebd.
Luftverschmutzung				
$V_{Luft,PM10,Ges,lok}$	[CHF / g]	0.1860	RL, BV	VSS (2009)(4)
$V_{Luft,PM10,Ges,reg}$	[CHF / g]	0.2600	RL, BV	ebd.
$V_{Luft,PM10,Geb,lok}$	[CHF / g]	0.0450	(1)	ebd.
$V_{Luft,PM10,Geb,reg}$	[CHF / g]	0.0210	(1)	ebd.
$V_{Luft,NOx}$	[CHF / g]	0.0031	konstant	ebd.
$V_{Luft,Zink}$	[CHF / g]	0.9190	konstant	ebd.
Klima				
V_{CO_2}	[CHF / g]	4E-5	+2.5E-6 / a	VSS (2009)
Gesundheit				
V_{Fuss}	[CHF / Fusskm]	6.7	RL	(5)
Versiegelung				
$V_{Versiegelung}$	[CHF / ha]	3000	konstant	VSS (2009)

RL: Veränderung der Reallöhne

BV: Veränderung der Bevölkerung

- (1) 2005 – 2030: +1.1% / a
 2030 – 2050: +0.5% / a
 2050 – 2070: +0.4% / a
 2070 – 2100: +0.3% / a

(2) Vereinfachtes Verfahren nach Ziffer 21, Strassentyp „Total“

(3) Vereinfachte Methode nach Ziffer 17 (ohne Lärmmodell)

(4) Vereinfachte Methode nach Ziffer 24 (nur eine einzige Zahl zur Veränderung der Fzkm)

(5) Eigene Berechnung, siehe unten

6.7.1 Berechnung der Gesundheitsnutzenrate

Bei der Berechnung der Gesundheitsnutzenrate V_{Fuss} geht es letztlich darum, den Nutzen eines Kilometers zusätzlichem Fussverkehr einer Person in einem Jahr in einer monetären Einheit zu ermitteln. Es wurden keine Arbeiten gefunden, die einen solchen Wert direkt liefern würden, weshalb ein entsprechender Wert selbst berechnet wurde.

Das verwendete Vorgehen basiert auf der Arbeit von Boarnet, Greenwald und McMillan (2008), welche sich wiederum auf Leon, Connett, Jacobs und Rauramaa (1987) beziehen. Tabelle 19 zeigt die altersgewichteten Sterblichkeitsraten des ersten und zweiten Tertils von Untersuchungspersonen, unterteilt nach physischer Aktivität, aus einer Studie von Leon et al. (1987).

Tabelle 19 *Age-adjusted mortality rates* in Abhängigkeit von physischer Aktivität

	<i>Number of Deaths per 1,000 Persons, First Tertile of Moderate Physical Activity</i>	<i>Number of Deaths per 1,000 Persons, Second Tertile of Moderate Physical Activity</i>	<i>Age-adjusted Risk Ratio, Second Tertile of Physical Activity Relative to First Tertile (95 % Confidence Interval in Parentheses)</i>	<i>Number of Deaths per Year per 1,000 Persons, First Tertile of Physical Activity</i>	<i>Number of Deaths per Year per 1,000 Persons, Second Tertile of Physical Activity</i>
Coronary heart disease death	24.6	15.4	.63 (.43-.86)	3.5	2.2
Sudden death	15.6	9.8	.63 (.42-.93)	2.2	1.4
All-cause death	47.7	33.7	.71 (.57-.88)	6.8	4.8

Quelle: Boarnet et al. (2008, 348), adaptiert aus Leon et al. (1987, 2392)

Der Mittelwert der Minuten physischer Aktivität pro Tag betrug im ersten Tertil 16 Minuten und im zweiten Tertil 48 Minuten, die Differenz beträgt also 32 Minuten. Der Unterschied in der Anzahl Tode vom ersten zum zweiten Tertil beträgt 2 / 1000 („All-cause death“ in den Spalten 5 und 6 von Tabelle 19).

Aus Mangel an anderen Daten oder Erkenntnissen zu diesem Thema werden diese Werte zu einer Annahme kombiniert: Durch eine zusätzliche tägliche Gehzeit von 32 Minuten einer Person werden 0.002 Leben pro Jahr gerettet.

Die jährliche Anzahl geretteter Leben pro zusätzlicher täglicher Gehminute einer Person beträgt demnach $0.002 \text{ Leben} / 32 \text{ min} = 0.0000625 \text{ Leben} / \text{min}$. Die Anzahl geretteter Leben pro zusätzlicher täglicher Gehstunde einer Person beträgt $60 \text{ min} / \text{h} \times 0.0000625 \text{ Leben} / \text{min} = 0.00375 \text{ Leben} / \text{h}$.

Mit Hilfe der durchschnittlichen Gehgeschwindigkeit zu Fuss in der Schweiz von 4.9 km/h (BFS und ARE, 2012) lässt sich daraus die jährliche Anzahl geretteter Leben pro zusätzlichem täglichem km Fussdistanz einer Person berechnen: $0.00375 \text{ Leben} / \text{h} / (4.9 \text{ km} / \text{h}) = 0.000765306 \text{ Leben} / \text{km}$.

Mit dem Wert eines Lebens von 3'191'400 CHF (Preisstand und Wert für 2005) (VSS, 2010) lässt sich daraus der jährliche Wert eines zusätzlichen täglichen Kilometers Fussdistanz einer Person berechnen: $0.000765306 \text{ Leben} / \text{km} \times 3'191'400 \text{ CHF} / \text{Leben} = 2442.40 \text{ CHF} / \text{km}$.

Der jährliche Wert eines zusätzlichen in einem Jahr zu Fuss zurückgelegten Kilometers einer Person beträgt demnach: $2442.40 \text{ CHF} / \text{km} / 365 = 6.70 \text{ CHF} / \text{km}$.

Dieses Vorgehen hat eine zentrale Schwäche. Hinweise von Boarnet et al. (2008) deuten darauf hin, dass der Unterschied in der Sterblichkeit zwischen dem zweiten und dem dritten Tertil in Leon et al. (1987) wesentlich geringer ist als der hier verwendete Unterschied zwischen erstem und zweitem Tertil. Dies deutet darauf hin, dass die implizite Annahme einer Linearität des Nutzens zusätzlicher zu Fuss zurückgelegter Distanz möglicherweise nicht zulässig ist.

Trotz der Schwächen bietet dieses Vorgehen eine Methode, um die Nutzung des Fussverkehrs bewerten zu können. Weitere Untersuchungen zu diesem Thema könnten eine wertvolle Verbesserung des Modells bewirken.

Der verwendete Wert für ein Leben liegt zwischen den beiden von Boarnet et al. (2008) zitierten Werten von 2'473'620 \$ (Mrozek und Taylor, 2002) und 7'381'513 \$ (U.S. Environmental Protection Agency, 2000) (Wert und Preisstand jeweils 2006).

6.7.2 Faktor für die Berücksichtigung der Bevölkerungsentwicklung

Der Einfluss der Bevölkerungsentwicklung auf gewisse Kostenraten wird anhand eines Faktors (Prozent der Bevölkerung in einem bestimmten Jahr in Bezug zu einem Basisjahr) berücksichtigt. Dieser wird anhand der in VSS (2009) verwendeten Bevölkerungsprognose für die Schweiz mit dem Basisjahr 2005 berechnet, welche dem mittleren Szenario des BFS (2006) entspricht (siehe Tabelle 20). Für den Zeitraum nach 2050 wird die Bevölkerungszahl von 2050 verwendet. Für Jahre, die zwischen zwei Jahren mit Werten liegen, wird aufgrund dieser Werte interpoliert.

Tabelle 20 Berechnung des Faktors zur Berücksichtigung der Bevölkerungsentwicklung mit dem mittleren Szenario des BFS

Jahr	Bevölkerungszahl	Bevölkerungsfaktor
2005	7'415'100	1.000
2010	7'650'000	1.032
2015	7'850'000	1.059
2020	7'983'100	1.077
2025	8'073'400	1.089
2030	8'134'900	1.097
2035	8'160'900	1.101
2040	8'155'300	1.100
2045	8'124'300	1.096
2050	8'073'100	1.089

Quelle: VSS (2009, 14), Tabelle 5; Originalquelle: BFS (2006, 67), Tabelle T1-A00

6.7.3 Faktor für die Berücksichtigung der Reallohnentwicklung

Für die Entwicklung der Reallöhne wird von einem jährlichen Wachstum von 0.427 % ausgegangen, was dem durchschnittlichen Wachstum der Reallöhne in der Schweiz pro Jahr in den Jahren 1990 – 2011 (BFS, 2012c) entspricht. Entsprechend wird angenommen, dass auch die an die Reallohnentwicklung anzupassenden Kostenraten um jährlich 0.427 % zunehmen.

6.8 Emissionsfaktoren

6.8.1 Emissionen von Fahrzeugen

Da die mit Hilfe von Elastizitäten berechneten gefahrenen Fahrzeugkilometer nur auf Fahrten von Personenwagen bezogen sind, werden auch nur die Emissionsfaktoren von Personenwagen berücksichtigt. Diese sind für die Jahre 1990 bis 2035 in Tabelle 21 aufgeführt. Für den Zeitraum nach 2035 werden die Werte als konstant angenommen (d.h. die Werte für 2035 verwendet). Für Jahre, die zwischen zwei Jahren mit Werten liegen, wird aufgrund dieser Werte interpoliert.

Tabelle 21 Emissionsfaktoren für Personenwagen in g / Fzkm

Jahr	NOx	PM10 (1)	CO2 (2)	CH4	N2O
1990	1.179	0.053	236	0.084	0.009
1995	0.865	0.052	236	0.053	0.012
2000	0.664	0.052	236	0.033	0.011
2005	0.481	0.052	210	0.02	0.005
2010	0.345	0.049	189	0.013	0.003
2015	0.274	0.045	167	0.008	0.003
2020	0.197	0.042	153	0.006	0.003
2025	0.154	0.040	141	0.005	0.004
2030	0.132	0.040	132	0.005	0.005
2035	0.124	0.039	122	0.005	0.006

(1) PM10: Abgas + Nicht-Abgas

(2) CO2: *reported* Werte, d.h. ohne Biotreibstoffe

Quelle: BAFU (2010, 88-91)

Der Emissionsfaktor von Zink für Personenwagen wird als konstant angenommen und beträgt 0.0014 g / Fzkm (VSS, 2009).

6.8.2 Emissionen aus dem Betrieb von Gebäuden

Für die Ermittlung der Emissionen aus dem Betrieb von Gebäuden (d.h. aus dem betrieblichen Energieverbrauch) wurden aggregierte Daten der Fachstelle nachhaltiges Bauen (2010) verwendet. Diese sind für Wohngebäude, Bürogebäude und Schulgebäude verfügbar. Für Wohnnutzungen werden die Werte für Wohngebäude verwendet, für Nicht-Wohnnutzungen der Durchschnittswert der Werte für Büro- und Schulgebäude. Die Werte sind für die Jahre 2005 bis 2050 verfügbar. Für den Zeitraum nach 2050 werden die Werte für das Jahr 2050 verwendet. Für Jahre, die zwischen zwei Jahren mit Werten liegen, wird aufgrund dieser Werte interpoliert. Die Werte sind in Tabelle 22 dargestellt.

Tabelle 22 Emissionsfaktoren Gebäudebetrieb in kg CO₂-äqu. / (m² GF x a)

Jahr	Wohnen	Büro	Schule	Nicht-Wohnen
2005	39.9	24.3	28.6	26.45
2010	37.3	21.9	26.1	24.00
2015	34.7	19.7	23.8	21.75
2020	32.1	17.9	21.9	19.90
2025	29.8	16.3	20.5	18.40
2030	27.5	14.7	19.2	16.95
2035	25.3	13.5	18.0	15.75
2040	23.2	12.8	16.9	14.85
2045	21.1	12.2	15.6	13.90
2050	19.4	11.6	14.5	13.05

Nicht-Wohnen: Durchschnittswert von Büro und Schule

Quelle: Fachstelle nachhaltiges Bauen (2010, 112), PEF Elektrizität nach EWZ-Szenario 1

Die Berechnung von Emissionen gegliedert nur nach den Nutzungen Wohnen und Nicht-Wohnen pro m² Geschossfläche ist sehr grob. Es wäre wünschenswert, aus Daten zum Gebäudebestand und dessen Energieverbrauch Faktoren für Einflussgrössen wie Hüllzahl, Gebäudetyp (z.B. Kategorien nach GF, angebaut/alleinstehend), Baujahr, differenzierte Nutzung o.ä. zu ermitteln, was aber im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich war.

6.8.3 Graue Emissionen von Gebäuden

Zur Berechnung der grauen Emissionen von Gebäuden (siehe Kapitel 6.4), d.h. der Emissionen aus der grauen Energie von Gebäuden, werden Emissionsfaktoren für verschiedene Bestandteile eines Gebäudes benötigt.

Der SIA (2010) hat Daten zur grauen Energie und zu den grauen Emissionen verschiedener Bestandteile von Gebäuden veröffentlicht. Es wurde die durchschnittliche Lebensdauer von Bauteilen verwendet, um diese Werte pro Jahr zu ermitteln. Zudem stehen pro Gebäudebestandteil Werte für verschiedene Konstruktionsarten zur Verfügung. Da keine Daten über den durchschnittlichen Anteil verschiedener Konstruktionsarten für den gesamten Gebäudepark verfügbar sind, wurde jeweils pro Gebäudebestandteil der Mittelwert der Emissionsfaktoren

für die verschiedenen Konstruktionsvarianten berechnet und im Anschluss verwendet. Die entsprechenden Werte sind in Tabelle 23 dargestellt.

Tabelle 23 Emissionsfaktoren graue Emissionen von Gebäuden
in kg CO₂-äqu. / (m² x a) beziehungsweise kg CO₂-äqu. / (m³ x a) (Aushub)

Gebäudebestandteil / Konstruktion	Bezugsgrösse	Emissionsfaktor
Aushub	m ³ Aushubvolumen fest	
ohne Grundwasser		0.15
mit Grundwasser		0.45
Durchschnitt		0.3
Fundament	m ² Bauteilfläche	
ungedämmt		1.70
gedämmt		2.00
Durchschnitt		1.85
Aussenwand unter Terrain	m ² Bauteilfläche	
ungedämmt		1.70
gedämmt		2.40
Durchschnitt		2.05
Aussenwand über Terrain	m ² Bauteilfläche	
Holzrahmenkonstruktion		0.80
Holzblockwand		0.50
Dämmbeton, Einsteinmauerwerk		3.20
Glasfassade		3.00
Kompaktfassade		1.90
Zweischalenwand		2.60
Hinterlüftete Fassade (Alu, Stein, Glas VSG)		2.90
Hinterlüftete Fassade (Profilbauglas, Beton)		2.50
Durchschnitt		2.18
Innenwände, Innenstützen, -bekleidung	m ² Geschossfläche	
Pauschalwert		1.30

Decke, Bodenbelag, Deckenbekleidung	m ² Bauteilfläche	
Betondecke ungedämmt		2.50
Betondecke gedämmt		2.50
Holzdecke		2.00
Durchschnitt		2.33
Balkon	m ² Bauteilfläche	
Pauschalwert		3.00
Dachkonstruktion	m ² Bauteilfläche	
Flachdach (Beton)		4.50
Flachdach (Holzbalken)		2.50
Geneigtes Dach (Holzbalken)		0.90
Durchschnitt		2.62
Elektroanlage	m ² Energiebezugsfläche	
Pauschalwert		0.50
Wärmeanlage (Heizungsanlage)	m ² Energiebezugsfläche	
Pauschalwert		0.30
Lufttechnische Anlage (mech. Lüftung)	m ² Energiebezugsfläche	
Pauschalwert		0.40
Wasseranlage (Sanitäranlage)	m ² Energiebezugsfläche	
Pauschalwert		0.40
Haustechnik Gesamt	m ² Energiebezugsfläche	
Pauschalwert		1.60
Einbauten zu Aussenwand und Dach (Fenster, Türen, Ausstiege)	m ² Bauteilfläche	
Pauschalwert		3.20

Quelle: SIA (2010, 24-25)

Neben diesen Emissionsfaktoren werden für die Berechnung, wie sie in Kapitel 6.4.2 vorgestellt wird, auch Annahmen zu zwei Verhältnisfaktoren und einem Anteilsfaktor benötigt:

- Energiebezugsfläche / Geschossfläche
- Balkonfläche / Geschossfläche mit Wohnnutzung
- Anteil opaker Aussenwand und Anteil Einbauten (Fenster, Türen) an gesamter Aussenwand über Terrain

Um diese Faktoren zu ermitteln, wurden einige in SIA (2010) und SIA (2011c) dokumentierte Gebäude analysiert und entsprechende Mittelwerte gebildet. Diese Analyse ist in Tabelle 24 dargestellt.

Tabelle 24 Auswertung dokumentierter Beispielgebäude zur Ermittlung von Faktoren zur Berechnung der grauen Emissionen des Gebäudeparks

Quelle	Nutzung	GF	EBF	EBF / GF	WüT	Fenster	Fenster / WüT	Balkon	Balkon / GF
(1) S. 25	Wohnen	9860	8583	0.87	3220	1100	0.34	1326	0.13
(2) S. 34	Wohnen	8455	6657	0.79	744	354	0.48	390	0.05
(2) S. 36	Wohnen	1846	1537	0.83	3070	1767	0.58	234	0.13
(2) S. 38	Wohnen	10032	8760	0.87	545	191	0.35	1380	0.14
(2) S. 40	Wohnen	789	657	0.83	4150	1840	0.44	54	0.07
(2) S. 42	Wo. HH	9000	8434	0.94	1743	1040	0.60		
(2) S. 44	Büro	9692	7492	0.77	2190	1440	0.66		
(2) S. 46	Schule	8380	8119	0.97	2270	1030	0.45		
(2) S. 48	Schule	8380	8119	0.97	3220	1100	0.34		
Durchschnittswerte			0.87				0.49		0.11

alle Flächen in m²

GF: Geschossfläche

EBF: Energiebezugsfläche

WüT: Aussenwand über Terrain

Wo. HH: Wohnen Hochhaus

Quellen: (1) SIA (2010)
(2) SIA (2011c)

Für die EBF wird der gerundete Wert von 90 % der GF, für die Fläche des Balkons der ebenfalls gerundete Wert von 10 % der GF mit Wohnnutzung verwendet. Der Anteil der opaken Flächen an der gesamten Aussenwand über Terrain wird mit 60 % leicht höher als in den ausgewerteten Beispielen angenommen (51 %). Dies, da die ausgewerteten Beispiele mehrheitlich Neubauten sind und der Fensteranteil bei älteren Gebäuden, die es bei der Betrachtung des gesamten Gebäudeparks stark zu beachten gilt, leicht tiefer liegen dürfte.

6.8.4 Graue Emissionen der Strasseninfrastruktur

Spielmann, Bauer, Dones und Tuchs Schmid (2007) haben den Energieverbrauch sowie die benötigten Prozesse für den Strassenbau und –unterhalt pro Meter Strasse und Jahr berechnet. Dabei haben sie die unterschiedliche Lebensdauer der verschiedenen Strassenschichten berücksichtigt und Werte für die Schweizer Durchschnittsstrasse berechnet (siehe Tabelle 25).

Tabelle 25 Energie und Bauprozesse für Bau und Unterhalt einer durchschnittlichen Schweizer Strasse pro Meter und Jahr

Energie oder Prozesse	Einheit	Wert
Elektrizität, Mittelspannung	MJ / (m x a)	5.47
Diesel, verbrannt in Baumaschine	MJ / (m x a)	36.27
Transport: LKW 28t	tkm / (m x a)	3.51

Quelle: Spielmann et al. (2007), Tabelle 5-94

Mit Emissionsfaktoren für die verschiedenen verwendeten Energieformen (siehe Tabelle 26) und mit den verwendeten Daten zur Strassenbreite (siehe Tabelle 27) lassen sich die CO₂-äquivalenten Emissionen pro m² Strasse und Jahr berechnen. Die Ergebnisse dieser Berechnung sind in Tabelle 28 dargestellt.

Tabelle 26 Emissionsfaktoren für Energie und Bauprozesse für Bau und Unterhalt einer durchschnittlichen Schweizer Strasse

Energie oder Prozess	Emissionsfaktor	Einheit	Quelle
Elektrizität, Mittelspannung	43.0	g / MJ	BAFU (2008)
Diesel, verbrannt in Baumaschine	73.6	g / MJ	BAFU (2011)
Transport: LKW 28t	92.5	g / tkm	Tuchs Schmid (2010) (1)

(1) Sattelschlepper 16 - 32t, EURO 5;
Annahme basierend auf Spielmann et al. (2007), Tabelle 5-123: 1 vkm = 9.52 tkm

Tabelle 27 Bestimmung der durchschnittlichen Strassenbreite zur Umrechnung der Ergebnisse von Spielmann et al. (2007)

	Länge	Breite	Gewicht (1)
Autobahnen	1638	23.0	0.02
Strassen 1. Klasse	9000	7.0	0.13
Strassen 2. Klasse	33400	5.7	0.47
Strassen 3. Klasse	27100	4.4	0.38
Gewichtete Durchschnittsbreite		5.77	

(1) Anteil an der durchschnittlichen Schweizer Strasse (gewichtet nach Längenanteil)

Quelle: (Spielmann et al., 2007), Tabelle 5-90

Tabelle 28 Graue Emissionen aus Energie und Bauprozessen für Bau und Unterhalt einer durchschnittlichen Schweizer Strasse pro m² und Jahr

Energie oder Prozesse	Einheit	Wert
Elektrizität, Mittelspannung	g / (m ² x a)	40.8
Diesel, verbrannt in Baumaschine	g / (m ² x a)	462.8
Transport: LKW 28t	g / (m ² x a)	56.3
Gesamte graue Emissionen Strassen	g / (m² x a)	559.9

7 Umsetzung des Modells in Programmcode

7.1 Software zur Beurteilung der Nachhaltigkeit von Entwicklungen

7.1.1 Implementierung

Das Modell zur Beurteilung der Nachhaltigkeit wurde als Programmcode umgesetzt, wobei verschiedene Versionen eines Beurteilungstools entstanden. Der Code wurde in der Programmiersprache Python verfasst (verwendet wurde Version 2.7.3, Informationen: Python Software Foundation (2012)). Die erstellten Scripts greifen auf Funktionen der GIS-Software GRASS GIS zu (GRASS Development Team, 2012). Sämtliche entwickelten Tools können durch den Einsatz des GRASS-Moduls `g.parser` innerhalb von GRASS GIS mit einer graphischen Benutzeroberfläche zur Eingabe der notwendigen Parameter verwendet werden. Alternativ können sämtliche Parameter beim Aufrufen des Scripts über eine Konsole direkt übergeben werden.

Sämtliche entwickelten Scripts sind im Anhang aufgelistet und auf der dort beigelegten CD enthalten.

7.1.2 Tools zur Beurteilung der Nachhaltigkeit

Es wurden drei verschiedene Versionen eines Tools zur Beurteilung der Nachhaltigkeit von Entwicklungen erstellt. Sie unterscheiden sich in Anwendungsmöglichkeit und Funktionalität, basieren aber alle auf dem in Kapitel 6 vorgestellten Modell.

Im Folgenden werden zuerst die allen Versionen gemeinsamen Funktionalitäten und benötigten Eingangsgrößen vorgestellt. Danach wird auf die Unterschiede zwischen den Versionen eingegangen.

Alle drei Versionen nutzen gemeinsam zusätzliche Funktionen und Variablen aus fünf Scripts (`s_functions.py`, `s_global_variables.py`, `s_measures.py`, `s_selection.py`, `s_sql_commands.py`). Diese Scripts sind selbst nicht ausführbar. Sie dienen lediglich einer übersichtlicheren Gestaltung des Codes und der Möglichkeit, Veränderungen an gemeinsam genutzten Funktionen nur an einem zentralen Ort ausführen zu müssen.

Die Scripts sind ausführlich kommentiert. Hier wird deshalb nur in knapper Form erläutert, welche Möglichkeiten die verschiedenen Versionen bieten und inwiefern sie sich voneinander unterscheiden.

Ziel dieses Kapitels ist es, die Umsetzung des Modells in Code zu erläutern. Die Tools und insbesondere deren Bedienung werden in einer separat erstellten Dokumentation ausführlicher erläutert.

Gemeinsame Eingangsdaten aller drei Versionen

Gebaute Umwelt

Für folgende Aspekte der gebauten Umwelt werden Daten benötigt:

- Parzellen (Karte)
- Alte Gebäude (Karte)
- Neue Gebäude (Karte)
- Haushalte und Arbeitsplätze
 - Karten oder
 - CSV-Datensätze oder
 - Schätzwerte (m^2 GF pro Einwohner, m^2 GF pro Arbeitsplatz)
- Entropie-Untersuchungsgebiete (Karte, mind. 1 Gebiet) und Name der Spalte mit einer eindeutigen ID
- ÖV-Haltestellen (Karte)

Strassennetz

Für das Strassennetz (Achsen, daraus werden Längen berechnet) sind verschiedene Quellen möglich:

- Berechnung durch das Tool aus den Strassen-Parzellen (Ausdünnung)
- Externe Karte mit Strassennetz
- Verwendung der durchschnittlichen Schweizer Strassenbreite und der Fläche der Strassenparzellen zur Ermittlung der Länge des Strassennetzes (sehr schnell und sehr ungenau)

Betrachtungszeitraum

Folgende Angaben zu Betrachtungszeitraum und Diskontierung werden benötigt:

- Betrachtungszeitraum
- Basisjahr (auf dieses Jahr werden die Kosten und Nutzen diskontiert)
- Diskontsatz

Gemeinsame Optionen aller drei Versionen

Vernachlässigung neuer Gebäude mit Baujahr nach dem Basisjahr

Es besteht die Möglichkeit, „neue“ Gebäude (in der Karte „Neue Gebäude“ enthalten), welche nach dem für die Diskontierung gewählten Basisjahr erstellt wurden, zu vernachlässigen. Diese Option ist nützlich für den Fall, dass Zeitreihen zu Einwohner- und Arbeitsplatzentwicklung (resp. Daten für Haushalte und Arbeitsplätze) vorhanden sind, die entsprechenden Daten zu Gebäuden aber fehlen.

Verwendung des Bruttoinlandprodukts für die Beurteilung

Das Bruttoinlandprodukt wird bei der Beurteilung nur berücksichtigt, wenn dies explizit gewünscht wird. Dies, da diese Grösse ein Beurteilungsergebnis stark dominieren kann und ihr Einbezug auch nicht in jedem Fall sinnvoll ist (siehe Kapitel 8.4.3). Werden z.B. relativ kleine räumliche Einheiten miteinander verglichen, sind Aussagen zur Produktivität und damit zum Bruttoinlandprodukt eher irreführend. Für eine Beurteilung z.B. des ganzen Kantons Zürich für verschiedene mögliche Zustände macht ein Einbezug des Bruttoinlandproduktes hingegen Sinn.

Version Multiple

Script: s_assessment_multiple.py

Zweck und Beschreibung

Vergleich der Nachhaltigkeit verschiedener, sich nicht überlappender Beurteilungsgebiete im Vergleich zu einem Referenzgebiet aufgrund eines einzigen Zustandes. In einem Programmdurchlauf werden der Referenzzustand sowie sämtliche Beurteilungszustände berechnet und letztere bewertet sowie in eine Rangfolge eingegliedert.

Beispiel 1: Vergleich aller Gemeinden des Kantons Zürich in einem bestimmten Jahr aufgrund derselben Grundlagendaten zur gebauten Umwelt für den ganzen Kanton. Referenzgebiet könnte dabei z.B. der ganze Kanton oder eine bestimmte Gemeinde sein.

Beispiel 2: Vergleich der Nachhaltigkeit der einzelnen Quartiere einer Stadt mit dem ganzen Stadtgebiet als Referenzgebiets.

Eingangsdaten zu Referenz- und Beurteilungszustand

Es müssen folgende Karten zu Referenz- und Beurteilungsgebiet vorliegen:

- Referenzgebiet (1 Gebiet)
- Beurteilungsgebiete (mindestens 1 Gebiet) und Name für ID-Spalte

Damit sinnvolle Ergebnisse vorliegen, müssen für alle diese Gebiete Daten zur gebauten Umwelt vorliegen (siehe „Gemeinsame Eingangsdaten aller drei Versionen“).

Ergebnisausgabe

Folgende Dateien werden als Ergebnis generiert:

- Karte mit Beurteilungsgebieten, in zugehöriger Tabelle Spalten zu Rang und Summe der diskontierten Kosten
- CSV-Datei mit Daten zum Referenzgebiet (informativ)
- CSV-Datei mit Daten zu den Beurteilungsgebieten (eigentliches Ergebnis der Beurteilung)

Die CSV-Ausgabedateien enthalten die Werte für die Messgrößen für die gebaute Umwelt, die Werte für die Eingangsgrößen für die Berechnung der Indikatoren, die einzelnen diskontierten Kosten- und Nutzenbestandteile sowie deren Summe. Die Datei mit Daten zu den Beurteilungsgebieten enthält zudem für jedes Gebiet den Rang innerhalb aller Beurteilungsgebiete.

Version Single

Script: s_assessment_single.py

Zweck

Vergleich der Nachhaltigkeit verschiedener Beurteilungszustände im Vergleich zu einem Referenzzustand. Für jeden Zustand wird das Programm einzeln ausgeführt. Als erstes muss ein Referenzzustand berechnet werden, wobei später für die Beurteilung von Beurteilungszustän-

den benötigte Daten in einer Datei gespeichert werden. Danach können beliebig viele Beurteilungszustände mit Hilfe dieser Datei einzeln berechnet werden. Es wird keine Rangfolge erstellt.

Beispiel 1: Beurteilung der Entwicklung der Nachhaltigkeit des Kantons Zürich mit Zeitreihendaten für die Jahre 2000 bis 2010 aufgrund des Referenzzustands im Jahr 2000.

Beispiel 2: Vergleich der Nachhaltigkeit verschiedener Gemeinden für dasselbe Jahr, wenn keine gemeinsamen Daten zur gebauten Umwelt vorliegen und die Daten auch nicht kombiniert werden können (so dass nicht die Version *Multiple* verwendet werden kann).

Eingangsdaten zu Referenz- und Beurteilungszustand

Es müssen folgende Angaben und Karten zu Referenz- und Beurteilungszustand vorliegen:

- Nutzung des Tools: für Referenz- oder Beurteilungszustand
- Untersuchungsgebiet (1 Gebiet)
- Bei Nutzung für einen Beurteilungszustand: Datei mit Daten zum zu verwendenden Referenzzustand aus einem vorhergehenden Programmdurchlauf

Damit sinnvolle Ergebnisse vorliegen, müssen für das Untersuchungsgebiet Daten zur gebauten Umwelt vorliegen (siehe „Gemeinsame Eingangsdaten aller drei Versionen“). Für alle zu vergleichenden Beurteilungszustände muss dieselbe Datei mit Daten zum zu verwendenden Untersuchungszustand verwendet werden.

Ergebnisausgabe

Folgende Dateien werden als Ergebnis generiert:

- Bei Nutzung für den Referenzzustand: CSV-Datei mit Daten zum Referenzzustand (informativ)
- Bei Nutzung für einen Beurteilungszustand: CSV-Datei mit Daten zum Beurteilungszustand (eigentliches Ergebnis der Beurteilung)

Die CSV-Ausgabedateien enthalten die Werte für die Messgrößen für die gebaute Umwelt, die Werte für die Eingangsgrößen für die Berechnung der Indikatoren, die einzelnen diskontierten Kosten- und Nutzenbestandteile sowie deren Summe. Bei Nutzung des Tools für einen Beurteilungszustand können die Ergebnisse auch einer bereits existierenden CSV-Datei angehängt werden (was die spätere Auswertung erleichtert).

Version Single Reduced

Script: `s_assessment_single_reduced.py`

Reduzierte Version *Single*. Die Daten zur gebauten Umwelt werden nicht auf das Untersuchungsgebiet reduziert, was zu einer schnelleren Ausführung mit weniger Rechenschritten führt. Allerdings müssen die Daten zur gebauten Umwelt in der räumlichen Ausdehnung genau mit dem Untersuchungsgebiet übereinstimmen. Im Übrigen ist diese Version mit der Version *Single* identisch.

7.1.3 Erläuterungen zu den Beurteilungstools

Die Beurteilungstools wenden das in Kapitel 6 erläuterte Modell an. Für gewisse Berechnungsschritte sind aber zusätzliche Erläuterungen zum Vorgehen angebracht.

Entwickelte Parzellen

Bei der Umsetzung des Modells in Programmcode musste definiert werden, welche Parzellen als entwickelt gelten. Ziel war es, sämtliche versiegelten Flächen innerhalb von Siedlungsgebieten zu berücksichtigen, sofern diese Flächen nicht übergeordneten Nutzungen dienen (wie z.B. Autobahnen, Flugplätze, Rangierbahnhöfe, Bahnlinien o.ä.). Diese Einschränkung soll die Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Gebieten garantieren, auch wenn eines der Gebiete z.B. eine nationale Infrastruktur oder sehr viele Überlandstrassen (ausserhalb des Siedlungsgebiets) enthält.

Es wurden Werte für das Attribut „`plan_type_id`“ der Parzellendaten aus *SustainCity* definiert, welche entsprechend der dargelegten Definition als entwickelt gelten.

Folgende *Plan Type IDs* gelten als entwickelt:

1001 – 1206:	Wohnnutzung
2001 – 2114:	Wohn- und Gewerbenutzung
3001 – 3108:	Zentrum
4001:	Öffentliche Nutzung
5001 – 5019:	Industrie und Gewerbe
6001 – 6014:	Industrie
8001:	Lokale Wege
8004:	Verkehr
8006:	Verkehr (nicht zониert)

Zudem gelten alle Parzellen mit einer *Plan Type ID* von 7302 (Landwirtschaft im Siedlungsgebiet), die zusätzlich über das Attribut „is_street“ als Strasse ausgezeichnet sind, ebenfalls als entwickelt.

Als nicht entwickelt gelten folglich Parzellen mit folgenden *Plan Type IDs*:

7001 – 7501:	Offene Flächen (ausser wie erwähnt 7302, wenn is_street = 1)
8002:	Bahn
8003:	Flughafen
8005:	Autobahn
8101 – 8102:	Flughafen
9001 – 9101:	Undefiniert

Diese Definitionen führen zu einem etwas zu hohen Wert für versiegelte Flächen, da nicht alle einer als entwickelt definierten Flächennutzung zugeteilten Parzellen wirklich entwickelt sind und da auch entwickelte Parzellen häufig nicht zu 100% versiegelt sind. Mit den verfügbaren Daten war eine genauere Einteilung allerdings nicht möglich. Zudem werden alle zu untersuchenden Gebiete mit derselben Methode behandelt, so dass trotz der erwähnten Ungenauigkeiten sinnvolle Daten zur entwickelten Fläche für den Vergleich verschiedener Gebiete oder Zustände generiert werden sollten.

Das Weglassen von Flächen mit übergeordneter Nutzung macht für kleinräumige Untersuchungsgebiete Sinn. Werden aber verschiedene Zustände des ganzen Kantons Zürich verglichen, wäre ein Einbezug z.B. von Überlandstrassen angebracht. In einer Weiterentwicklung der Beurteilungstools könnte eine entsprechende Auswahlmöglichkeit eingebaut werden. Zudem könnten bei Flächennutzungen, die üblicherweise mit Gebäuden zusammenhängen (*Plan Type IDs* 1 bis 6), nur jene Parzellen als entwickelt definiert werden, auf denen auch ein Gebäude steht.

Strassenparzellen

Für das Strassennetz wurden ähnliche Anforderungen wie für die entwickelten Parzellen formuliert. Es sollen nur Strassen innerhalb des Siedlungsgebiets berücksichtigt werden, um Vergleiche z.B. zwischen einer landwirtschaftlich geprägten und einer städtischen Gemeinde zu ermöglichen.

Die Parzellendaten aus *SustainCity* enthalten ein Dummy-Attribut Strasse („is_street“). Allerdings sind gemäss diesem Attribut auch Flächen wie z.B. die Bahninfrastruktur als Strassen markiert. Deshalb wurden zusätzliche Anforderungen definiert, damit eine Parzelle als Strasse

gilt. Als Strassenparzellen gelten sämtliche Parzellen, die über das Attribut „is_street“ als Strasse ausgezeichnet sind und eine der folgenden *Plan Type IDs* aufweisen:

1001 – 1206:	Wohnnutzung
2001 – 2114:	Wohn- und Gewerbenutzung
3001 – 3108:	Zentrum
4001:	Öffentliche Nutzung
5001 – 5019:	Industrie und Gewerbe
6001 – 6014:	Industrie
7302:	Landwirtschaft im Siedlungsgebiet
8001:	Lokale Wege
8004:	Verkehr
8006:	Verkehr (nicht zониert)

Die Strassenparzellen werden einerseits direkt zur Berechnung der Strassenfläche verwendet, andererseits dienen sie als Grundlage für die Erstellung eines Strassennetzes mit Strassenachsen, das der Berechnung der Länge des Strassennetzes bei der Ermittlung der Strassendichte dient. Das Strassennetz wird erstellt durch eine Umwandlung der Karte mit den Strassenparzellen in eine Rasterkarte, eine Ausdünnung und eine Rückumwandlung in eine Vektorkarte.

Flächennutzungstypen für die Berechnung des Entropie-Indexes

Der Entropie-Index soll die Durchmischung der Flächennutzungen anhand von Parzellen messen. Dabei ist es notwendig, die zu berücksichtigenden Flächennutzungstypen zu definieren. Parzellen mit folgenden *Plan Type IDs* werden bei der Berechnung der Entropie eines Gebiets berücksichtigt:

1001 – 1206:	Wohnnutzung
2001 – 2114:	Wohn- und Gewerbenutzung
3001 – 3108:	Zentrum
4001:	Öffentliche Nutzung
5001 – 5019:	Industrie und Gewerbe
6001 – 6014:	Industrie
7001:	Erholungsgebiet (offene Flächen)

Bei der Abgrenzung stand das Ziel im Vordergrund, die Nutzungsmischung in Siedlungsgebieten adäquat zu erfassen. Aus diesem Grund werden auch Erholungsgebiete berücksichtigt. Landwirtschaftliche Gebiete und weitere Freiflächen wie Gewässer und Wälder werden zwar

durchaus auch z.B. für Erholung und Freizeit genutzt, ihre grosse Fläche und ihre häufige Lage ausserhalb der Siedlungsgebiete würden aber bei einer Berücksichtigung eher zu einer Verzerrung als zu einer Verbesserung der Berechnung führen.

7.2 Tools mit Einzelfunktionen

Zusätzlich zu den Beurteilungstools wurden kleine Zusatztools erarbeitet, um gewisse Bestandteile der Beurteilungstools auf einfach Art und Weise für sich alleine zugänglich zu machen. Dies, da der Code der Beurteilungstools relativ lange und zudem komplex verknüpft ist, eine Extraktion von Einzelteilen also nicht ohne gewisse Anpassungen möglich ist. Entsprechend wurden die Zusatztools eigenständig konzipiert, d.h. sie greifen nicht wie die Beurteilungstools auf weitere Scripts mit Funktionen und Variablen zu.

Teilweise können die Zusatztools auch für die Herstellung von Grundlagenkarten für die Beurteilungstools benutzt werden (Strassennetz, zusammengesetzte Karten zur gebauten Umwelt).

7.2.1 Betriebliche und graue Energie und Emissionen des Gebäudeparks und der Strasseninfrastruktur

Script: s_embodied_and_operational.py

Dieses Tool berechnet den jährlichen betrieblichen und grauen Energieverbrauch des Gebäudeparks, den jährlichen grauen Energieverbrauch der Strasseninfrastruktur sowie jeweils die zugehörigen CO₂-äquivalenten Emissionen.

In Kapitel 6 werden nur Faktoren für die grauen und betrieblichen Emissionen, nicht aber für den Energieverbrauch aufgeführt, da im Beurteilungsmodell nur Emissionen berücksichtigt werden. Die Quellen der Energiefaktoren sind allerdings mit denjenigen der Emissionsfaktoren identisch. Für alle Faktoren werden – sofern sie sich im Laufe der Zeit verändern – die Werte für das Jahr 2010 verwendet.

7.2.2 Berechnung des Entropie-Indexes

Script: s_entropy.py

Dieses Tool erlaubt die Berechnung des Entropie-Indexes nach Cervero und Kockelman (1997) aufgrund einer Parzellenkarte. Zudem wird eine Karte mit den Entropie-Untersuchungsgebieten (mind. 1 Gebiet) benötigt.

7.2.3 Erstellung eines Strassennetzes aus Parzellenkarten

Script: `s_street_network_creator_doubleclean.py`

Dieses Tool generiert ein Netz aus Strassenachsen aus einer Parzellenkarte. Die Umwandlung geschieht über die Extraktion der Strassenparzellen, die Umwandlung in eine Rasterkarte, die Ausdünnung und die Rückumwandlung in eine Vektorkarte. Da dieser Prozess bei grossen Flächen sehr rechenintensiv ist, verwendet das Tool Karten zu Verkehrszonen, um kleine Ausschnitte des Strassennetzes zu generieren und zusammensetzen.

Momentan sind die mit diesem Tool generierten Karten nur in der Version *Single Reduced* einsetzbar. Bei den übrigen Versionen besteht ein unbekanntes Problem (Fehler bei der Nutzung von `v.overlay`).

7.2.4 Patchen von Karten

Script: `s_map_patcher.py`

Dieses Script verwendet keine Funktionen der Beurteilungstools, sondern erlaubt auf einfache Art und Weise das Zusammenfügen von Karten zur gebauten Umwelt aus dem Projekt *SustainCity*, so dass grössere Gebiete beurteilt werden können oder die Version *Multiple* für grössere Gebiete angewendet werden kann.

8 Anwendung der Software

Zwar liegt der Schwerpunkt dieser Arbeit nicht in der Erstellung von Beurteilungen und deren Interpretation, sondern in den theoretischen Grundlagen und der Umsetzung des darauf aufbauenden Modells in Programmcode. Trotzdem wurde die Software beispielhaft für verschiedene Situationen angewandt. Die verwendeten Daten, die verschiedenen Anwendungen, deren Ergebnisse sowie daraus abgeleitete Interpretationen und Erkenntnisse werden in diesem Kapitel vorgestellt.

8.1 Verwendete Daten

Zur Anwendung des Modells zur Beurteilung der Nachhaltigkeit wurden Daten des Projekts *SustainCity* für den Kanton Zürich verwendet. Dabei wurden einerseits die Daten verwendet, welche für das Basisjahr der Simulation vorliegen, andererseits wurden auch Simulationsergebnisse für die Jahre 2000 bis 2010 verwendet.

Zur Berechnung der Distanz zu einer Haltestelle des ÖV wurden zusätzliche Daten verwendet, die nicht Teil der Daten von *SustainCity* sind. Es handelt sich um den Datensatz „Haltestellen des öffentlichen Verkehrs“ des GIS-Zentrums des Kantons Zürich, Aktualisierung 2010 (Information: http://www.gis.zh.ch/dokus/geolion/gds_140.pdf).

8.1.1 Basisjahr *SustainCity* Kanton Zürich

Die Daten zum Basisjahr wurden als GRASS-GIS-Karten verwendet. Neben der eigentlichen Geometrie sind zahlreiche Informationen in den jeweiligen Datenbanktabellen der Karten enthalten. Nicht alle dieser Informationen wurden bei der Anwendung des Modells verwendet. In diesem Kapitel werden nur die effektiv verwendeten Informationen erwähnt.

Für folgende Aspekte der gebauten Umwelt und der Raumstruktur wurden die folgenden Datenbankinformationen sowie die jeweilige Geometrie der Objekte verwendet:

- Gemeinden
 - Gemeinde-ID (eindeutig)
- Verkehrszonen
 - Zonen-ID (eindeutig)

- Parzellen
 - Parzellen-ID (eindeutig)
 - Fläche (war bereits aus Geometrie in Datenbank eingefügt)
 - Flächennutzungstyp
 - Strasse (dummy)
 - Distanz zum Zürcher Stadtzentrum
 - Distanz zum Winterthurer Stadtzentrum
- Gebäude
 - Gebäude-ID (eindeutig)
 - Fussabdruck (war bereits aus Geometrie in Datenbank eingefügt)
 - Anzahl Geschosse
 - Baujahr
 - Geschossfläche mit Wohnnutzung
 - Geschossfläche mit Nicht-Wohnnutzung
- Haushalte
 - Haushalts-ID (eindeutig)
 - Gebäude-ID (Zuordnung zu einem Gebäude)
 - Anzahl Personen
 - Anzahl Erwerbstätige
- Arbeitsplätze
 - Arbeitsplatz-ID (eindeutig)
 - Gebäude-ID (Zuordnung zu einem Gebäude)

Die Gebäude sind in den Daten für das Basisjahr in „neu“ (Baujahr ab 2000) und „alt“ unterteilt. Die benötigten Informationen sind aber für beide Typen verfügbar.

8.1.2 Simulationsergebnisse *SustainCity* Kanton Zürich

Zum Zeitpunkt der Niederschrift waren nur Daten zu Haushalten und Arbeitsplätzen für die Jahre 2000 bis 2010 als Simulationsergebnisse verfügbar. Diese Daten lagen als CSV-Dateien vor, d.h., sämtliche oben erwähnten Informationen zu den Haushalten und Arbeitsplätzen waren verfügbar, allerdings gab es keine geometrischen Objekte. Eine Verortung war aber durch die Zuordnung zu Gebäuden möglich.

8.2 Durchgeführte Beurteilungen

Sämtliche für die Durchführung der Nachhaltigkeitsbeurteilungen benötigten Daten, die generierten Primärdaten sowie durchgeführte Analysen und erstellte Abbildungen sind auf der im Anhang beigelegten und beschriebenen CD enthalten.

8.2.1 Anwendung auf das Basisjahr von *SustainCity*

Mit den Daten zum Basisjahr von *SustainCity* wurden folgende Beurteilungen vorgenommen, wobei die Version *Multiple* des Beurteilungstools verwendet wurde:

- Beurteilung und Vergleich der Nachhaltigkeit der Verkehrszonen der Stadt Winterthur:
 - Referenzgebiet: Gemeindegebiet der Gemeinde Winterthur
 - Beurteilungsgebiete: Zonen des kantonalen Verkehrsmodells in der Stadt Winterthur
 - Basisjahr: 2010
 - Betrachtungszeitraum: 50 Jahre
 - Diskontsatz: 2%
 - Das BIP wurde bei der Beurteilung nicht berücksichtigt
 - Es wurden keine neuen Gebäude vernachlässigt
- Dieselbe Beurteilung, aber mit Berücksichtigung des BIP
- Beurteilung und Vergleich der Nachhaltigkeit der Verkehrszonen der Gemeinden Schlieren und Dietikon:
 - Referenzgebiet: Gemeindegebiet der Gemeinden Schlieren und Dietikon
 - Beurteilungsgebiete: Zonen des kantonalen Verkehrsmodells in den Gemeinden Schlieren und Dietikon
 - Basisjahr: 2010
 - Betrachtungszeitraum: 50 Jahre
 - Diskontsatz: 2%
 - Das BIP wurde bei der Beurteilung nicht berücksichtigt
 - Es wurden keine neuen Gebäude vernachlässigt
- Dieselbe Beurteilung, aber jeweils
 - mit einem Diskontsatz von 3%
 - mit einem Betrachtungszeitraum von 20 Jahren
 - mit einem Betrachtungszeitraum von 100 Jahren
 - mit Berücksichtigung des BIP bei der Beurteilung

Die Beurteilungen mit Berücksichtigung des BIP, mit abweichendem Diskontsatz oder Betrachtungszeitraum dienen der Untersuchung der Auswirkung abweichender Parameter.

8.2.2 Anwendung auf Simulationsergebnisse von *SustainCity*

Mit den Daten aus einer Simulation für die Jahre 2000 bis 2010 von *SustainCity* wurden folgende Beurteilungen vorgenommen:

- Beurteilung und Vergleich der Verkehrszonen der Gemeinden Schlieren und Dietikon für jedes Jahr im Zeitraum 2000 – 2010
 - Tool: *Multiple*, für jedes Beurteilungsjahr einzeln ausgeführt
 - Referenzzustand: Jeweiliger Zustand des Gemeindegebiets der Gemeinden Schlieren und Dietikon im Beurteilungsjahr
 - Beurteilungszustand: Jeweiliger Zustand der Zonen des kantonalen Verkehrsmodells in den Gemeinden Schlieren und Dietikon im Beurteilungsjahr
 - Basisjahr: Jeweiliges Beurteilungsjahr
 - Betrachtungszeitraum: 50 Jahre
 - Diskontsatz: 2%
 - Das BIP wurde bei der Beurteilung nicht berücksichtigt
 - Neue Gebäude mit Baujahr nach dem jeweiligen Beurteilungsjahr wurden bei der Beurteilung nicht berücksichtigt
- Beurteilung und Vergleich des Gemeindegebiets der Gemeinden Schlieren und Dietikon für jedes Jahr im Zeitraum 2000 – 2010
 - Tool: *Single reduced*, für jedes Beurteilungsjahr einzeln ausgeführt
 - Referenzzustand: Zustand des Gemeindegebiets der Gemeinden Schlieren und Dietikon im Jahr 2000
 - Beurteilungszustand: Jeweiliger Zustand des Gemeindegebiets der Gemeinden Schlieren und Dietikon im Beurteilungsjahr
 - Basisjahr: Jeweiliges Beurteilungsjahr
 - Betrachtungszeitraum: 50 Jahre
 - Diskontsatz: 2%
 - Das BIP wurde bei der Beurteilung nicht berücksichtigt
 - Neue Gebäude mit Baujahr nach dem jeweiligen Beurteilungsjahr wurden bei der Beurteilung nicht berücksichtigt

8.3 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden einige der generierten Ergebnisse und daraus abgeleitete Analysen vorgestellt. Das Ziel ist es, die Einsatzmöglichkeiten der Beurteilungstools zu veranschaulichen und beispielhafte Resultate zu präsentieren. In Kapitel 8.4 werden aus den Ergebnissen gewisse Schlussfolgerungen abgeleitet.

Bemerkung: bei der Anwendung der Beurteilungswerkzeuge wurde eine etwas andere, ältere Definition entwickelter Parzellen als die in Kapitel 7.1.3 aufgeführte verwendet. Dies sollte sich aber nur unwesentlich auf die Ergebnisse auswirken. Die Beurteilungswerkzeuge wurden an die neuere Definition angepasst, eine Wiederholung der Beurteilungen war aber aus zeitlichen Gründen nicht möglich.

8.3.1 Graphische Auswertung von Resultaten der Version *Multiple*

Zwei mit der Version *Multiple* erzeugte Resultate-Karten wurden mit QGIS (Quantum GIS Development Team, 2012) aufbereitet, so dass die Nachhaltigkeit der verschiedenen Verkehrszonen graphisch verglichen werden kann. Sowohl von Winterthur als auch von den Gemeinden Schlieren und Dietikon wurde je eine Karte in zwei Varianten ausgewertet: mit identischen Intervallen und mit Quantilen. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Abbildung 22 (Winterthur mit identischen Intervallen), Abbildung 23 (Winterthur mit Quantilen), Abbildung 24 (Schlieren und Dietikon mit identischen Intervallen) und Abbildung 25 (Schlieren und Dietikon mit Quantilen) dargestellt. Die verwendeten Parameter für die Nachhaltigkeitsbeurteilung sind in Kapitel 8.2.1 aufgeführt.

Die graphische Auswertung erlaubt es, auf einfache und schnelle Art und Weise die Nachhaltigkeit verschiedener Gebiete miteinander zu vergleichen und eine grobe Rangfolge abzuschätzen. Sind nur wenige Gebiete zu beurteilen, wie dies z.B. bei den Gemeinden Schlieren und Dietikon der Fall ist, kann auch die eigentliche Rangfolge graphisch dargestellt werden (siehe Abbildung 25, in der dieselbe Anzahl Quantile wie Anzahl Beurteilungsgebiete gewählt wurde).

Trotz der Möglichkeiten, welche eine graphische Auswertung für die Kommunikation der Ergebnisse einer Nachhaltigkeitsbeurteilung bietet, ist die Auswertung der generierten CSV-Daten dennoch unerlässlich. Diese enthalten die detaillierten Ergebnisse und erlauben auch gewisse Rückschlüsse auf die Ursachen eines bestimmten Beurteilungsergebnisses zu ziehen (siehe Kapitel 8.4).

Abbildung 22 Graphische Auswertung der Nachhaltigkeitsbeurteilung der Verkehrszonen in der Stadt Winterthur; Verwendung von 8 identischen Intervallen; ohne BIP

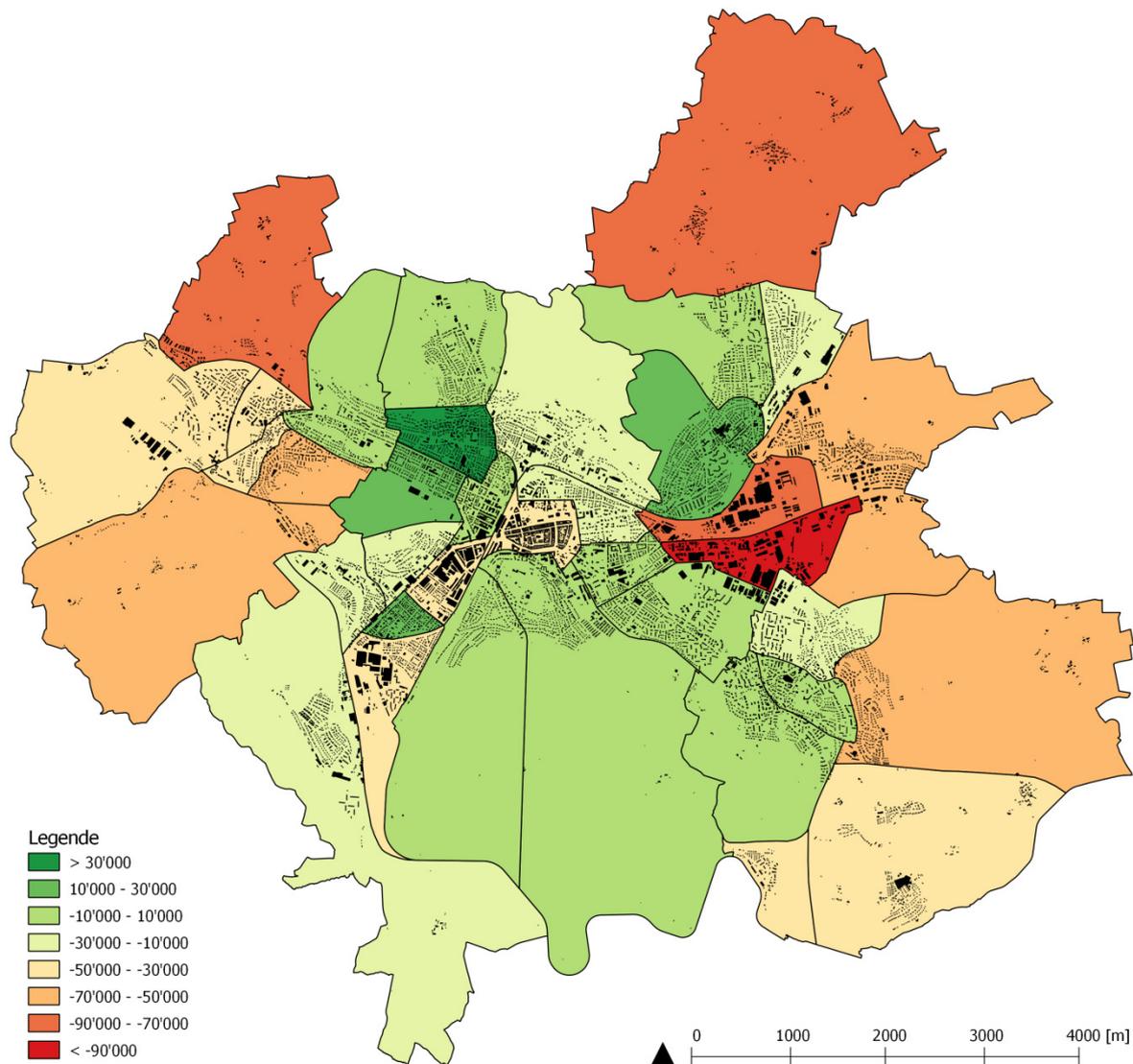


Abbildung 23 Graphische Auswertung der Nachhaltigkeitsbeurteilung der Verkehrszonen in der Stadt Winterthur; Verwendung von 8 Quantilen; ohne BIP

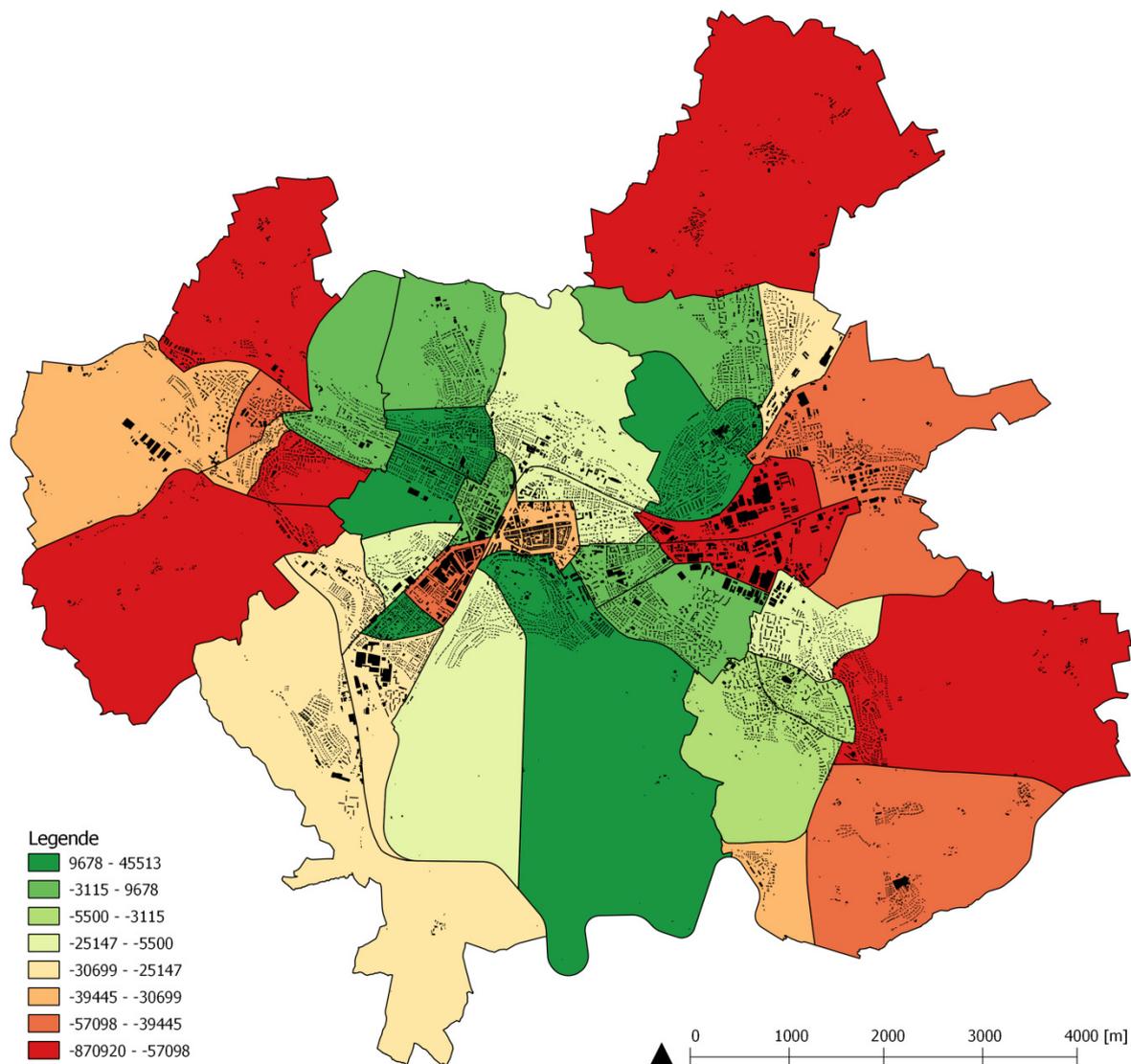


Abbildung 24 Graphische Auswertung der Nachhaltigkeitsbeurteilung der Verkehrszonen in Schlieren und Dietikon; Verwendung von 6 identischen Intervallen; ohne BIP

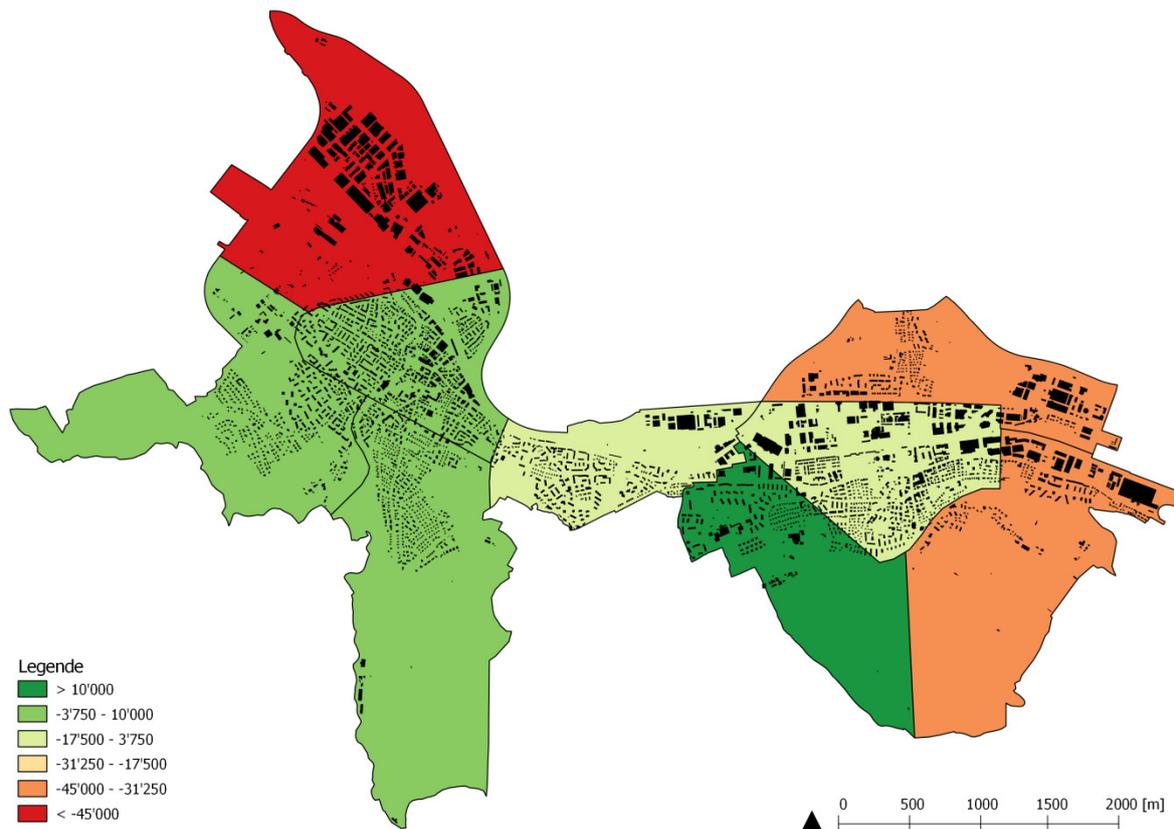
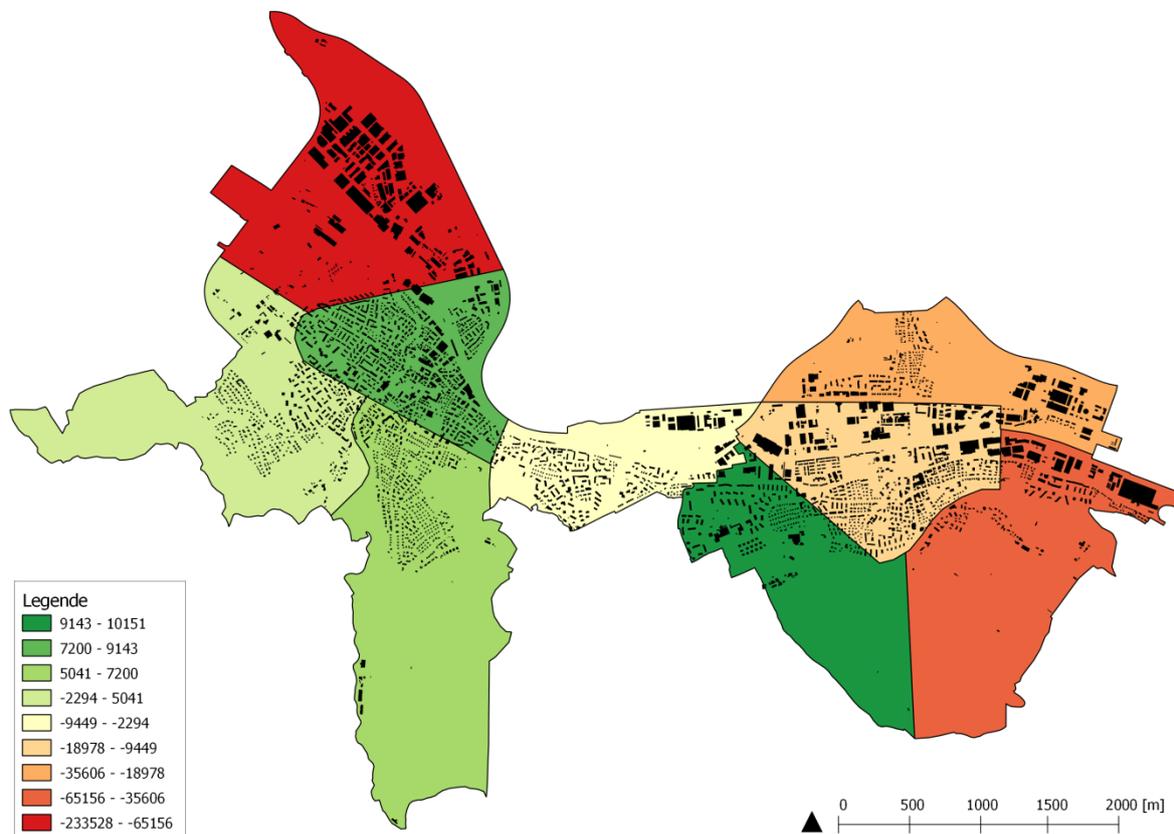


Abbildung 25 Graphische Auswertung der Nachhaltigkeitsbeurteilung der Verkehrszonen in Schlieren und Dietikon; Verwendung von 9 Quantilen; ohne BIP



8.3.2 Auswertung der Nachhaltigkeitsentwicklung über die Zeit

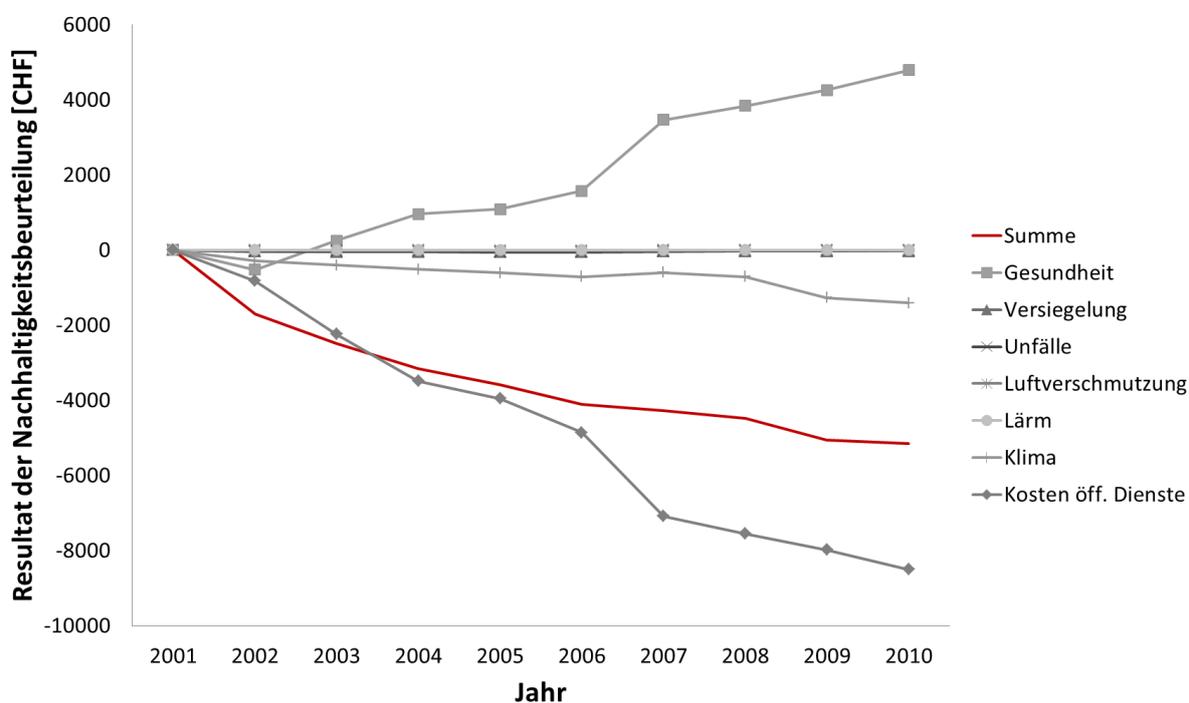
Die auf Simulationsergebnisse von *SustainCity* angewandten Nachhaltigkeitsbeurteilungen erlauben eine Auswertung der Entwicklung der Nachhaltigkeit über die Zeit. Abbildung 26 zeigt die Entwicklung der einzelnen diskontierten Kosten- und Nutzelemente sowie der Summe (d.h. des Gesamtergebnisses der Beurteilung) für die Jahre 2001 bis 2010 für das Gebiet der Gemeinden Schlieren und Dietikon.

Die zugrundeliegenden Simulationsergebnisse von *SustainCity* lagen nur für Haushalte und Arbeitsplätze vor. Um eine Anpassung der vom Gebäudepark abhängigen Grössen über die Zeit zu ermöglichen, wurden zudem nur Gebäude mit Baujahr im oder vor dem jeweiligen Beurteilungsjahr berücksichtigt. Es ist anzumerken, dass diese Anpassung auf der realen Entwicklung in den Jahren 2000 bis 2010 basiert, während die Entwicklung der Bevölkerung und Haushalte auf Simulationsergebnissen beruht. Zwischen den beiden Datenquellen können also

grosse Diskrepanzen bestehen und die gezeigte Entwicklung entspricht nicht der realen Entwicklung für die Jahre 2000 bis 2010.

Abbildung 26 zeigt klar den dominanten Einfluss der Elemente Gesundheit und Kosten für öffentliche Dienste auf das Gesamtergebnis. Auf den Einfluss der einzelnen Elemente wird in Kapitel 8.4 vertieft eingegangen.

Abbildung 26 Entwicklung der Nachhaltigkeit und der einzelnen Indikatoren in den Gemeinden Schlieren und Dietikon 2001 bis 2010



Die Daten für die Jahre 2001 bis 2010 stammen aus Simulationsergebnissen von *SustainCity* Version *Single Reduced*, Gemeinden Schlieren und Dietikon, BIP nicht berücksichtigt, neue Gebäude mit Baujahr nach dem jeweiligen Beurteilungsjahr nicht berücksichtigt

In Abbildung 27 bis Abbildung 34 ist die Entwicklung von Messgrößen für die gebaute Umwelt für das Gebiet der Gemeinden Schlieren und Dietikon für die Jahre 2001 – 2010 aufgrund der oben erwähnten Grundlagen der Ergebnisse in Abbildung 26 dargestellt. Es sollen hier exemplarisch die Möglichkeiten zur Auswertung von Resultaten des Beurteilungswerkzeugs anhand einiger Beispiele aufgezeigt werden. Auf die Bedeutung der einzelnen Indikatoren und Messgrößen wird in Kapitel 8.4 näher eingegangen. Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass die Simulationsdaten nicht die reale Entwicklung widerspiegeln.

Abbildung 27 Anzahl Einwohner (links) und Anzahl Arbeitsplätze (rechts) 2001 – 2010

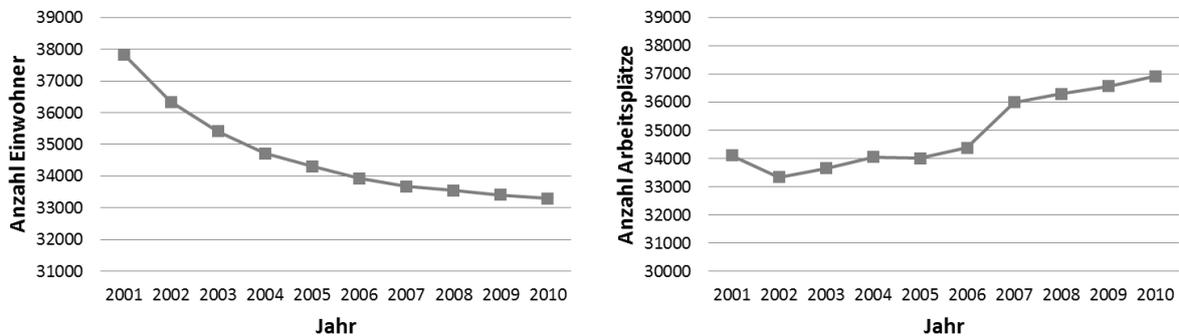


Abbildung 27 zeigt für die Jahre 2001 bis 2010 einen Rückgang der Einwohnerzahl um beinahe 5000, wobei die Abnahme mit der Zeit schwächer wird. Die Anzahl Arbeitsplätze nahm um etwa 2000 zu, wobei im Zeitraum 2006 – 2007 eine massive Zunahme von fast 900 Arbeitsplätzen zu verzeichnen war.

Die Summe aus Einwohnern und Arbeitsplätzen, dargestellt in Abbildung 28, reflektiert diese Beobachtungen. Der anfänglich starke Rückgang der Anzahl Einwohner konnte durch eine schwache Zunahme der Anzahl Arbeitsplätze nicht kompensiert werden, 2006 – 2007 war eine sprunghafte Zunahme zu verzeichnen und in den Folgejahren war das Wachstum der Arbeitsplätze absolut stärker als der Rückgang der Anzahl Einwohner. Das Verhältnis Arbeitsplätze / Einwohner nahm stetig zu.

Abbildung 28 Summe aus Anzahl Einwohnern und Arbeitsplätzen (links) und Verhältnis Arbeitsplätze / Einwohner (rechts) 2001 – 2010

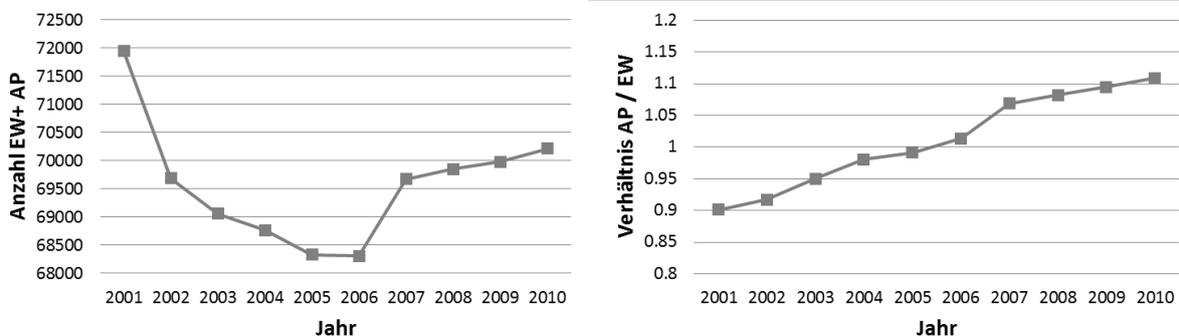
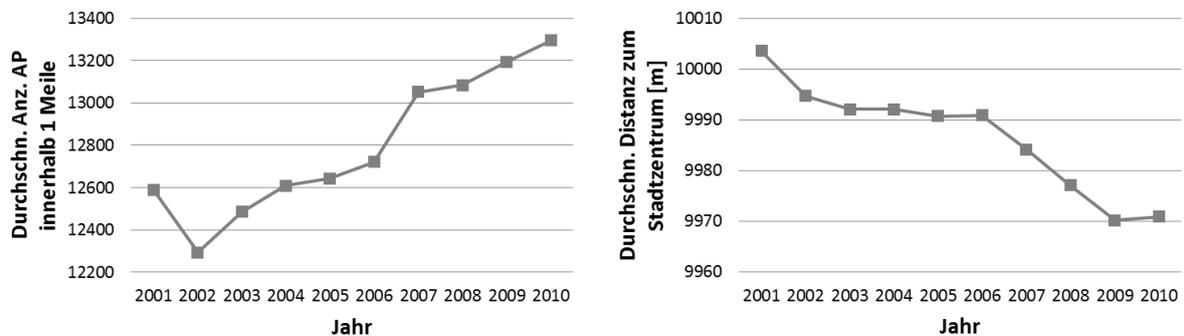


Abbildung 29 Durchschnittliche Anzahl Arbeitsplätze innerhalb 1 Meile (links) und Durchschnittliche Distanz zum Stadtzentrum [m] (rechts) 2001 – 2010



Die durchschnittliche Anzahl Arbeitsplätze innerhalb einer Meile für alle arbeitenden Einwohner (siehe Abbildung 29) reflektiert ziemlich genau die Entwicklung der Anzahl Arbeitsplätze.

Die durchschnittliche Distanz zur nächsten ÖV-Haltestelle für alle Einwohner nahm 2001 – 2010 um etwa 3.5 Meter zu (siehe Abbildung 30). Dies dürfte v.a. darauf zurückzuführen sein, dass in der Simulation keine neuen ÖV-Halte generiert werden.

Der Anteil der Gebäude mit Baujahr vor 1940 nimmt im Laufe der Zeit erwartungsgemäss ab, da neue Gebäude erstellt werden und daher die Gesamtanzahl an Gebäuden zunimmt, während die Zahl der alten Gebäude konstant bleibt (in der Simulation gibt es keine Rückbauten).

Abbildung 30 Durchschnittliche Distanz zur nächsten ÖV-Haltestelle [m] (links) und Anteil Gebäude mit Baujahr vor 1940 [%] (rechts) 2001 – 2010

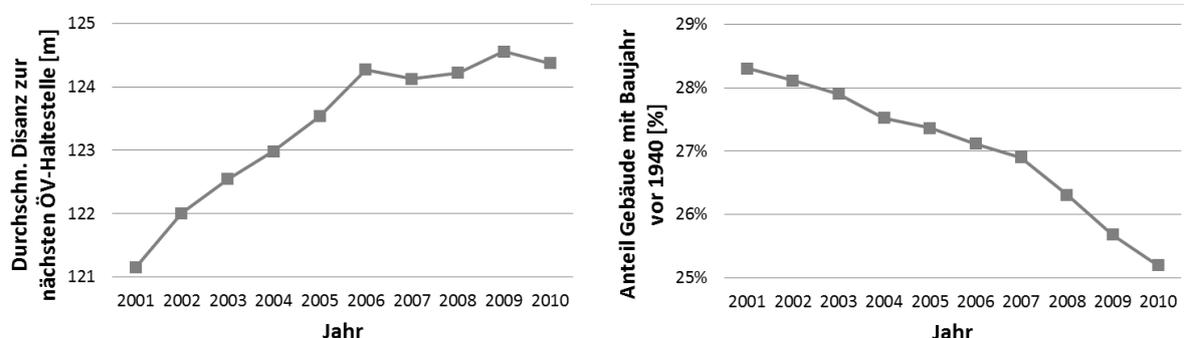
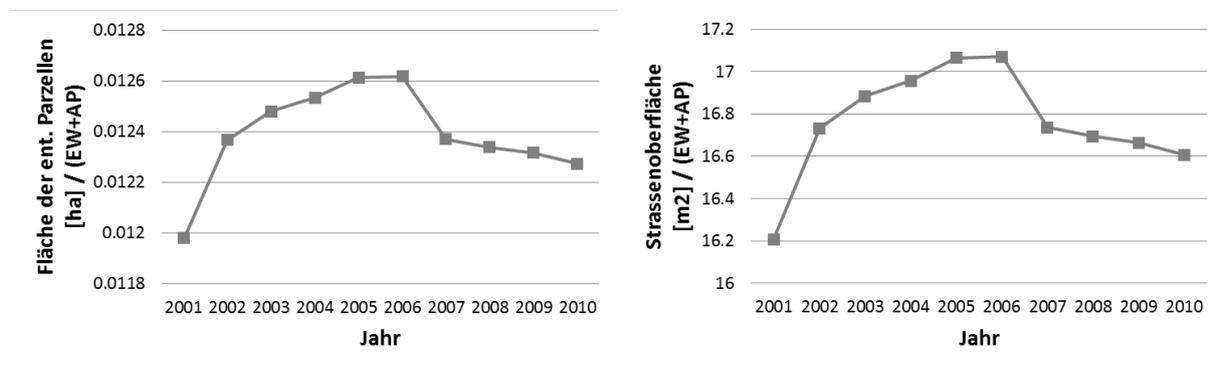


Abbildung 31 Fläche der entwickelten Parzellen [ha] normiert (EW+AP) (links) und Strassenoberfläche [m²] normiert (EW+AP) (rechts) 2001 – 2010



Die Fläche der entwickelten Parzellen und die Strassenoberfläche bleiben in der Simulation konstant. In Abbildung 31 dargestellt sind die normierten Werte, welche entsprechend ausschliesslich der Entwicklung der normierenden Summe aus Anzahl Einwohnern und Arbeitsplätzen folgen (siehe Abbildung 28).

In Abbildung 32 ist zu sehen, dass Geschossfläche mit Wohnnutzung nicht nur spezifisch aufgrund der sinkenden Einwohnerzahl (siehe Abbildung 27), sondern auch absolut zugenommen hat.

Abbildung 32 GF mit Wohnnutzung [m²] nicht normiert (links) und normiert (EW) (rechts) 2001 – 2010

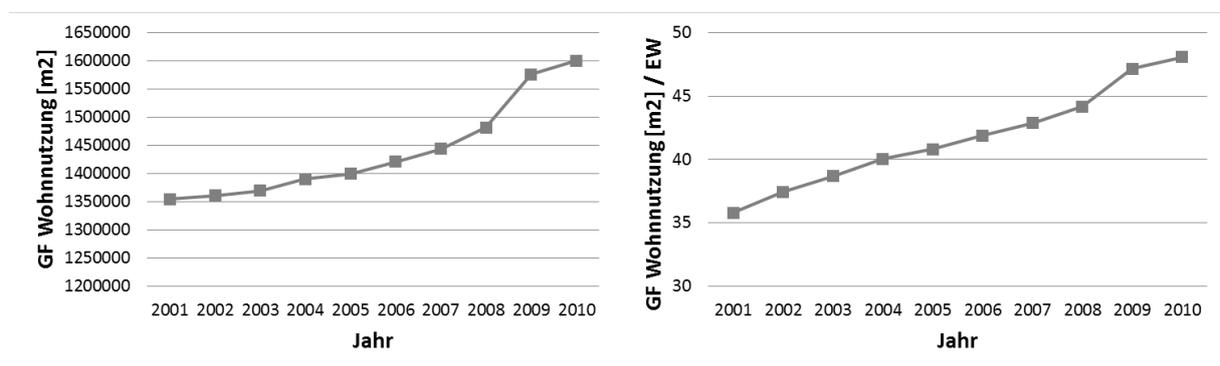
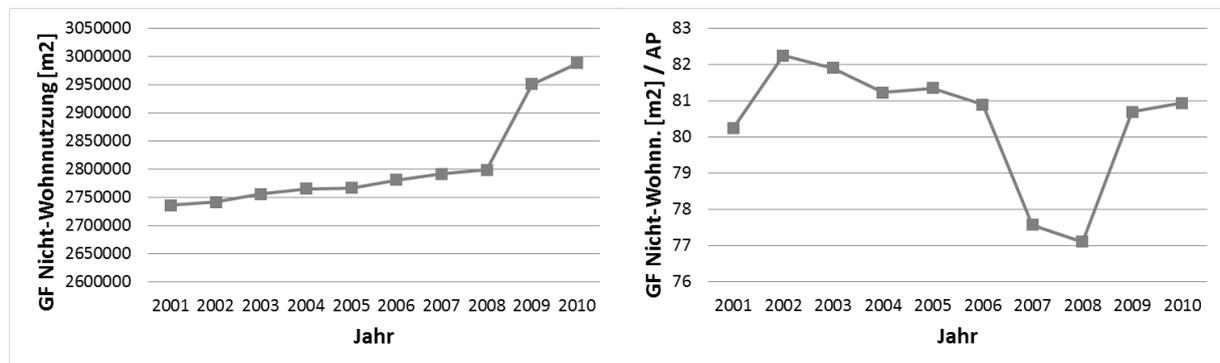


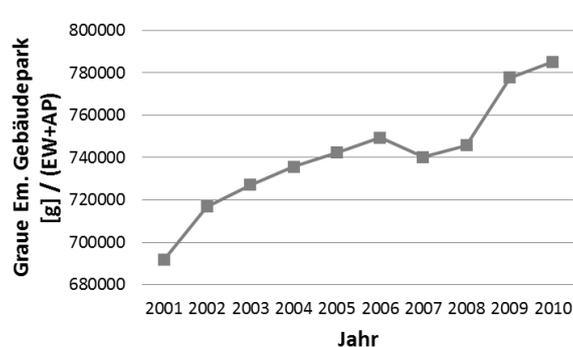
Abbildung 33 GF mit Nicht-Wohnnutzung [m²] nicht normiert (links) und normiert (AP) (rechts) 2001 – 2010



Wie Abbildung 33 zeigt, hat auch die Geschossfläche mit Nicht-Wohnnutzung absolut zugenommen. Spezifisch blieb sie bis auf die Jahre 2006 – 2009 relativ konstant, aufgrund der ebenfalls zunehmenden Anzahl Arbeitsplätze (siehe Abbildung 27). In den Jahren 2006 – 2007 ist der starke Anstieg der Anzahl Arbeitsplätze für den Einbruch der relativen Fläche verantwortlich; die massive Zunahme der absoluten Geschossfläche im Zeitraum 2008 – 2009 hat diesen Einbruch aber fast vollständig kompensiert.

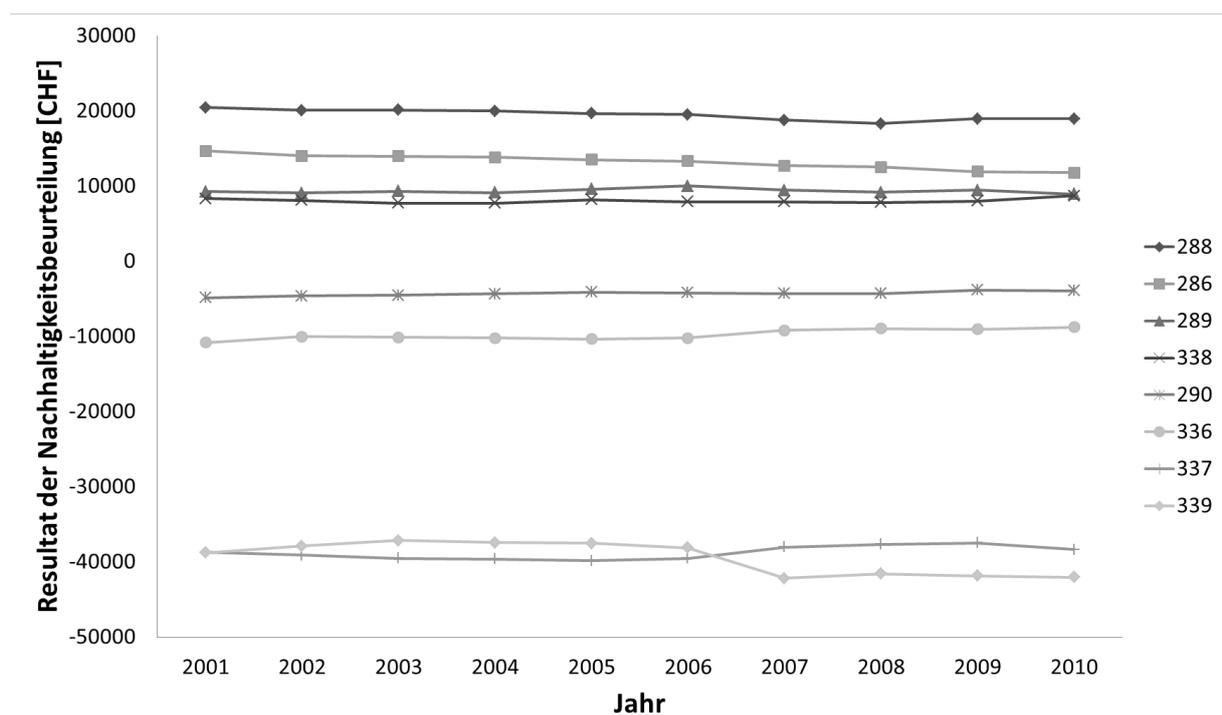
Die in Abbildung 34 gezeigte Entwicklung der normierten grauen Emissionen des Gebäudeparks zeugt einerseits vom Wachstum des Gebäudeparks und zeigt andererseits den Einfluss des Verlaufs der normierenden Summe aus Anzahl Einwohnern und Arbeitsplätzen auf (siehe Abbildung 28).

Abbildung 34 Graue Emissionen des Gebäudeparks [g CO₂-äqu.] normiert (EW+AP) 2001 – 2010



Mit der Version *Multiple* wurde auch die Entwicklung der einzelnen Verkehrszonen in den Gemeinden Schlieren und Dietikon im Zeitraum 2001 – 2010 ermittelt, wobei als Referenzzustand jeweils das gesamte Gebiet der beiden Gemeinden im entsprechenden Jahr diente. Ermittelt wird also die Veränderung der „Rangordnung“ der verschiedenen Verkehrszonen im Laufe der Zeit. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Abbildung 35 dargestellt. Die Nummern der Verkehrszonen werden in Abbildung 36 geographisch zugeordnet, um die Ergebnisse mit den oben gezeigten Karten (siehe insb. Abbildung 25) vergleichen zu können. Die Abweichungen von den in Abbildung 25 dargestellten Ergebnissen sind auf die unterschiedlichen Datengrundlagen zurückzuführen (Basisjahr *SustainCity* vs. Simulationsergebnisse).

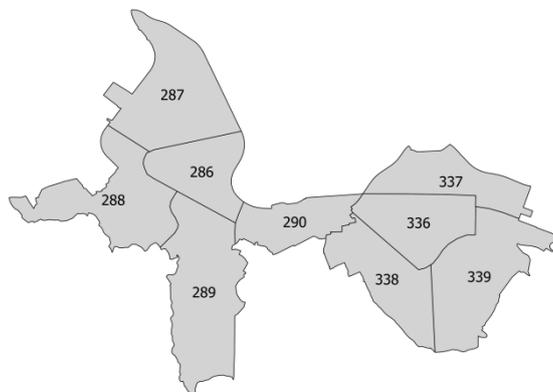
Abbildung 35 Entwicklung 2001 – 2010 des Resultats der Nachhaltigkeitsbeurteilung der Verkehrszonen in den Gemeinden Schlieren und Dietikon bei Verwendung des gesamten Gebiets beider Gemeinden im jeweiligen Beurteilungsjahr als Referenzzustand



Verkehrszone 287 wird nicht dargestellt, da die Grafik sonst schwer lesbar würde; das Ergebnis für diese Zone liegt zwischen -195168 (2001) und -151583 (2008)

Die Daten für die Jahre 2001 bis 2010 stammen aus Simulationsergebnissen von *SustainCity* Version *Multiple*, Gemeinden Schlieren und Dietikon, Beurteilung der Verkehrszonen, BIP nicht berücksichtigt

Abbildung 36 Verkehrszonen in den Gemeinden Schlieren und Dietikon



Die relativ hohe Konstanz der „Rangordnung“ zwischen den einzelnen Verkehrszonen ist möglicherweise auch auf die Konstanz für gewisse Elemente der gebauten Umwelt wie Strassen und Parzellen, für die keine Simulationsdaten verfügbar waren, zurückzuführen.

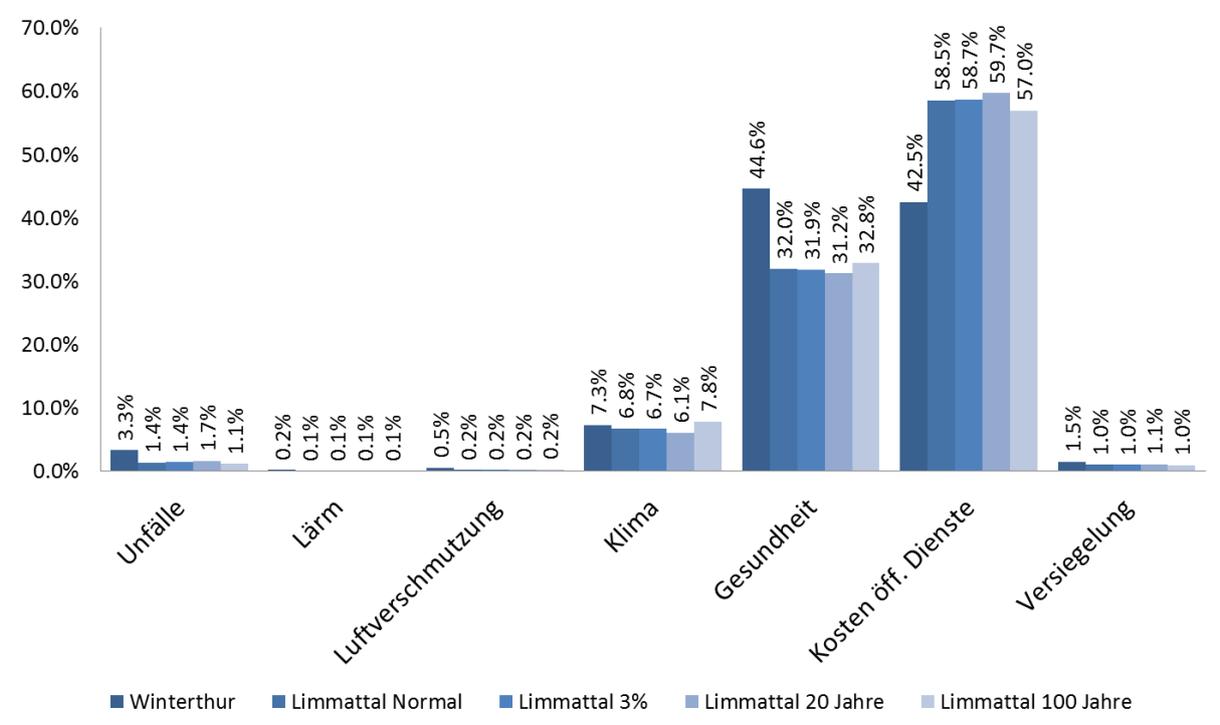
8.4 Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen

8.4.1 Anteile der einzelnen Kosten- und Nutzelemente am Resultat der Nachhaltigkeitsbeurteilung

Abbildung 37 zeigt den Einfluss der einzelnen diskontierten Kosten- und Nutzelemente auf das Gesamtergebnis der Nachhaltigkeitsbeurteilung für alle mit der Version *Multiple* durchgeführten Beurteilungen des Basisjahrs. Es zeigt sich, dass die beiden Elemente Gesundheit und Kosten der öffentlichen Dienste einen sehr dominanten Einfluss ausüben (zusammen zwischen 87.1 und 90.9 %). Wesentlich weniger, aber trotzdem erheblichen Einfluss übt das Element Klima aus (zwischen 6.1 und 7.8 %). Unfälle und Versiegelung üben einen sehr kleinen Einfluss auf das Gesamtergebnis aus (zusammen zwischen 2.1 und 4.8 %). Der Einfluss der Elemente Lärm und Luftverschmutzung ist verschwindend gering (zusammen 0.3 bis 0.7 %).

Der markanteste Unterschied in den Anteilen der einzelnen Elemente am Resultat zwischen der Beurteilung der Stadt Winterthur und der Gemeinden Schlieren und Dietikon liegt bei den Werten für Gesundheit und Kosten für öffentliche Dienste. Diese Werte weichen um 12.6 bis 17.3 Prozentpunkte ab. Bemerkenswert ist, dass ihr gemeinsamer Einfluss für beide Gebiete praktisch gleich gross ist (87.1 % für Winterthur, 89.9 bis 90.9 % für Schlieren und Dietikon).

Abbildung 37 Anteile der einzelnen diskontierten Kosten und Nutzen am Resultat der Nachhaltigkeitsbeurteilung in Prozent ohne BIP



Berechnung: Absoluter Wert des jeweiligen diskontierten Kosten- od. Nutzelements / Summe der absoluten Werte aller diskontierter Kosten- und Nutzelemente

Winterthur und Limmattal Normal: Diskontsatz 2%, Betrachtungszeitraum 50 Jahre

Limmattal 3%: Diskontsatz 3%, Betrachtungszeitraum 50 Jahre

Limmattal 20 Jahre: Diskontsatz 2%, Betrachtungszeitraum 20 Jahre

Limmattal 100 Jahre: Diskontsatz 2%, Betrachtungszeitraum 100 Jahre

Version *Multiple*, Gemeinden Winterthur / Schlieren und Dietikon, Beurteilung der Verkehrszonen, BIP nicht berücksichtigt

8.4.2 Einfluss der einzelnen Messgrössen

Wie das vorangehende Kapitel zeigt, sind also gewisse Kosten- und Nutzenfaktoren dominant, während andere das Ergebnis der Nachhaltigkeitsbeurteilung kaum beeinflussen. Um aufzuzeigen, welche Messgrössen für die gebaute Umwelt und welche daraus ermittelten Eingangsgrossen für die Berechnung der Indikatoren letztlich einen starken Einfluss auf das Beurteilungsergebnis haben, sollen hier die verschiedenen Abhängigkeiten im Modell zur Beurteilung der Nachhaltigkeit nochmals systematisch aufgezeigt werden.

Tabelle 29 zeigt qualitativ den Einfluss der Messgrössen für die gebaute Umwelt auf die Eingangsgrössen zur Berechnung der Indikatoren. Tabelle 30 zeigt den Einfluss der Eingangsgrössen für die Berechnung der Indikatoren auf die Indikatoren sowie deren Anteil am Beurteilungsergebnis gemäss Abbildung 37. Diese beiden Tabellen werden in Tabelle 31 kombiniert. Diese zeigt also den Einfluss der Messgrössen für die gebaute Umwelt auf die Indikatoren sowie deren Anteil am Beurteilungsergebnis.

Tabelle 29 Einfluss der Messgrössen für die gebaute Umwelt auf die Eingangsgrössen für die Berechnung der Indikatoren

	VKT	N_{FuSS}	Ausg _D	A_{Entw}	$GF_{Wo.}$	$GF_{N-W.}$	A_{St}	GE_{Gpark}	$Prod_A.$
A_{Entw}				=					
d_{EW}	-	+	-						
d_{AP}		+							+
$r_{AP/EW}$	-	+	+						
d_{Str}	-	+							
$s_{Geb1940}$			+						
A_{St}							=		
$I_{Entropie}$	-	+							
$dist_{CBD}$	+								
$dist_{ÖV}$	+	-							
AP_{mile}		+							
GF_{Wohnen}					=				
$GF_{N-Wo.}$						=			
$A_{Geb,g}$								+	
$U_{Geb,g}$								+	
$Anz_{Gesch,g}$								+	
$H_{Gesch,g}$								+	
$GF_{Wohnen,g}$								+	
$GF_{N-Wo.,g}$								+	
EW				N	N		N	N	
AP				N		N	N	N	

+: Positiver Einfluss, -: Negativer Einfluss, =: Direkte Messung, N: Für Normierung

Tabelle 30 Einfluss der Eingangsgrössen für die Berechnung der Indikatoren auf die Indikatoren

	Unfälle	Lärm	Luft- verschm.	Klima	Gesund- heit	Kost. ö. Dienste	Versie- gelung	BIP
Anteil	1.8 – 3.3 %	0.1 – 0.2 %	0.2 – 0.5 %	6.1 – 7.8 %	31.2 – 44.6 %	42.5 – 59.7 %	1.0 – 1.5 %	(43.5 – 45.5 %)
<i>VKT</i>	+	+	+	+				
<i>N_{Fuss}</i>					+			
<i>Ausg_{D.}</i>						+		
<i>A_{Entw}</i>							+	
<i>GF_{Wo.}</i>				+				
<i>GF_{N-W.}</i>				+				
<i>A_{St}</i>				+				
<i>GE_{Gpark}</i>				+				
<i>Prod_{A.}</i>								+

Anteil: Anteil der Indikatoren auf das Gesamtergebnis der Nachhaltigkeitsbeurteilung, Werte für alle Elemente ausser BIP ohne Berücksichtigung des BIP

+: Positiver Einfluss

Tabelle 31 Einfluss der Messgrössen für die gebaute Umwelt auf die Indikatoren

	Unfälle	Lärm	Luft- verschm.	Klima	Gesund- heit	Kost. ö. Dienste	Versie- gelung	BIP
Anteil	1.8 – 3.3 %	0.1 – 0.2 %	0.2 – 0.5 %	6.1 – 7.8 %	31.2 – 44.6 %	42.5 – 59.7 %	1.0 – 1.5 %	(43.5 – 45.5 %)
A_{Entw}							+	
d_{EW}	-	-	-	-	+	-		
d_{AP}					+			+
$r_{AP/EW}$	-	-	-	-	+	+		
d_{Str}	-	-	-	-	+			
$S_{Geb1940}$						+		
A_{St}				+				
$I_{Entropie}$	-	-	-	-	+			
$dist_{CBD}$	+	+	+	+				
$dist_{ÖV}$	+	+	+	+	-			
AP_{mile}					+			
GF_{Wohnen}				+				
$GF_{N-Wo.}$				+				
$A_{Geb,g}$				+				
$U_{Geb,g}$				+				
$Anz_{Gesch,g}$				+				
$H_{Gesch,g}$				+				
$GF_{Wohnen,g}$				+				
$GF_{N-Wo.,g}$				+				
EW				N			N	
AP				N			N	

Anteil: Anteil der Indikatoren auf das Gesamtergebnis der Nachhaltigkeitsbeurteilung, Werte für alle Elemente ausser BIP ohne Berücksichtigung des BIP; BIP: siehe Kapitel 8.4.3

+: Positiver Einfluss, -: Negativer Einfluss, =: Direkte Messung, N: Für Normierung

Von grossem Interesse ist vor allem, welche Messgrössen letztlich einen dominanten Einfluss auf das Ergebnis der Nachhaltigkeitsbeurteilung ausüben. Diese sind mit grosser Wahrscheinlichkeit unter den Messgrössen zu suchen, welche in die dominanten Indikatoren Gesundheit und Kosten für öffentliche Dienste einfließen. Um mögliche Hinweise auf den Einfluss von Messgrössen zu erhalten, werden in Abbildung 38 bis Abbildung 55 Korrelationen zwischen Messgrössen für die gebaute Umwelt und dem Ergebnis der Nachhaltigkeitsbeurteilung untersucht.

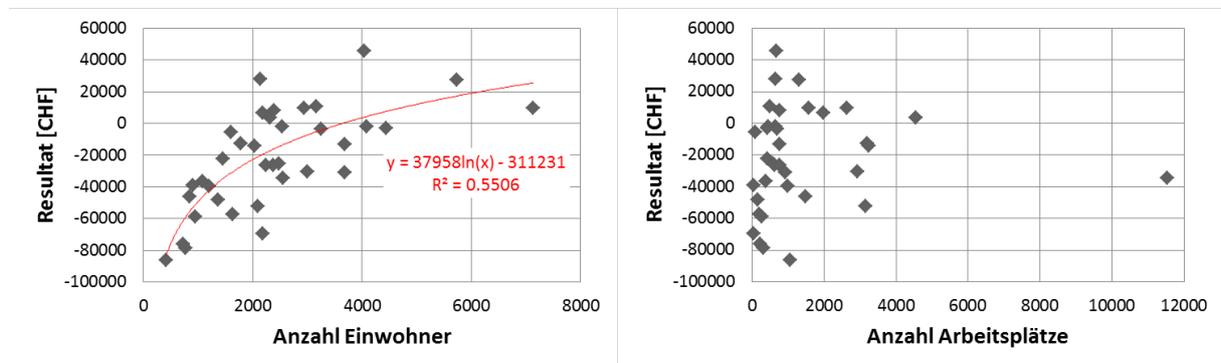
Diese Untersuchung geschieht anhand der mit Version *Multiple* durchgeführten Beurteilung der Verkehrszonen in der Stadt Winterthur ohne Berücksichtigung des BIP (beschrieben in Kapitel 8.2.1). In Winterthur gibt es 37 Zonen des kantonalen Verkehrsmodells. Eine Zone (Nummer 13) wurde bei den gezeigten Abbildungen nicht berücksichtigt, da ihr Resultat um eine Grössenordnung von den übrigen Resultaten abweicht, ihre Berücksichtigung eine optische Auswertung der Abbildungen also sehr schwierig machen würde.

Auf eine Darstellung derselben Daten aus der Beurteilung der Gemeinden Schlieren und Dietikon wird verzichtet, da die geringe Anzahl von nur neun Datenpunkten kaum schlüssige Aussagen aus einer optischen Analyse zulassen würde.

Wie Abbildung 38 zeigt, besteht ein positiver, logarithmischer Zusammenhang zwischen der Anzahl Einwohner in einem Beurteilungsgebiet und dem Beurteilungsergebnis für dieses Gebiet. Bei der Anzahl Arbeitsplätze ist kein entsprechender Zusammenhang zu erkennen.

Die Anzahl Einwohner fliesst nur zur Normierung gewisser Eingangsgrössen für die Berechnung der Indikatoren in das Modell ein, welche wiederum nur die Indikatoren Klima und Versiegelung beeinflussen. Zwar sind diese beiden Indikatoren, v.a. Klima, nicht unbedeutend, gehören aber nicht zu den beiden dominanten Indikatoren Gesundheit und Kosten für öffentliche Dienste. Eine direkte Kausalität zwischen Anzahl Einwohnern und Resultat der Nachhaltigkeitsbeurteilung dürfte also kaum in so ausgeprägter Form wie von Abbildung 38 suggeriert vorhanden sein.

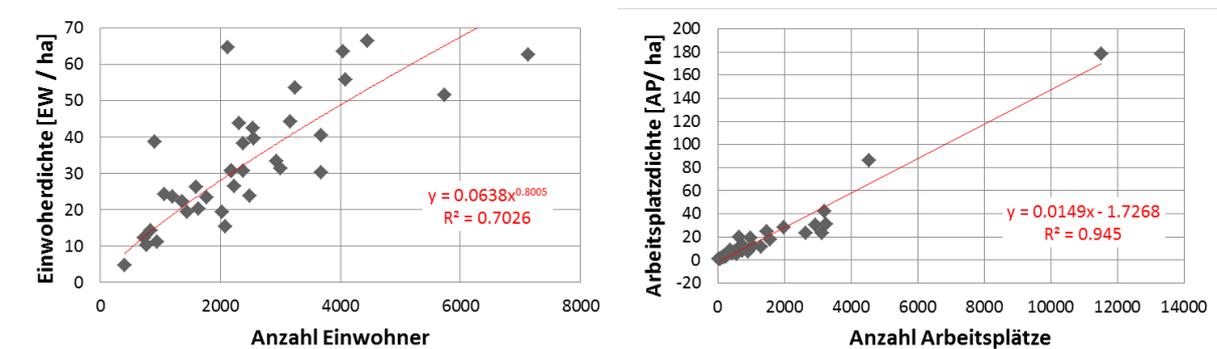
Abbildung 38 Resultat vs. Anzahl Einwohner (links)
Resultat vs. Anzahl Arbeitsplätze (rechts)



Wie Abbildung 39 zeigt, besteht eine starke Korrelation zwischen der Anzahl Einwohner und der Einwohnerdichte. Es wäre also möglich, dass ein grosser Einfluss der Einwohnerdichte auf das Resultat der Beurteilung für die Korrelation zwischen Anzahl Einwohner und Resultat verantwortlich ist.

Zwischen der Anzahl Arbeitsplätze und der Arbeitsplatzdichte besteht ebenfalls eine ausgeprägte Korrelation.

Abbildung 39 Einwohnerdichte vs. Anzahl Einwohner (links)
Arbeitsplatzdichte vs. Anzahl Arbeitsplätze (rechts)



Wie Abbildung 40 zeigt, besteht eine starke Korrelation zwischen der Einwohnerdichte und dem Resultat der Nachhaltigkeitsbeurteilung. Die Einwohnerdichte beeinflusst sechs Indikatoren, welche zusammen einen Einfluss von zwischen 98.5 und 99 % auf das Resultat ausüben. Der Einfluss der Einwohnerdichte ist in allen Fällen derartig, dass ihre Zunahme zu geringeren Kosten respektive höheren Nutzen führt. Es ist also sehr plausibel, dass die Einwohner-

dichte tatsächlich einen starken Einfluss auf das Resultat der Nachhaltigkeitsbeurteilung ausübt.

Bei der Arbeitsplatzdichte ist kein entsprechender Zusammenhang festzustellen.

Abbildung 40 Resultat vs. Einwohnerdichte [EW / ha], bezogen auf entw. Fläche (links)
Resultat vs. Arbeitsplatzdichte [AP / ha], bezogen auf entw. Fläche (rechts)

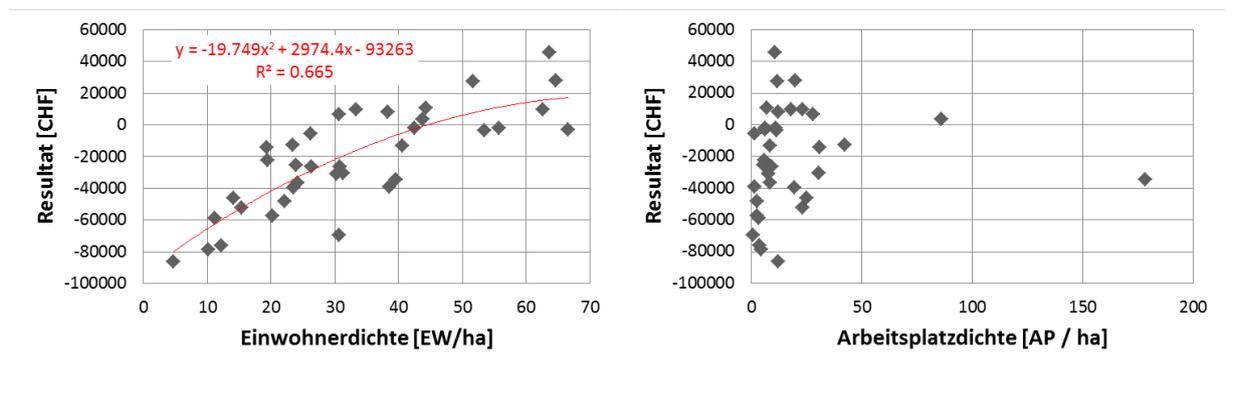
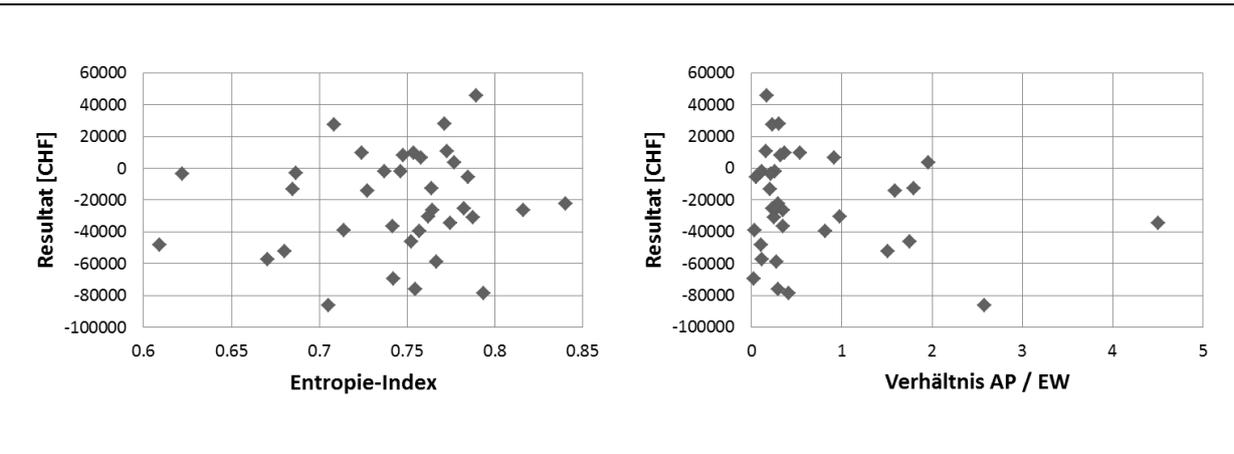


Abbildung 41 zeigt, dass sowohl für den Entropie-Index als auch für das Verhältnis Arbeitsplätze / Einwohner kein augenscheinlicher Zusammenhang mit dem Resultat der Nachhaltigkeitsbeurteilung besteht.

Abbildung 41 Resultat vs. Entropie-Index (links)
Resultat vs. Verhältnis Arbeitsplätze / Einwohner (rechts)

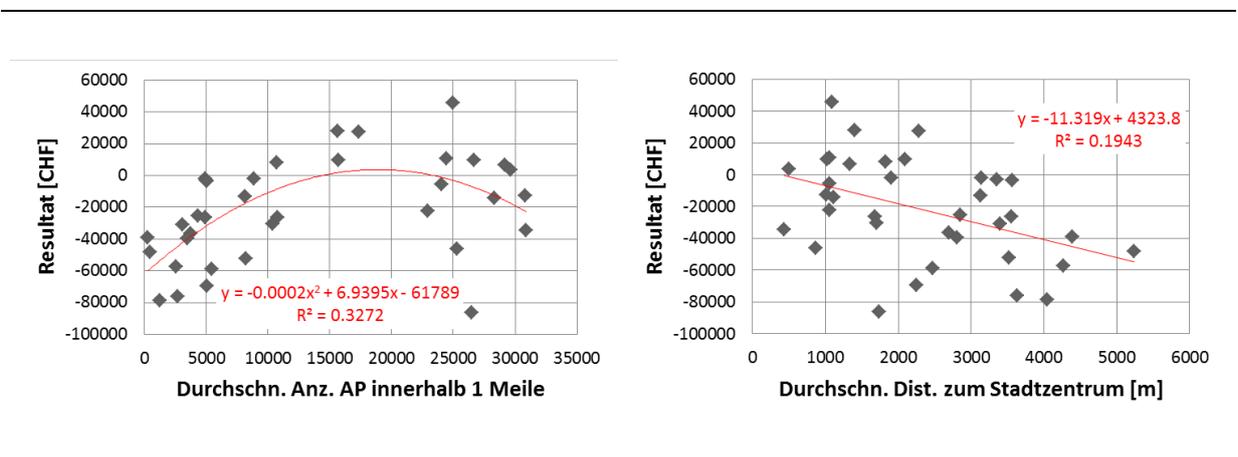


Für die in Abbildung 42 dargestellte durchschnittliche Anzahl Arbeitsplätze innerhalb einer Meile für alle arbeitenden Einwohner ist ein quadratischer Zusammenhang in umgekehrter U-Form feststellbar. Die durchschnittliche Anzahl Arbeitsplätze innerhalb einer Meile hat einen Einfluss auf die Nutzung des Fussverkehrs und damit auf den dominanten Indikator Gesund-

heit. Allerdings widersprechen die tieferen Werte für das Resultat bei sehr hohen Werten für die durchschnittliche Anzahl Arbeitsplätze innerhalb einer Meile dieser These.

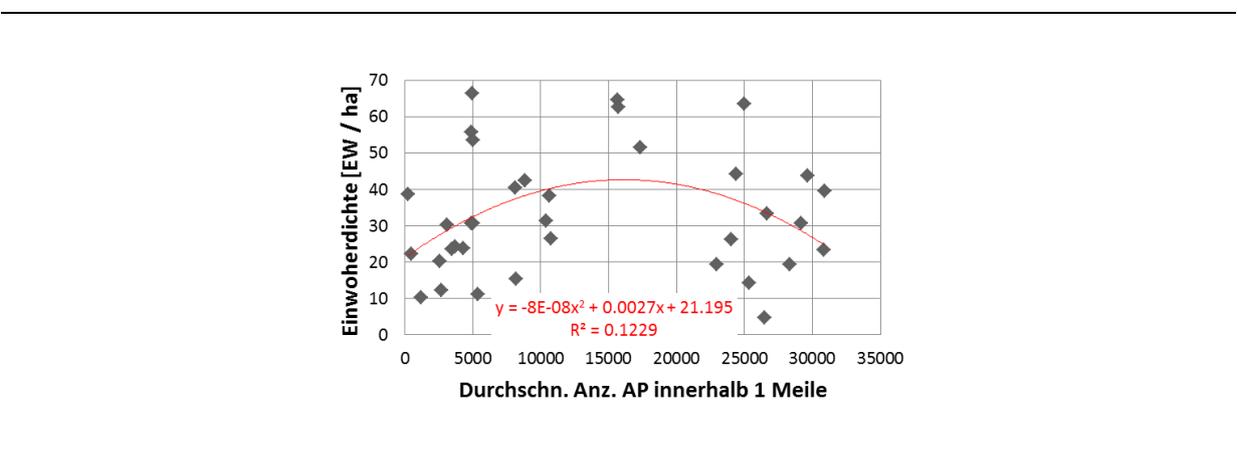
Zwischen der Distanz zum nächsten Stadtzentrum für alle Einwohner und dem Resultat der Nachhaltigkeitsbeurteilung besteht ein schwacher negativer Zusammenhang. Die Distanz zum nächsten Stadtzentrum für alle Einwohner beeinflusst vier Indikatoren, die zusammen aber nur einen Einfluss von zwischen 8.2 und 11.8 % auf das Ergebnis der Beurteilung haben. Einen dominanten Einfluss dürfte die Distanz zum nächsten Stadtzentrum also eher nicht ausüben.

Abbildung 42 Resultat vs. Durchschn. Anz. Arbeitsplätze innerhalb einer Meile (links)
Resultat vs. Durchschn. Dist. zum nächsten Stadtzentrum [m] (rechts)



Wie Abbildung 43 zeigt, besteht ein schwacher quadratischer Zusammenhang in umgekehrter U-Form zwischen der durchschnittlichen Anzahl Arbeitsplätze innerhalb einer Meile und der Einwohnerdichte, was die Form des Zusammenhangs in Abbildung 42 erklären könnte.

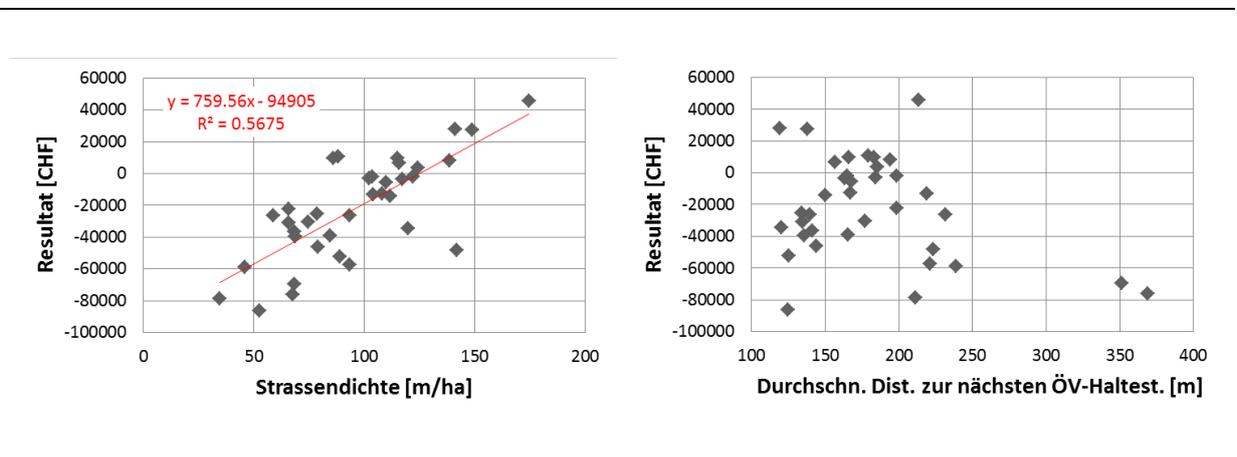
Abbildung 43 Einwohnerdichte vs. Durchschn. Anz. Arbeitsplätze innerhalb einer Meile



Ein relativ starker positiver Zusammenhang ist in Abbildung 44 zwischen der Strassendichte und dem Resultat der Nachhaltigkeitsbeurteilung zu erkennen. Die Strassendichte beeinflusst fünf Indikatoren, welche zusammen einen Einfluss von zwischen 39.4 und 56.4 % auf das Resultat ausüben, und zwar immer so, dass eine höhere Strassendichte zu geringeren Kosten respektive höheren Nutzen führt. Ein starker Einfluss der Strassendichte auf das Resultat erscheint also plausibel.

Bei der durchschnittlichen Distanz zur nächsten ÖV-Haltestelle für alle Einwohner ist kein Zusammenhang zum Resultat der Beurteilung zu erkennen.

Abbildung 44 Resultat vs. Strassendichte [m / ha] (links)
 Resultat vs. Durchschn. Dist. zur nächsten ÖV-Haltestelle [m] (rechts)



Dasselbe gilt für den in Abbildung 45 dargestellten Anteil der Gebäude mit Baujahr vor 1940.

Abbildung 45 Resultat vs. Anteil der Gebäude mit Baujahr vor 1940 [%]

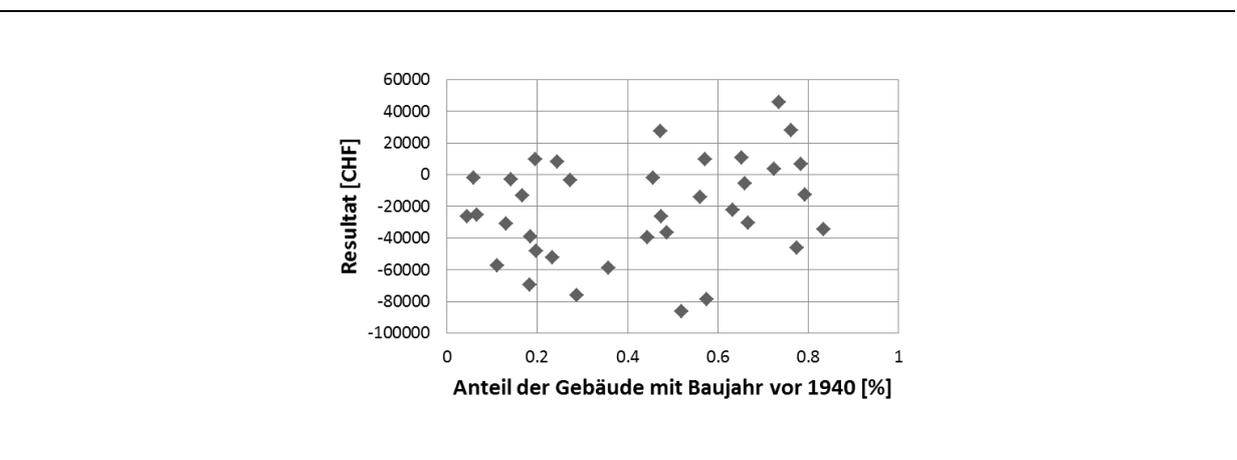
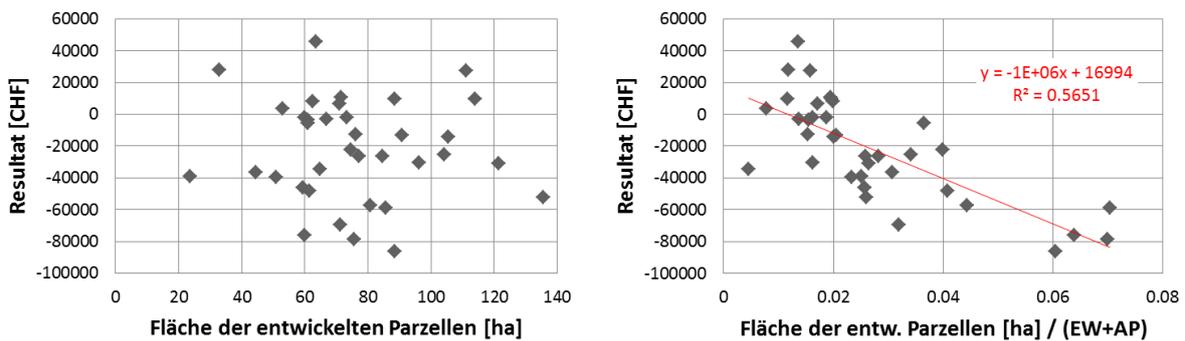


Abbildung 46 zeigt, dass zwischen der Fläche der entwickelten Parzellen und dem Resultat der Nachhaltigkeitsbeurteilung für den nicht normierten Fall kein und für den normierten Fall

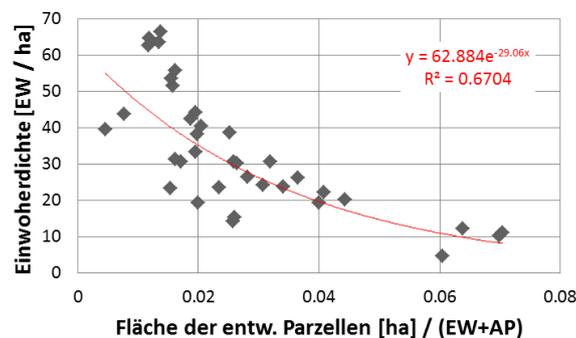
ein negativer linearer Zusammenhang besteht. Diese Messgrösse beeinflusst ausschliesslich den Indikator Versiegelung, welcher nur 1 bis 1.5 % Einfluss auf das Gesamtergebn ausübt. Es erscheint also kaum möglich, dass die normierte Fläche der entwickelten Parzellen das Resultat dominant beeinflusst.

Abbildung 46 Resultat vs. Fläche der entwickelten Parzellen [ha]
links: nicht normiert; rechts: normiert (Einwohner + Arbeitsplätze)



Wie Abbildung 47 zeigt, besteht eine starke negative Korrelation zwischen der normierten Fläche der entwickelten Parzellen und der Einwohnerdichte, was auch den in Abbildung 46 gezeigten negativen Zusammenhang zwischen ersterer Messgrösse und dem Beurteilungsergebnis erklären dürfte.

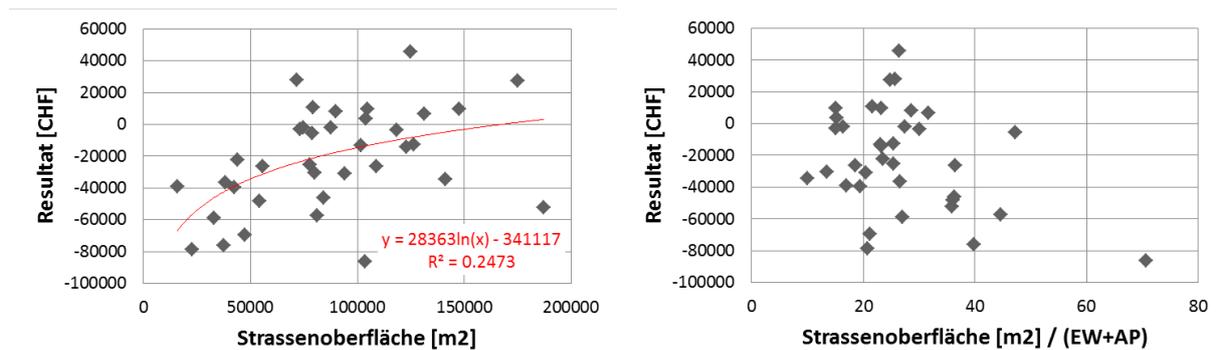
Abbildung 47 Einwohnerdichte vs.
Fläche der entwickelten Parzellen [ha] normiert (EW + AP)



In Abbildung 48 ist ein positiver Zusammenhang zwischen der nicht normierten Strassenoberfläche und dem Resultat der Nachhaltigkeitsbeurteilung zu erkennen, während bei der normierten Strassenoberfläche kein solcher Zusammenhang vorhanden zu sein scheint. Da nur

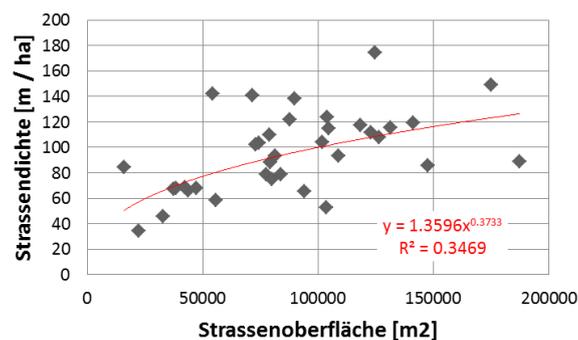
die normierte Grösse in das Modell einfließt, kann kaum von einer kausalen Beziehung zwischen nicht normierter Strassenoberfläche und Resultat ausgegangen werden.

Abbildung 48 Resultat vs. Strassenoberfläche [m²]
links: nicht normiert; rechts: normiert (Einwohner + Arbeitsplätze)



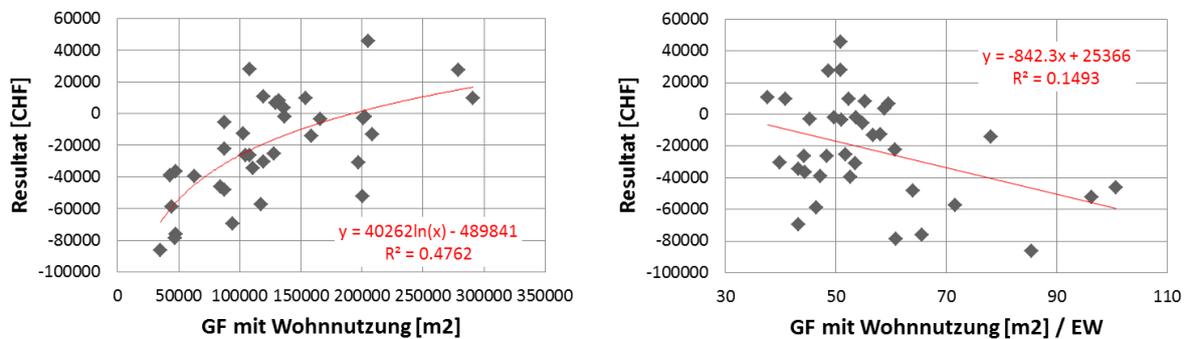
Vielmehr besteht wie in Abbildung 49 gezeigt eine positive Korrelation zwischen Strassenoberfläche und Strassendichte, welche den in Abbildung 48 zu beobachtenden Zusammenhang erklären dürfte.

Abbildung 49 Strassendichte vs. Strassenoberfläche



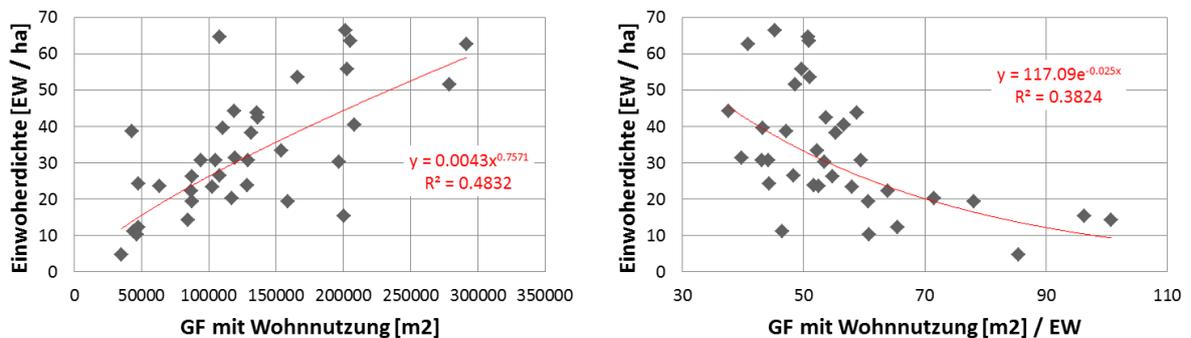
Die in Abbildung 50 zu erkennenden Zusammenhänge zwischen der Geschossfläche mit Wohnnutzung (sowohl nicht normiert als auch normiert) und dem Resultat der Nachhaltigkeitsbeurteilung dürften ebenfalls nicht auf den direkten Einfluss dieser Messgrößen auf das Resultat zurückzuführen sein, beeinflussen sie doch nur den Indikator Klima, der erstens nur keineswegs dominante 6.1 – 7.8 % Einfluss auf das Resultat ausübt und zweitens von sehr vielen Messgrößen beeinflusst wird.

Abbildung 50 Resultat vs. Geschossfläche mit Wohnnutzung aller Gebäude [m²]
links: nicht normiert; rechts: normiert (Einwohner)



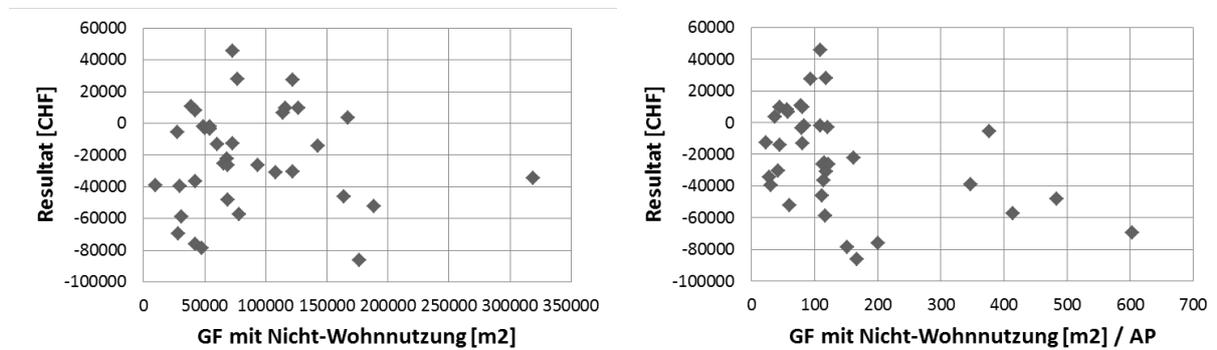
Wiederum könnte die für sowohl die nicht normierte als auch normierte Geschossfläche mit Wohnnutzung in Abbildung 55 zu beobachtende Korrelation mit der Einwohnerdichte die in Abbildung 50 beobachteten Zusammenhänge erklären.

Abbildung 51 Einwohnerdichte vs. Geschossfläche mit Wohnnutzung aller Gebäude [m²]
links: nicht normiert; rechts: normiert (Einwohner)



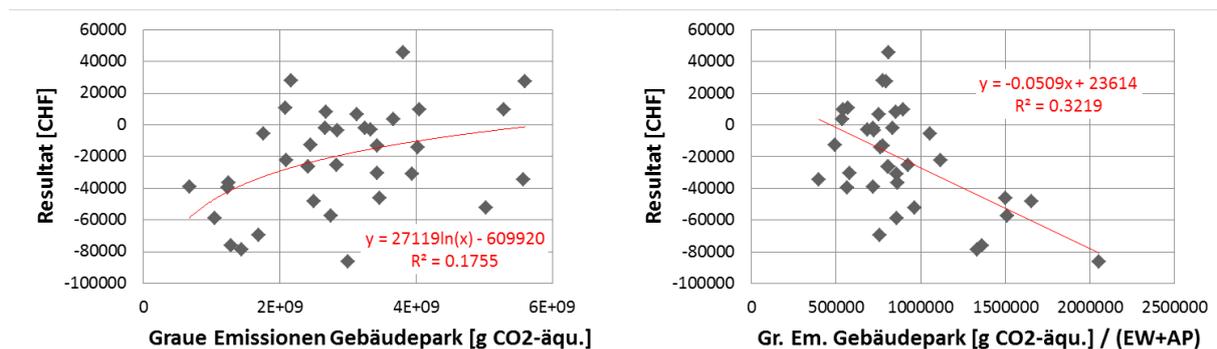
Bei der in Abbildung 52 dargestellten Geschossfläche mit Nicht-Wohnnutzung ist kein offensichtlicher Zusammenhang mit dem Resultat der Nachhaltigkeitsbeurteilung auszumachen.

Abbildung 52 Resultat vs. Geschossfläche mit Nicht-Wohnnutzung aller Gebäude [m²]
links: nicht normiert; rechts: normiert (Arbeitsplätze)



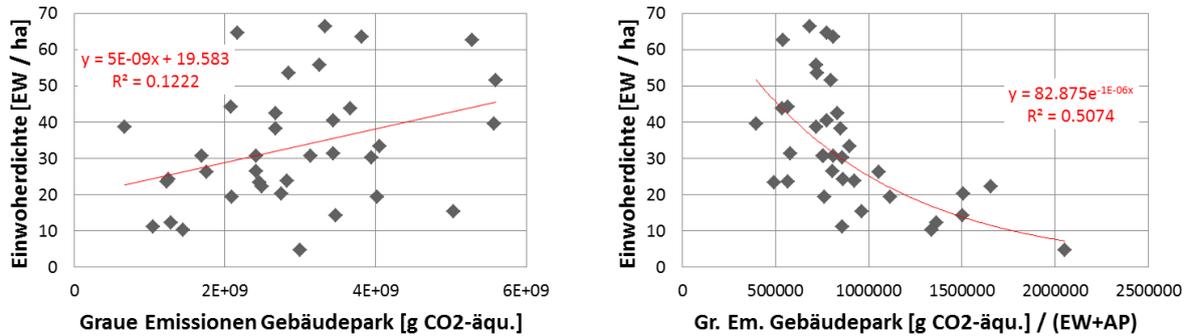
Bei den grauen Emissionen des Gebäudeparks besteht wie in Abbildung 53 zu sehen ein schwacher positiver Zusammenhang zwischen der nicht normierten Grösse und dem Resultat und ein stärkerer, negativer Zusammenhang zwischen der normierten Grösse und dem Resultat. Dies könnte tatsächlich auf den Einfluss dieser Messgrösse auf den Indikator Klima zurückzuführen sein, sind die grauen Emissionen des Gebäudeparks doch üblicherweise relativ hoch.

Abbildung 53 Resultat vs. Graue Emissionen des Gebäudeparks [g CO₂-äqu.]
links: nicht normiert; rechts: normiert (Einwohner + Arbeitsplätze)



Allerdings könnten die in Abbildung 53 zu beobachtenden Zusammenhänge auch durch den in Abbildung 54 zu beobachtenden Zusammenhang zwischen grauen Emissionen des Gebäudeparks und der Einwohnerdichte zu erklären sein. Möglich wäre auch eine Kombination aus direktem Einfluss und Korrelation mit dem Einfluss der Einwohnerdichte.

Abbildung 54 Einwohnerdichte vs. Graue Emissionen des Gebäudeparks [g CO₂-äqu.]
links: nicht normiert; rechts: normiert (Einwohner + Arbeitsplätze)



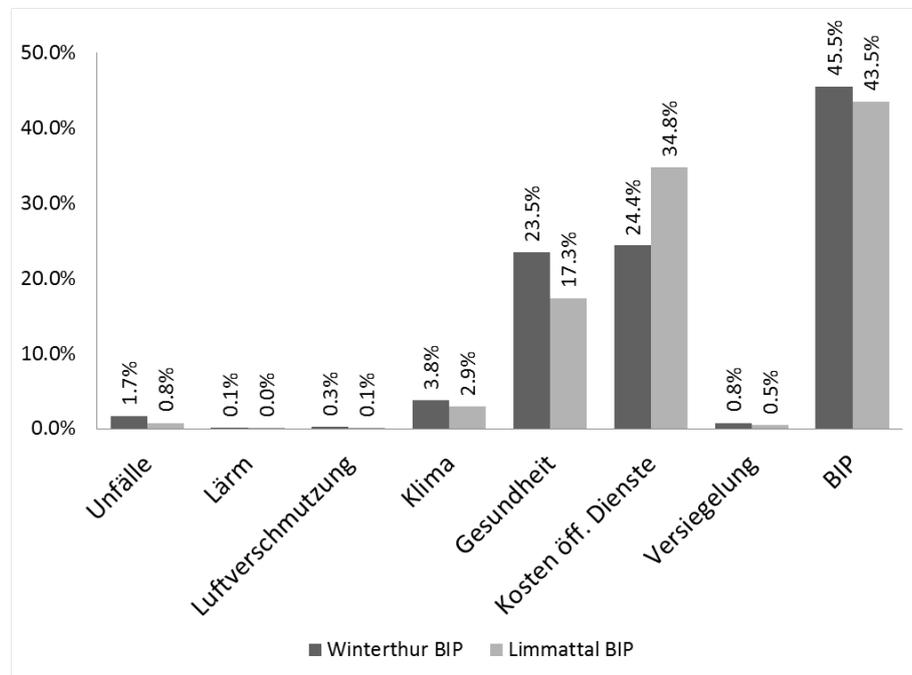
Die Auswertung der Zusammenhänge zwischen den Messgrößen für die gebaute Umwelt und dem Resultat der Nachhaltigkeitsbeurteilungen legt nahe, dass die Messgrößen Einwohnerdichte und Strassendichte einen dominanten und die Distanz zum nächsten Stadtzentrum einen ebenfalls wichtigen Einfluss auf das Resultat ausüben. Um diese Vermutungen zu stützen wären allerdings sowohl weitere Nachhaltigkeitsbeurteilungen als auch vertiefte Analysen durchzuführen.

8.4.3 Einfluss der Berücksichtigung des Bruttoinlandproduktes

Sämtliche bisher besprochenen Ergebnisse entstammen Beurteilungen, bei denen das BIP nicht berücksichtigt wurde. Dies einerseits, da der Einbezug des BIP bei der Beurteilung kleiner geographischer Einheiten wie Verkehrszonen kaum sinnvoll sein dürfte, andererseits aber auch, weil sich bei verschiedenen Probebeurteilungen gezeigt hat, dass das BIP das Resultat der Beurteilung stark dominiert.

Abbildung 55 zeigt die Anteile der einzelnen diskontierten Kosten und Nutzen am Resultat der Nachhaltigkeitsbeurteilung bei Berücksichtigung des BIP. Wie bereits erwähnt übt das BIP einen sehr starken Einfluss auf das Resultat aus, der Einfluss der übrigen Elemente fällt ungefähr proportional kleiner gegenüber Abbildung 36 aus.

Abbildung 55 Anteile der einzelnen diskontierten Kosten und Nutzen am Resultat der Nachhaltigkeitsbeurteilung in Prozent mit BIP

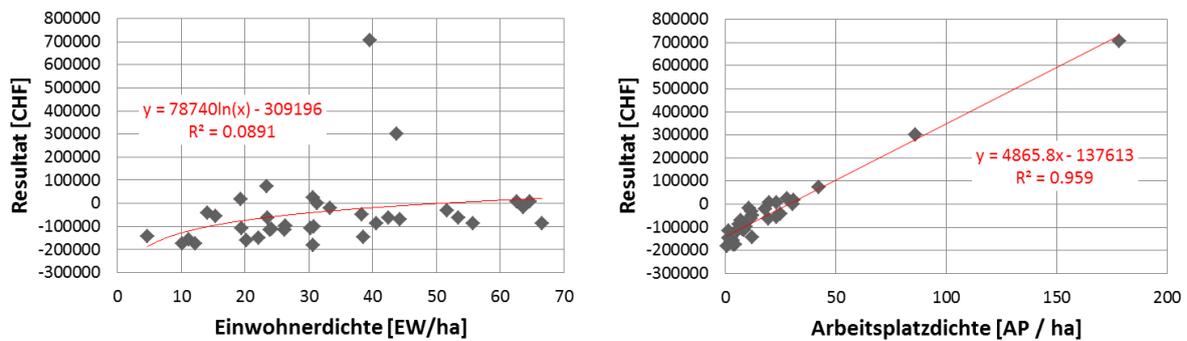


Berechnung analog Abbildung 37; Diskontsatz 2%, Betrachtungszeitraum 50 Jahre

Version *Multiple*, Stadt Winterthur / Gemeinden Schlieren und Dietikon, Beurteilung der Verkehrszonen, BIP berücksichtigt

Wie Tabelle 31 zeigt, fließt nur eine einzige Messgrösse für die gebaute Umwelt in die Bestimmung des Wertes für den Indikator BIP ein, nämlich die Arbeitsplatzdichte. Entsprechend stark ausgeprägt ist die Korrelation zwischen der Arbeitsplatzdichte und dem Beurteilungsergebnis bei Berücksichtigung des BIP, wie Abbildung 56 zeigt. Die ebenfalls dargestellte Korrelation zwischen Einwohnerdichte und Ergebnis ist im Gegensatz zur Beurteilung ohne Berücksichtigung des BIP (siehe Abbildung 40) nur sehr schwach ausgeprägt.

Abbildung 56 Resultat vs. Einwohnerdichte [EW / ha], bezogen auf entw. Fläche (links)
Resultat vs. Arbeitsplatzdichte [AP / ha], bezogen auf entw. Fläche (rechts),
bei Berücksichtigung des BIP



Es ist ebenfalls anzumerken, dass die absoluten Werte des Resultats stark von den Werten ohne Berücksichtigung des BIP abweichen.

Die Berücksichtigung des BIP hat starke Auswirkungen auf die Ergebnisse einer Nachhaltigkeitsbeurteilung. Exemplarisch sind in Abbildung 57 und Abbildung 58 die Äquivalente zu Abbildung 23 und Abbildung 25 mit Berücksichtigung des BIP dargestellt. Die beiden Abbildungen werden jeweils in verkleinerter Form in Abbildung 59 und Abbildung 60 verglichen. Es zeigt sich, dass bei Berücksichtigung des BIP eine wesentlich andere Rangfolge entsteht. Allerdings ist auch anzumerken, dass die meisten ohne Berücksichtigung des BIP sehr gut oder sehr schlecht beurteilten Gebiete auch mit Berücksichtigung des BIP zumindest zu den eher gut oder eher schlecht bewerteten Gebieten zählen.

Abbildung 59 und Abbildung 60 zeigen jeweils zwei Karten, die eigentlich nicht direkt vergleichbar sind. Die Maxima und Minima der Beurteilungsergebnisse weisen grosse Unterschiede auf, d.h. ein Gebiet, welches auf der einen Karte dem 1., auf der anderen Karte dem 2. Quantil angehört, könnte theoretisch denselben absoluten Wert für das Beurteilungsergebnis aufweisen. Mit dem Vergleich sollen hier vor allem Abweichungen in der relativen Rangfolge der Gebiete verdeutlicht werden, nicht Abweichungen der absoluten Werte.

Abbildung 57 Graphische Auswertung der Nachhaltigkeitsbeurteilung der Verkehrszonen in Winterthur; Verwendung von 8 Quantilen; mit BIP

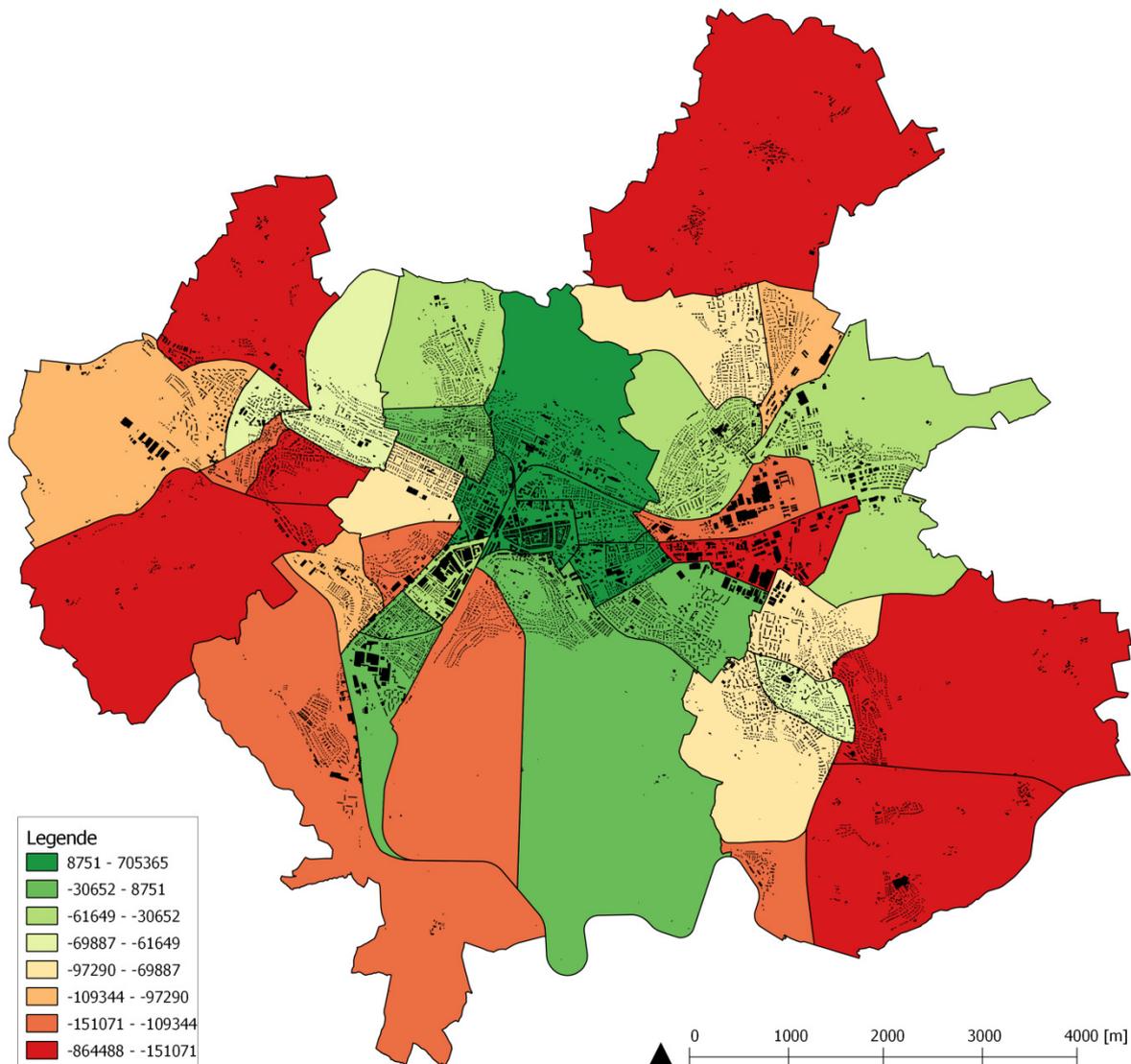


Abbildung 58 Graphische Auswertung der Nachhaltigkeitsbeurteilung der Verkehrszonen in Schlieren und Dietikon; Verwendung von 9 Quantilen; mit BIP

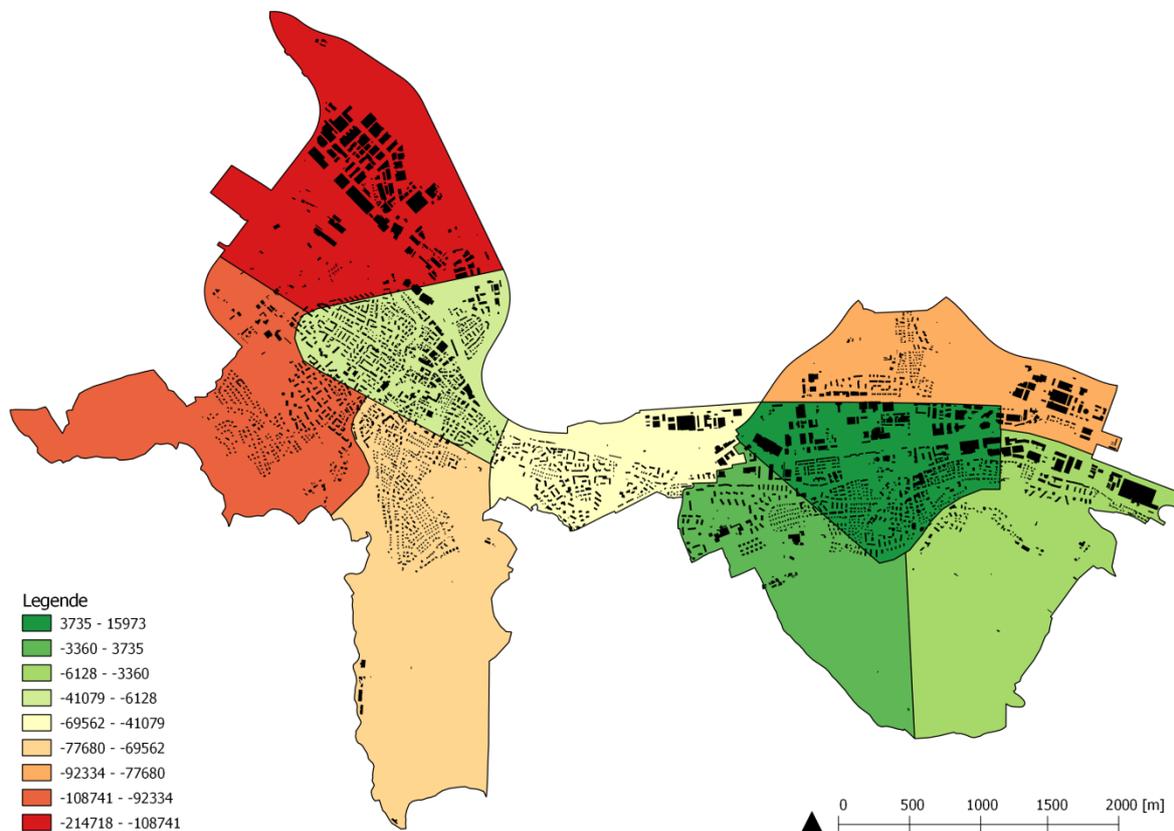


Abbildung 59 Vergleich von Abbildung 23 (links, ohne BIP) und Abbildung 57 (rechts, mit BIP)

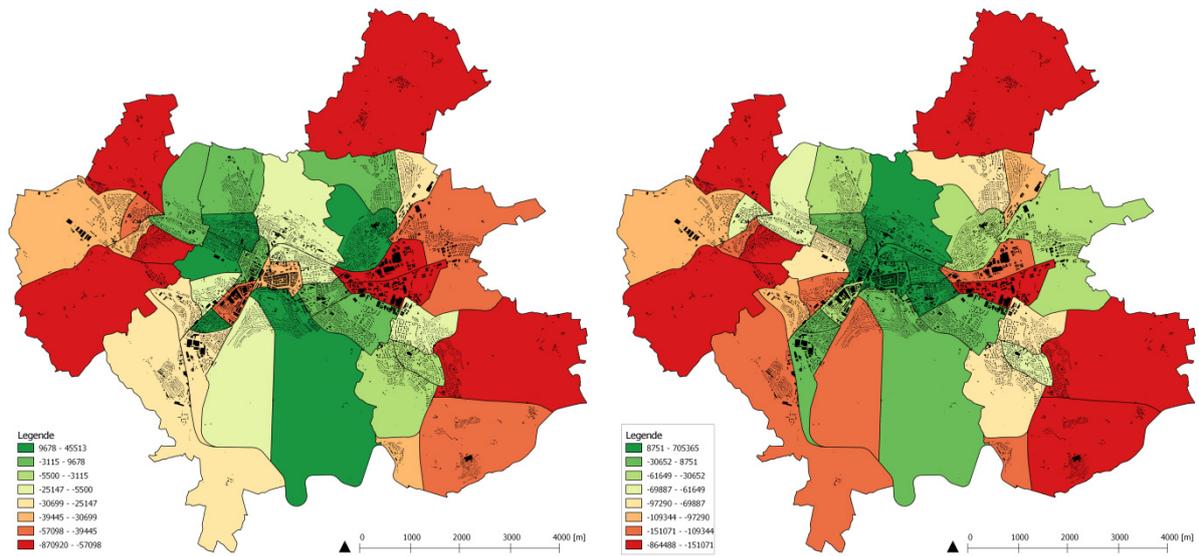
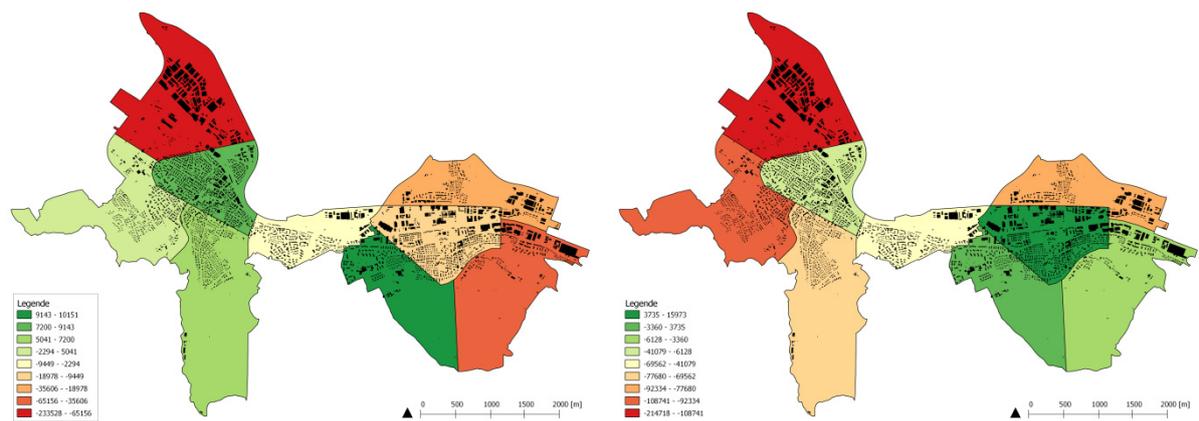


Abbildung 60 Vergleich von Abbildung 25 (links, ohne BIP) und Abbildung 58 (rechts, mit BIP)



9 Bewertung und Ausblick

9.1 Schlussfolgerungen

Das Hauptziel dieser Arbeit, die Entwicklung eines quantitativen Nachhaltigkeitsindex zur Beurteilung von städtischen Entwicklungen aufgrund einer breiten Literaturanalyse, wurde erreicht. Das erarbeitete Modell wurde zudem in Programmcode umgesetzt und exemplarisch auf zwei verschiedene Gebiete im Kanton Zürich und Simulationsergebnisse des Projektes *SustainCity* angewandt.

Das Herzstück der Arbeit, das Modell zur Beurteilung der Nachhaltigkeit von städtischen Entwicklungen, verbindet Erkenntnisse aus zahlreichen Forschungsgebieten, welche nach Wissen des Autors bisher nicht in solch einer Art und Weise verbunden worden sind. Das Modell erlaubt es, verschiedene Zustände oder Gebiete aufgrund von Daten zur gebauten Umwelt hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit zu vergleichen. Die generierten Daten konnten nicht in aller Konsequenz analysiert werden, scheinen aber auf die Plausibilität des Modells hinzuweisen.

Nicht erreicht wurde das Ziel, den Gebrauchswert einer Umgebung aufgrund von Daten zur gebauten Umwelt zu bewerten und in das Modell einzubauen und dadurch sogenannte „weiche Faktoren“ zumindest indirekt im Modell abzubilden. Aus diesem Grund konnte auch nicht aufgezeigt werden, welche Daten die Software *UrbanSim* in Zukunft zusätzlich generieren sollte, um den Gebrauchswert adäquat ermitteln zu können.

Die Verbindung der verschiedenen Themen im Beurteilungsmodell bedingt die Verwendung zahlreicher Annahmen und die Verwendung von monetären Werten für teilweise nur beschränkt monetär beschreibbare Auswirkungen der gebauten Umwelt sowie das Weglassen verschiedener Wirkungen, für die keine quantitativen Zusammenhänge bekannt sind. Entsprechend lang ist die Liste möglicher Verbesserungen und Ergänzungen im folgenden Kapitel. Deren Umsetzung war im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich, bieten viele der aufgeführten Themen doch genügend Stoff für eigene Arbeiten erheblichen Umfangs.

9.2 Zukünftige Forschung

Zahlreiche Ausbau- und Verbesserungsmöglichkeiten für das entwickelte Modell zur Beurteilung der Nachhaltigkeit bieten sich an.

9.2.1 Absolute Grenzwerte für die Beurteilung der Nachhaltigkeit

Wie mehrfach erwähnt (siehe u.a. Kapitel 3.1.4), wäre es eigentlich notwendig, biophysikalische Grenzwerte für die Nutzung natürlichen Kapitals zu ermitteln und auf Grenzwerte für menschliche Aktivitäten oder konkret z.B. auf die für die gebaute Umwelt verwendeten Ressourcen zu übertragen. Dies würde es erlauben, die Nachhaltigkeit nicht nur relativ zu beurteilen, sondern auch absolute Aussagen zur Tragfähigkeit zu machen. Entsprechende Ansätze gibt es in der Schweiz z.B. in Form der Konzepte der 2000-Watt-Gesellschaft und der 1-Tonne-CO₂-Gesellschaft. Eine Ableitung von Grenzwerten für die gebaute Umwelt könnte z.B. analog der Ermittlung von Zielwerten für Gebäude in SIA (2011b) geschehen.

9.2.2 Messgrössen für die gebaute Umwelt

Die verwendeten Messgrössen für die gebaute Umwelt sind relativ trivial. Es gibt Studien, welche wesentlich komplexere Messgrössen verwenden (z.B. die durch Faktoranalyse ermittelten Faktoren von Cervero und Kockelman (1997), siehe Kapitel 4.1.2, oder der räumliche Index von Lieske et al. (2012), siehe Kapitel 4.3.2). Es wäre zu untersuchen, inwiefern solche Messgrössen den Einfluss der gebauten Umwelt genauer abbilden können. In dieser Arbeit wurde ihre Verwendung vor allem deshalb nicht in Betracht gezogen, weil dadurch die direkte Vergleichbarkeit mit anderen Studien und die Ableitung von Durchschnittselastizitäten verunmöglicht worden wäre.

9.2.3 Einfluss der gebauten Umwelt auf das Verkehrsverhalten

Wie in Kapitel 4.1.2 erwähnt sind die Zusammenhänge zwischen gebauter Umwelt und Verkehrsverhalten Gegenstand intensiver Forschung. Eine weitergehende Analyse der Literatur zu diesem Thema (siehe auch die Literaturhinweise in der kommentierten Bibliographie, Kapitel 11.2.3) könnte möglicherweise die Wirkungszusammenhänge eindeutiger klären. Insbesondere das Problem der Selbstselektion führt zu grossen Unsicherheiten, was die Gültigkeit der verwendeten Elastizitäten betrifft. Zudem sind nur vergleichsweise wenige Studien zum Thema mit europäischem Kontext vorhanden. Aufgrund der unterschiedlichen Dichte und Raumstruktur in den USA wäre es wichtig, die Übertragbarkeit der Ergebnisse amerikanischer Studien zu überprüfen und gegebenenfalls nur europäische Studien zu berücksichtigen.

Interessant wäre auch eine Auswertung der erwähnten Ergebnisse von Holz-Rau (2012) und analog des Mikrozensus Schweiz 2010 hinsichtlich der räumlichen Verteilung der gefahrenen Distanzen im Fernverkehr.

9.2.4 Kosten zur Aktivierung der Elastizitäten

Die Kosten zur Aktivierung von Elastizitäten spielen für die Praktikabilität der Nutzung dieser Elastizitäten zur Beeinflussung der Nachhaltigkeit von Entwicklungen eine zentrale Rolle. Generell sollte die Beurteilung so ausgebaut werden, dass nicht nur die nachhaltigkeitsrelevanten Auswirkungen monetär erfasst werden, sondern zusätzlich auch die Kosten der Entwicklung selbst. Dies würde eine umfassendere Beurteilung erlauben. Eine zusätzliche wünschbare Erweiterung wäre auch die Erfassung der Nutzen einer Entwicklung (z.B. auch des Verkehrs), so dass die Beurteilung zu einer Art Kosten-Nutzen-Analyse ausgebaut werden könnte.

9.2.5 Gebrauchswert

Die Ermittlung eines Gebrauchswert-Index wie in Kapitel 4.8 vorgeschlagen (z.B. anhand der Arbeit von Lynch (1981) und / oder Arbeiten zur Wohnstandortwahl) wäre eine äusserst wertvolle Erweiterung des Modells, würde auf diese Art und Weise doch eine ganze Reihe häufig in der Literatur genannter, wichtiger Faktoren abgedeckt, welche die Attraktivität einer Umgebung, die Erfüllung von Bedürfnissen, die „soziokulturelle Brauchbarkeit“ und die Langlebigkeit, Anpassungsfähigkeit und Wandlungsfähigkeit städtischer Strukturen betreffen.

9.2.6 Nicht berücksichtigte nachhaltigkeitsrelevante Faktoren

Zahlreiche Faktoren, die einen Einfluss auf die Nachhaltigkeit einer Stadt haben, wurden nicht berücksichtigt. Die Nichtberücksichtigung war teilweise bewusst gewählt, z.B. weil eine Thematik nur marginal von der gebauten Umwelt abhängig ist oder keine entsprechenden quantitativen Zusammenhänge in der Literatur gefunden wurden. In anderen Fällen war eine Berücksichtigung im Rahmen dieser Arbeit aus Zeitgründen nicht möglich. Folgende Themen wurden vernachlässigt, obschon sie entscheidend für die Nachhaltigkeit einer Stadt sind:

- Abfall
- Wasser
- Energieproduktion
- Institutionen
- Einbezug der Bevölkerung
- Soziale Gerechtigkeit
- Andere Infrastrukturen als Strassen

Eine künftige Berücksichtigung wäre wünschenswert.

9.2.7 Nicht berücksichtigte Auswirkungen

Verschiedene nachhaltigkeitsrelevante Auswirkungen von berücksichtigten Faktoren wurden vernachlässigt:

- Bei den gefahrenen Distanzen wurden nur die Auswirkungen des MIV berücksichtigt. Es ist unbestritten, dass auch der ÖV Emissionen und weitere externe Wirkungen verursacht, die zu berücksichtigen wären. Das Problem ist, dass Elastizitäten zum Verkehrsverhalten grösstenteils keine klaren Aussagen zur Entwicklung der gesamten gefahrenen Distanzen, sondern lediglich zu den gefahrenen Distanzen mit dem MIV erlauben.
- Die Zunahme des Verkehrs im Laufe der Zeit wurde im Modell vernachlässigt. Eine entsprechende Anpassung wäre wünschenswert.
- Bei der grauen Energie von Gebäuden und Infrastruktur wurden nur die daraus resultierenden grauen Emissionen berücksichtigt. Es gälte, die Auswirkungen genauer zu untersuchen und gegebenenfalls das Modell anzupassen. Beispielsweise ist davon auszugehen, dass die graue Energie auch zu Lärm, Luftverschmutzung, Abfall usw. führt. Dasselbe gilt auch für den betrieblichen Energieverbrauch von Gebäuden.

9.2.8 Modell

Verbesserung der Berechnungen

Es sind zahlreiche Möglichkeiten zur Erweiterung und Verbesserung der im Modell vorgenommenen Berechnungen denk- und wünschbar:

- Die Berechnung der grauen Energie von Gebäuden könnte zusätzlich an Nutzungen (mindestens Wohnen und Nicht-Wohnen) gebunden werden. Dazu müssten Daten zum Gebäudepark des Kantons Zürich oder vergleichbarer Gebiete darauf hin analysiert werden, wie stark verglast im Durchschnitt ein Gebäude mit einer bestimmten Nutzung ist, welche Konstruktionsweisen für bestimmte Bauteile bei bestimmten Nutzungen zu welchem Anteil verwendet werden usw. Neben der Nutzung wäre eine ähnliche Anwendung auch für das Baujahr eines Gebäudes denkbar.
- Die bei der Berechnung der grauen Energie von Gebäuden benötigte Geschosshöhe könnte ebenfalls in Abhängigkeit von Nutzung und / oder Baujahr ermittelt werden.
- Bei der Berechnung der grauen Energie von Gebäuden könnte der Einfluss der Anzahl Geschosse stärker berücksichtigt werden, da wie in Kapitel 4.5.2 erläutert wahrscheinlich ein nicht linearer Zusammenhang besteht und ab 7 bis 11 Geschossen die graue Energie pro Geschossfläche wesentlich höher ist als bei Gebäuden mit weniger Geschossen.
- Bei der Berechnung des betrieblichen Energieverbrauchs von Gebäuden könnten neben der Nutzung auch Hüllzahl und Konstruktionsart eines Gebäudes berücksichtigt werden. Entsprechende Parameter müssten wie bei der grauen Energie aus einer Analyse von Daten zum Gebäudepark abgeleitet werden.

- Bei der Bestimmung der gefahrenen Fahrzeugkilometer für den Referenzzustand könnten Korrekturfaktoren aus dem SIA-Merkblatt 2039 (SIA, 2011a) verwendet werden, um den schweizerischen Durchschnittswert den lokalen Gegebenheiten anzupassen.

Verbesserung der Normierung

- Die graue Energie von Gebäuden könnte nach Wohnnutzung und Nicht-Wohnnutzung getrennt erfasst werden, damit sie entsprechend genauer normieren zu können (Anz. EW, Anz. AP).
- Parzellen könnten ebenfalls anteilmässig Nutzungen zugeordnet werden, um eine genauere Normierung zu ermöglichen.

9.2.9 Umsetzung in Programmcode / GIS

Verteilungen statt direkte Ermittlung von Messgrössen

Es wäre möglich, die Messgrössen für die gebaute Umwelt nicht direkt über die innerhalb eines Gebiets liegenden Objekte, sondern als Verteilung zu erfassen. Diese Verteilungsrasterkarten könnten dann für Abfragen von Werten einer Messgrösse an einer bestimmten Position verwendet werden. Auf diese Art und Weise könnten auch Werte für Objekte wie Gebäude oder Parzellen ermittelt werden, wie dies bei der direkten Erfassung möglich ist.

Durch die Erfassung der Messwerte als Verteilung könnten Randeffekte vermieden werden. Diese können beispielsweise bei Untersuchungsgebieten auftreten, deren Rand nahe an einem sehr dichten Gebiet liegt. Diese Dichte würde bei einer Verteilung erfasst, bei der direkten Ermittlung wird sie – da sie ausserhalb des Untersuchungsgebiets liegt – nicht berücksichtigt.

Zudem würde eine Erfassung der Messgrössen als Verteilung auch eine Anwendung der Beurteilungswerkzeuge auf Parzellen erlauben. Bei der direkten Erfassung bestehen dabei einige praktische Hindernisse (siehe unten).

Eine Erweiterung dieses Ansatzes wäre der Versuch, eine Art Nachhaltigkeits-Verteilung zu ermitteln. Als Inspiration könnte dazu der *Neighborhood Visualizer* von David Quinn dienen (<http://urbmet.org/>).

Anwendung auf Parzellen

Wenn die Messgrössen für die gebaute Umwelt als Verteilung vorlägen, könnte auch eine Anwendung der Beurteilungstools auf Parzellen sinnvoll werden. Im gegenwärtigen Zustand gibt es verschiedene Hindernisse, welche eine Anwendung auf Parzellen nicht erlauben. So

macht z.B. die Berechnung der Entropie für eine einzelne Parzelle keinen Sinn und führt bei der Umsetzung auch zu Fehlern. Ein weiteres Beispiel sind Parzellen ohne Gebäude, welche ebenfalls zu Fehlern führen (die Tools sind nicht darauf ausgerichtet, Gebiete ohne Gebäude zu beurteilen, da in einem solchen Fall kaum von *gebauter Umwelt* gesprochen werden kann).

Die Anwendung der Beurteilung auf Parzellen bei Verwendung von Messgrössen in Form von Verteilungen, z.B. als Rasterkarten, könnte eine Alternative zur oben erwähnten Möglichkeit einer Art Nachhaltigkeits-Verteilung als generiertes Resultat sein. Sollte es allerdings möglich sein, eine solche Verteilung zu ermitteln, wäre dies vermutlich vorzuziehen. Eine Nachhaltigkeits-Verteilung würde auch die Ermittlung von Beurteilungswerten für Parzellen gestatten, ohne allerdings auf diese angewiesen zu sein.

Modulartiger Aufbau des Codes

Der Code könnte wesentlich modulartiger aufgebaut werden, mit vielen auch alleine funktionierenden Einzeltools, auf die innerhalb eines „Haupttools“ zugegriffen wird.

Fehlermeldungen und Programmabbrüche

Fehler, falsche und unvollständige Eingaben o.ä. werden nur durch die aufgerufenen GRASS-Funktionen sowie durch Python abgefangen. Vieles könnte innerhalb des Tools kontrolliert und durch Fehlermeldungen und Abbruchsanweisungen abgefangen werden.

9.3 Möglichkeiten und Trends in der Planung

Die quantitative Beurteilung der Nachhaltigkeit anhand von Daten zur gebauten Umwelt ist eine bedeutsame Aufgabe und weist ein grosses Potenzial für Entscheidungsfindung und Analysen in Planung und Politik auf. Insbesondere die Koppelung entsprechender quantitativer Beurteilungswerkzeuge mit Tools zur Simulation der Entwicklung der gebauten Umwelt aufgrund bestimmter Randbedingungen birgt die Chance, in Zukunft wesentlich umfassendere Informationen und Daten zu den Auswirkungen von planerischen Entscheidungen (welche die angesprochenen Randbedingungen definieren) als heute generieren zu können. Die Integration von GIS-Systemen in die Planung ist heute vielerorts Standard, die Verfügbarkeit von Grundlagendaten für Simulationswerkzeuge dürfte also gegeben sein.

Wie in dieser Arbeit teilweise gezeigt wurde, können die Geometrien von Objekten einen wesentlichen Einfluss auf eine Nachhaltigkeitsbeurteilung ausüben. Zu denken ist dabei beispielsweise an die Stockwerkshöhe und Hüllzahl (d.h. insb. Abmessungen und Form) von

Gebäuden, die versiegelte Fläche (deren Erfassung auf Parzellenebene nur eine grobe Annäherung darstellt) oder die Strassenoberfläche. Auch die Weiterentwicklung von Systemen, z.B. repräsentiert durch neu erstellte ÖV-Haltestellen, hat einen wichtigen Einfluss auf ein Beurteilungsergebnis. Ein Werkzeug zur Simulation der Entwicklung der gebauten Umwelt sollte also in der Lage sein, neue Objekte auch geometrisch zu erstellen und Systeme weiterzuentwickeln. Dadurch könnten z.B. bei der Simulation einer wachsenden Stadt die Auswirkungen der neu erstellten und ersetzten Gebäude, der Veränderung des Strassennetzes und des ÖV-Angebots vollständig erfasst werden.

Es sind aktuell Trends in diese Richtung zu beobachten. Verschiedene Werkzeuge wie beispielsweise UrbanVision (<http://www.urbansim.org/Documentation/UrbanVision>) und City-Engine (<http://www.esri.com/software/cityengine>) sind in der Lage, Geometrien zumindest von Gebäuden aufgrund gewisser Regeln zu erstellen. Die entsprechenden Resultate sehen zumindest auf den ersten Blick sehr überzeugend aus. Eine Aufnahme dieser Trends im Projekt *SustainCity* wäre aufgrund der genannten Chancen, welche die Möglichkeit der Erstellung von Geometrien bietet, sicher wünschenswert.

10 Literatur

- Appleyard, D., M.S. Gerson und M. Lintell (1981) *Livable Streets*, University of California Press, Berkeley.
- ARE (2000) Hohe Infrastrukturkosten durch die Zersiedelung, *Dossier*, **4/00**, Bundesamt für Raumentwicklung, Bern.
- ARE (2012) Kapitalstockmodell,
<http://www.are.admin.ch/themen/nachhaltig/00260/02008/index.html?lang=de>,
Bundesamt für Raumentwicklung, Bern, April 2012.
- Baccini, P. (1997) A city's metabolism: Towards the sustainable development of urban systems, *Journal of Urban Technology*, **4** (2) 27-39.
- BAFU (2008) Wie viel CO₂ entsteht mit dem Verbrauch von einer Kilowattstunde Strom in der Schweiz?, Bundesamt für Umwelt, Bern.
- BAFU (2010) Luftschadstoff-Emissionen des Strassenverkehrs 1990–2035: Aktualisierung 2010, *Umwelt-Wissen*, **1021**, Bundesamt für Umwelt, Bern.
- BAFU (2011) CO₂-Emissionsfaktoren des Schweizerischen Treibhausgasinventars: Stand Oktober 2011, Bundesamt für Umwelt, Bern.
- Bentley, I., A. Alcock, P. Murrain, S. McGlynn und G. Smith (1985) *Responsive Environments: A Manual for Designers*, Architectural Press, London.
- Bento, A.M., M.L. Cropper, A.M. Mobarak und K. Vinha (2005) The effects of urban spatial structure on travel demand in the United States, *Review of Economics and Statistics*, **87** (3) 466-478.
- Bergsdal, H., H. Brattebo, R.A. Bohne und D.B. Mueller (2007) Dynamic material flow analysis for Norway's dwelling stock, *Building Research and Information*, **35** (5) 557-570.
- Beyond Green (2008) Sustainability in the Naas Road Gateway, Issues and opportunities, Beyond Green, London.
- BFS (2006) Szenarien zur Bevölkerungsentwicklung der Schweiz 2005-2050, Bundesamt für Statistik, Neuchâtel.
- BFS (2012a) Bevölkerungsstand und -struktur – Indikatoren: Übersicht,
<http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/01/02/blank/key/bevoelkerungsst and.html>, Bundesamt für Statistik, Neuchâtel, Mai 2012.
- BFS (2012b) Bruttoninlandprodukt pro Einwohner, *Excel-Tabelle*, **T 4.2.18**, Bundesamt für Statistik, Neuchâtel.

- BFS (2012c) Entwicklung der Nominallohne, der Konsumentenpreise und der Reallöhne, Schweiz 1990-2011, http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/03/04/blank/key/lohnentwicklung/nominal_und_real.html, Bundesamt für Statistik, Neuchâtel, Juni 2012.
- BFS (2012d) Erwerbstätigkeit und Arbeitszeit – Indikatoren: Beschäftigte - Sektor und Geschlecht, http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/03/02/blank/key/beschaeftigte/nach_sektor_und_geschlecht.html, Bundesamt für Statistik, Neuchâtel, Mai 2012.
- BFS und ARE (2012) Mobilität in der Schweiz: Ergebnisse des Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2010, *Statistik der Schweiz: 11 Mobilität und Verkehr, 840-1000*, Bundesamt für Statistik, Bundesamt für Raumentwicklung, Neuchâtel und Bern.
- Bhat, C.R. und N. Eluru (2009) A copula-based approach to accommodate residential self-selection effects in travel behavior modeling, *Transportation Research Part B-Methodological*, **43** (7) 749-765.
- Billing, K. (2004) Ökonomische Bewertung von Flächennutzungskonkurrenzen in der nachhaltigen Stadt, Theoretische Grundlagen und praktische Vorgehensweise, *Studien zur Stadt- und Verkehrsplanung*, **4**, Verlag Dr. Kovač, Hamburg.
- Boarnet, M.G., M. Greenwald und T.E. McMillan (2008) Walking, urban design, and health - Toward a cost-benefit analysis framework, *Journal of Planning Education and Research*, **27** (3) 341-358.
- Boschmann, E.E. und M.P. Kwan (2008) Toward socially sustainable urban transportation: Progress and potentials, *International Journal of Sustainable Transportation*, **2** (3) 138-157.
- Brownhill, D. und S. Rao (2002) *A Sustainability Checklist for Developments: A Common Framework for Developers and Local Authorities*, Construction Research Communications, Watford.
- Callenbach, E. (1975) *Ecotopia: The Notebooks and Reports of William Weston*, Banyan Tree Books, Berkeley.
- Cao, X.Y. (2010) Exploring causal effects of neighborhood type on walking behavior using stratification on the propensity score, *Environment and Planning A*, **42** (2) 487-504.
- Cao, X.Y., P.L. Mokhtarian und S.L. Handy (2009a) Examining the impacts of residential self-selection on travel behaviour: A focus on empirical findings, *Transport Reviews*, **29** (3) 359-395.
- Cao, X.Y., Z. Xu und Y. Fan (2009b) Exploring the connections among residential location, self-selection, and driving behavior: A case study of Raleigh, NC, Conference Paper, *89th annual meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C., Januar 2009.
- Carruthers, J.I. und G.F. Ulfarsson (2008) Does 'smart growth' matter to public finance?, *Urban Studies*, **45** (9) 1791-1823.

- Cervero, R. (1996) Mixed land-uses and commuting: Evidence from the American housing survey, *Transportation Research Part A-Policy and Practice*, **30** (5) 361-377.
- Cervero, R. (2001) Efficient urbanisation: Economic performance and the shape of the metropolis, *Urban Studies*, **38** (10) 1651-1671.
- Cervero, R. und K. Kockelman (1997) Travel demand and the 3Ds: Density, diversity, and design, *Transportation Research Part D-Transport and Environment*, **2** (3) 199-219.
- Ciccone, A. und R.E. Hall (1996) Productivity and the density of economic activity, *American Economic Review*, **86** (1) 54-70.
- Cohen, C., M. Lenzen und R. Schaeffer (2005) Energy requirements of households in Brazil, *Energy Policy*, **33** (4) 555-562.
- Crawford, R. (2011) *Life Cycle Assessment in the Built Environment*, Spon Press, London.
- Dantzig, G.B. (1963) *Linear programming and extensions*, Princeton University Press, Princeton.
- Day, K., M. Boarnet, M. Alfonzo und A. Forsyth (2006) The Irvine-Minnesota inventory to measure built environments: development, *American Journal of Preventive Medicine*, **30** (2) 144-152.
- Ecoplan (2000) Siedlungsentwicklung und Infrastrukturkosten, Schlussbericht, Bundesamt für Raumentwicklung, Bern.
- Edwards, M.M. und Y. Xiao (2009) Annexation, local government spending, and the complicating role of density, *Urban Affairs Review*, **45** (2) 147-165.
- Ewing, R. und R. Cervero (2001) Travel and the built environment - A synthesis, *Transportation Research Record*, **1780** 87-114.
- Ewing, R. und R. Cervero (2010) Travel and the built environment, *Journal of the American Planning Association*, **76** (3) 265-294.
- Fachstelle nachhaltiges Bauen (2010) Gebäudeparkmodell, Büro-, Schul- und Wohngebäude: Vorstudie zur Erreichbarkeit der Ziele der 2000-Watt-Gesellschaft für den Gebäudepark der Stadt Zürich, Schlussbericht, Stadt Zürich, Amt für Hochbauten, Zürich.
- Fallah, B.N., M.D. Partridge und M.R. Olfert (2011) Urban sprawl and productivity: Evidence from US metropolitan areas, *Papers in Regional Science*, **90** (3) 451-472.
- Frank, L.D. und P. Engelke (2005) Multiple impacts of the built environment on public health: Walkable places and the exposure to air pollution, *International Regional Science Review*, **28** (2) 193-216.
- Frank, L.D. und P.O. Engelke (2001) The built environment and human activity patterns: Exploring the impacts of urban form on public health, *Journal of Planning Literature*, **16** (2) 202-218.

- Frank, L.D., J.F. Sallis, B.E. Saelens, L. Leary, K. Cain, T.L. Conway und P.M. Hess (2010) The development of a walkability index: Application to the neighborhood quality of life study, *British Journal of Sports Medicine*, **44** (13) 924-933.
- Frischknecht, R. und M. Stucki (2009) Primärenergiefaktoren von Transportleistungen, Version 1.3, ESU-Services GmbH, Uster.
- GRASS Development Team (2012) Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software, Version 7.0, Subversion 51992-255, Open Source Geospatial Foundation, <http://grass.osgeo.org> Juni 2012.
- Guinée, J.B. (2002) Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards, *Eco-efficiency in industry and science*, **7**, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Handy, S.L. und K.J. Clifton (2001) Local shopping as a strategy for reducing automobile travel, *Transportation*, **28** (4) 317-346.
- Hecker, M. und M. Kunert (2004) Nutzungen, in Städtebau-Institut (Hrsg.) *Lehrbausteine Städtebau, Basiswissen für Entwurf und Planung*, Universität Stuttgart, Stuttgart.
- Holz-Rau, C. (2012) Abstract - Stadt der kurzen Wege und der weiten Reisen, Conference Paper, *Dortmunder Konferenz 2012 Raum- und Planungsforschung*, Dortmund, Februar 2012.
- Hortas-Rico, M. und A. Solé-Ollé (2010) Does urban sprawl increase the costs of providing local public services? Evidence from Spanish municipalities, *Urban Studies*, **47** (7) 1513-1540.
- Howard, E. (1902) *Garden Cities of To-Morrow*, S. Sonnenschein & Co., Ltd, London.
- INFRAS (2004) Die Nachhaltige Entwicklung in der Schweiz: Methodische Grundlagen, Direktion für Entwicklung und Zusammenarbeit, Bundesamt für Raumentwicklung, Bern.
- Janiszewski, P.M. und R. Ross (2009) The utility of physical activity in the management of global cardiometabolic risk, *Obesity (Silver Spring)*, **17 Suppl 3** S3-S14.
- Kämpf, R. und T. Dietzi (2006) Wertschöpfung im Kanton Zürich, Zürcher Kantonallbank, Zürich.
- Kenworthy, J.R. (2006) The eco-city: Ten key transport and planning dimensions for sustainable city development, *Environment and Urbanization*, **18** (1) 67-85.
- Klöpffer, W. und B. Grahl (2009) *Ökobilanz (LCA) : Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf*, WILEY-VCH Verlag, Weinheim.
- Krank, S. (2010) Assessing Urban Sustainable Development: Five Case Studies and a Blueprint for Developing Countries, *Dissertation*, **19353**, ETH Zürich, Zürich.
- Krizek, K.J. (2003) Residential relocation and changes in urban travel - Does neighborhood-scale urban form matter?, *Journal of the American Planning Association*, **69** (3) 265-281.

- Ladd, H.F. (1992) Population-growth, density and the costs of providing public services, *Urban Studies*, **29** (2) 273-295.
- Lalive d'Épinay, A. (2010) Wettbewerbskalkulation Wirtschaftlichkeit und ökologische Nachhaltigkeit, *Excel-Tabelle*, Stadt Zürich, Amt für Hochbauten, Zürich, http://www.stadt-zuerich.ch/content/dam/stzh/hbd/Deutsch/Hochbau/Weitere%20Dokumente/Nachhaltiges_Bauen/1_2000_Watt/2_Neubau/Kalk_WoeN_100202_Netz.xls, Mai 2012.
- Leccese, M., K. McCormick und Congress for the New Urbanism (Hg.) (2000) *Charter of the New Urbanism*, McGraw Hill, New York.
- Lenzen, M., R. Wood und B. Foran (2008) Direct versus Embodied Energy – The Need for Urban Lifestyle Transitions, in D. Peter (Hrsg.) *Urban Energy Transition, From Fossil Fuels to Renewable Power*, 91-120, Elsevier, Oxford.
- Lenzlinger, M. (2010) Tool Graue Energie zu SIA 2032, Version 1.2, *Excel-Tabelle*, energytools.ch, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, Zürich, http://www.energytools.ch/index.php?option=com_jdownloads&Itemid=9&view=viwdownload&catid=3&cid=4&lang=de, Mai 2012.
- Leon, A.S., J. Connett, D.R. Jacobs und R. Rauramaa (1987) Leisure-time physical-activity levels and risk of coronary heart-disease and death: the multiple risk factor intervention trial, *Journal of the American Medical Association*, **258** (17) 2388-2395.
- Lexikon der Nachhaltigkeit (2011) Ökobilanz: DIN Norm 33926, http://www.nachhaltigkeit.info/artikel/oekobilanz_din_norm_33926_1295.htm, Aachener Stiftung Kathy Beys, Aachen, Mai 2012.
- Lieske, S.N., D.M. McLeod, R.H. Coupal und S.K. Srivastava (2012) Determining the relationship between urban form and the costs of public services, *Environment and Planning B-Planning & Design*, **39** (1) 155-173.
- Lynch, K. (1960) *The Image of the City*, Technology Press etc., Cambridge.
- Lynch, K. (1981) *A Theory of Good City Form*, MIT Press, Cambridge und London.
- Melo, P.C., D.J. Graham und R.B. Noland (2009) A meta-analysis of estimates of urban agglomeration economies, *Regional Science and Urban Economics*, **39** (3) 332-342.
- Mokhtarian, P.L. und X.Y. Cao (2008) Examining the impacts of residential self-selection on travel behavior: A focus on methodologies, *Transportation Research Part B-Methodological*, **42** (3) 204-228.
- Mori, K. und A. Christodoulou (2012) Review of sustainability indices and indicators: Towards a new City Sustainability Index (CSI), *Environmental Impact Assessment Review*, **32** (1) 94-106.
- Morris, I. (2010) *Why the West Rules - For Now: The Patterns of History, and What They Reveal About the Future*, Farrar, Straus & Giroux, New York.

- Mrozek, J.R. und L.O. Taylor (2002) What determines the value of life? A meta-analysis, *Journal of Policy Analysis and Management*, **21** (2) 253-270.
- Munier, N. (2011) Methodology to select a set of urban sustainability indicators to measure the state of the city, and performance assessment, *Ecological Indicators*, **11** (5) 1020-1026.
- Næss, P. (2006) *Urban Structure Matters: Residential Location, car Dependence and Travel Behaviour*, Routledge, London.
- Newman, P.W.G. (1999) Sustainability and cities: Extending the metabolism model, *Landscape and Urban Planning*, **44** (4) 219-226.
- Newman, P.W.G. und J.R. Kenworthy (1989) *Cities and Automobile Dependence: An International Sourcebook*, Gower Technical, Aldershot.
- Newman, P.W.G. und J.R. Kenworthy (1996) The land use-transport connection - An overview, *Land Use Policy*, **13** (1) 1-22.
- Noda, H., H. Iso, H. Toyoshima, C. Date, A. Yamamoto, S. Kikuchi, A. Koizumi, T. Kondo, Y. Watanabe, Y. Wada, Y. Inaba, A. Tamakoshi und JACC Study Group (2005) Walking and sports participation and mortality from coronary heart disease and stroke, *J Am Coll Cardiol*, **46** (9) 1761-1767.
- Oja, P., V. Ilkka und P. Olavi (1998) Daily walking and cycling to work: their utility as health-enhancing physical activity, *Patient Education and Counseling*, **33** (Supplement 1) S87-S94.
- Oswald, F., P. Baccini und M. Michaeli (2003) *Netzstadt Einführung in das Stadtentwerfen*, Birkhäuser, Basel.
- Pachauri, S. (2004) An analysis of cross-sectional variations in total household energy requirements in India using micro survey data, *Energy Policy*, **32** (15) 1723-1735.
- Proost, S. (in Vorbereitung) Evaluation of policies,
- Prud'homme, R. und C.W. Lee (1999) Size, sprawl, speed and the efficiency of cities, *Urban Studies*, **36** (11) 1849-1858.
- Python Software Foundation (2012) Python Programming Language – Official Website, <http://www.python.org/>, Juni 2012.
- Quantum GIS Development Team (2012) Quantum GIS Geographic Information System, Version 1.7.4, Open Source Geospatial Foundation Project, <http://qgis.osgeo.org>, Juni 2012.
- Quinn, D.J. und J.E. Fernandez (2010) Estimating material usage of road infrastructure in US cities, Conference Paper, *Fourth National Conference of IBPSA-USA*, New York, August 2010.
- Quinn, D.J. und J.E. Fernandez (2011) Standardized analysis of urban form, Conference Paper, *Ieee International Symposium on Sustainable Systems and Technology (Issst)*, Chicago, Mai 2011.

- Quinn, D.J., D. Wiesmann und J.J. Sarralde (2011) Estimating resource consumption using urban typologies, Conference Paper, *CISBAT*, Lausanne, September 2011.
- Rickwood, P., G. Glazebrook und G. Searle (2008) Urban structure and energy - A review, *Urban Policy and Research*, **26** (1) 57-81.
- Rogers, R. und P. Gumuchdjan (1997) *Cities for a Small Planet*, Faber and Faber, London.
- Salon, D. (2006) Cars and the City: An Investigation of Transportation and Residential Location Choices in New York City, *Dissertation*, University of California, Davis.
- Schiller, G. (2007) Urban infrastructure: Challenges for resource efficiency in the building stock, *Building Research and Information*, **35** (4) 399-411.
- Schirmer, P., B.C. Belart und K.W. Axhausen (2011) Location choice in the greater Zurich Area – an intermediate report, Conference Paper, *11th Swiss Transport Research Conference*, Ascona, Mai 2011.
- Schirmer, P., C. Zöllig, K. Müller, B.R. Bodenmann und K.W. Axhausen (2011) The Zurich case study of UrbanSim, Conference Paper, *51st European Congress of the Regional Science Association International*, Barcelona, September 2011.
- Shannon, C.E. und W. Weaver (1949) *The mathematical theory of communication*, University of Illinois Press, Urbana.
- SIA (2004) SNARC: Systematik zur Beurteilung der Nachhaltigkeit von Architekturprojekten für den Bereich Umwelt, *Dokumentation*, **D 0200**, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, Zürich.
- SIA (2009) Thermische Energie im Hochbau, *Norm*, **380/1**, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, Zürich.
- SIA (2010) Graue Energie von Gebäuden, *Merkblatt*, **2032**, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, Zürich.
- SIA (2011a) Mobilität - Energiebedarf in Abhängigkeit vom Gebäudestandort, *Merkblatt*, **2039**, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, Zürich.
- SIA (2011b) SIA-Effizienzpfad Energie, *Merkblatt*, **2040**, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, Zürich.
- SIA (2011c) SIA-Effizienzpfad Energie: Ergänzungen und Fallbeispiele zum Merkblatt SIA 2040, *Dokumentation*, **D 0236**, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, Zürich.
- Spielmann, M., C. Bauer, R. Dones und M. Tuchschnid (2007) Transport Services: Data v2.0 (2007), *ecoinvent report*, **No. 14**, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf.
- Statistisches Amt (2012a) Gemeindeporträts/-datenbank, http://www.statistik.zh.ch/internet/justiz_inneres/statistik/de/statistiken/daten/gemeindeportraet.html, Kanton Zürich, Direktion der Justiz und des Innern, Zürich, Mai 2012.

- Statistisches Amt (2012b) Häufig gestellte Fragen (FAQ), http://www.statistik.zh.ch/internet/justiz_innere/statistik/de/aktuell/faq.html, Kanton Zürich, Direktion der Justiz und des Innern, Zürich, Mai 2012.
- Su, Q. (2011) The effect of population density, road network density, and congestion on household gasoline consumption in US urban areas, *Energy Economics*, **33** (3) 445-452.
- Tanguay, G.A., J. Rajaonson, J.F. Lefebvre und P. Lanoie (2010) Measuring the sustainability of cities: An analysis of the use of local indicators, *Ecological Indicators*, **10** (2) 407-418.
- Tuchs Schmid, M. (2010) Umweltdaten & Emissionsfaktoren von mobitool: Treibhauspotential, *Excel-Tabelle*, mobitool.ch, http://www.mobitool.ch/typo/fileadmin/Aktualisierung_v1.1/Umweltdaten_Emissionsfaktoren_mobitool_v1.1.xls, Mai 2012.
- U.S. Environmental Protection Agency (2000) Guidelines for preparing economics analyses, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- UN (2008) *World Urbanization Prospects, The 2007 Revision*, United Nations, New York.
- VSS (2006a) Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr: Diskontsatz, *Schweizer Norm*, **641821**, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS, Zürich.
- VSS (2006b) Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr: Grundnorm, *Schweizer Norm*, **641820**, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS, Zürich.
- VSS (2009) Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr: Externe Kosten, *Schweizer Norm*, **641828**, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS, Zürich.
- VSS (2010) Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr: Unfallraten und Unfallkostensätze, *Schweizer Norm*, **641824**, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS, Zürich.
- Wallbaum, H., S. Krank und R. Teloh (2011) Prioritizing sustainability criteria in urban planning processes: Methodology application, *Journal of Urban Planning and Development - ASCE*, **137** (1) 20-28.
- Washburn, R.A., L.L. Adams und G.T. Haile (1987) Physical activity assessment for epidemiologic research: The utility of two simplified approaches, *Preventive Medicine*, **16** (5) 636-646.
- Weis, C. und K.W. Axhausen (2009) Induced travel demand: Evidence from a pseudo panel data based structural equations model, *Research in Transportation Economics*, **25** (1) 8-18.
- Weisz, H. und J.K. Steinberger (2010) Reducing energy and material flows in cities, *Current Opinion in Environmental Sustainability*, **2** (3) 185-192.
- World Commission on Environment and Development (WCED) (1987) *Our Common Future*, Oxford University Press, Oxford.

Zhou, B. und K.M. Kockelman (2008) Self-Selection in home choice: Use of treatment effects in evaluating relationship between built environment and travel behavior, *Transportation Research Record*, (2077) 54-61.

11 Kommentierte Bibliographie

Diese Bibliographie stellt in keiner Weise den Anspruch auf Vollständigkeit. Vielmehr sollen hier Werke vorgestellt werden, die während der Arbeit am vorliegenden Text ins Blickfeld rückten, aber keinen unmittelbaren Eingang in den Text gefunden haben. Die Bibliographie soll den Einstieg in eine weitergehende Auseinandersetzung mit dem Thema erleichtern.

11.1 Nachhaltige Städte

11.1.1 Übersichten über verschiedene Ansätze und Konzepte für eine nachhaltige Stadt

Cohen, N. (Hg.) (2011) *Green Cities: An A-to-Z Guide*, Sage Publications, Thousand Oaks.

Ein als Nachschlagewerk gestalteter Überblick über sehr viele Themen, die in das Thema Nachhaltigkeit und Stadt hineinspielen. Die alphabetische Anordnung der einzelnen Kurzaufsätze erleichtert das gezielte nachschlagen von Informationen, zudem eröffnen sich dem Leser aus der Fülle der behandelten Themen ganz neue Perspektiven dazu, welche Aspekte eine Rolle spielen, wenn es um die Nachhaltigkeit von Städten gehen. Der Nachteil dabei ist, dass die einzelnen Wissensbrocken einigermassen isoliert bleiben.

Colantonio, A. und T.J. Dixon (2011) *Urban Regeneration & Social Sustainability: Best Practice from European Cities*, Wiley-Blackwell, Chichester.

Pinderhughes, R. (2004) *Alternative Urban Futures: Planning for Sustainable Development in Cities Throughout the World*, Rowman & Littlefield, Lanham.

Wheeler, S. und T. Beatley (Hg.) (2004) *The Sustainable Urban Development Reader*, Routledge, London und New York.

11.1.2 Allgemeine Vorschläge und Ideen für eine nachhaltige städtische Zukunft

Altoon, R.A. und J.C. Auld (2011) *Urban Transformation: Transit Oriented Development and the Sustainable City*, Images Publishing, Mulgrave.

Archibugi, F. (1997) *The Ecological City and the City Effect: Essays on the Urban Planning Requirements for the Sustainable City*, Ashgate Publishing, Aldershot und Brookfield.

Calthorpe, P. (2011) *Urbanism in the Age of Climate Change*, Island Press, Washington, DC.

Cervero, R. und C. Sullivan (2011) Green TODs: Marrying transit-oriented development and green urbanism, *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, **18** (3) 210-218.

Heberle, L.C. und S.M. Opp (Hg.) (2008) *Local Sustainable Urban Development in a Globalized World*, Ashgate, Aldershot und Burlington.

Diese Aufsatzsammlung behandelt viele verschiedene Aspekte einer auf lokalen Entscheidungen und Massnahmen basierenden nachhaltigen Entwicklung, in der Form von Beispielen erfolgreich umgesetzter Konzepte.

Jenks, M., E. Burton und K. Williams (Hg.) (1996) *The Compact City: A Sustainable Urban Form?*, E & FN Spon, London und New York.

Die Aufsatzsammlung ist der Frage gewidmet, ob und unter welchen Bedingungen eine kompakte Stadt auch eine nachhaltige Stadt ist, respektive ob kompakte Städte nachhaltiger sind als weniger kompakte.

Low, N., B. Gleeson, R. Green und D. Radović (2005) *The Green City: Sustainable Homes, Sustainable Suburbs*, University of New South Wales Press, Routledge, Taylor & Francis, Sydney, Abingdon Oxfordshire und New York.

Ein Buch zum Thema Nachhaltigkeit und Stadt allgemein und über Möglichkeiten, Städte nachhaltiger zu gestalten.

Miller, D. und G. de Roo (2004) *Integrating City Planning and Environmental Improvement: Practicable Strategies for Sustainable Urban Development*, Ashgate, Aldershot und Brookfield.

Mostafavi, M. und G. Doherty (Hg.) (2010) *Ecological urbanism*, Lars Müller Publishers, Baden.

Williams, K., E. Burton und M. Jenks (Hg.) (2000) *Achieving Sustainable Urban Form*, E & FN Spon, London und New York.

Das Nachfolgewerk zu Jenks et al. (1996) bietet eine Sammlung von Aufsätzen zum theoretischen Hintergrund des Einflusses der gebauten Umwelt auf die Nachhaltigkeit von Städten und zu Beispielen und Vorschlägen, wie dieser Einfluss in der Planung konkret genutzt werden kann.

11.1.3 Ökonomische Aspekte nachhaltiger Städte

Suzuki, H., A. Dastur, S. Moffatt, N. Yabuki und H. Maruyama (2010) *Eco2 Cities: Ecological Cities as Economic Cities*, World Bank, Washington, D.C.

11.1.4 Städtbau und Nachhaltigkeit

Angelil, M.M. und D. Hebel (2010) *Cities of change: Addis Ababa: Transformation Strategies for Urban Territories in the 21st Century*, Birkhäuser, Basel, Boston und Berlin.

Es werden neuartige städtebauliche Entwurfsansätze vorgestellt, wobei die Stadt explizit als dynamisches System verstanden, welches von Flüssen und Senken von Ressourcen geprägt wird.

Faller, P. und E. Wurst (2002) *Der Wohngrundriss: Untersuchung im Auftrag der Wüstenroth Stiftung*, Deutsche Verlags-Anstalt, München.

Die Autoren untersuchen anhand der Geschichte des Wohngrundrisses die zentralen Determinanten und Anforderungen sowie die Wechselwirkungen mit anderen Aspekten des Wohnbaus. Funktionsstudien vertiefen das Verständnis für die in den Texten erläuterten Zusammenhänge. Zudem werden Schlüsselprojekte der Geschichte des Wohngrundrisses vorgestellt.

Das Thema ist relevant, da die Ausgestaltung der Wohngrundrisse massgeblich über Gebrauchswert, Flexibilität und Anpassbarkeit und damit auch über die Langlebigkeit respektive Nutzungsdauer des Gebäudeparks entscheiden.

Städtebau-Institut (Hg.) (2004) *Lehrbausteine Städtebau: Basiswissen für Entwurf und Planung*, Städtebau-Institut, Universität Stuttgart, Stuttgart.

Verschiedene Autoren geben eingängig und verständlich eine Einführung in sehr viele Wissensgebiete, die im Zusammenhang mit städtebaulichem Entwurf und Planung stehen.

Thomas, R. (Hg.) (2003) *Sustainable Urban Design: An Environmental Approach*, Spon Press, London und New York.

Eine Aufsatzsammlung mit klaren und gut verständlichen Übersichten zu verschiedenen Themen des Städtebaus, die für eine nachhaltige Entwicklung wichtig sind. Die besprochenen Themen werden in einem zweiten Teil anhand von Beispielen anschaulich erläutert.

Wüstenrot-Stiftung (Hg.) (2002) *Wohnbauten in Deutschland*, Karl Krämer, Stuttgart.

Diese Aufsatzsammlung behandelt aktuelle Fragen und neue Trends des Wohnungsbaus in Deutschland. Zudem werden im Rahmen der Dokumentation eines Wettbewerbs zahlreiche Beispiele aktuellen Wohnbaus vorgestellt. Zur Relevanz des Themas siehe Faller und Wurst (2002).

11.1.5 Aktionspläne für eine nachhaltige Stadtentwicklung

Coyle, S. (2011) *Sustainable And Resilient Communities: A Comprehensive Action Plan for Towns, Cities, and Regions*, John Wiley & Sons, Hoboken.

11.1.6 Leitfäden für eine nachhaltige Entwicklung urbaner Verkehrssysteme

PILOT

<http://www.pilot-transport.org/>

PILOT ist ein Projekt der EU, welches eine Anleitung und Hilfestellung zur Erarbeitung sogenannter *Sustainable Urban Transport Plans (SUTP)* bereitstellt. Ein SUTP beschäftigt sich integriert mit allen Verkehrsmitteln in einer Agglomeration.

Sustainable Urban Mobility Plans (SUMP)

<http://www.mobilityplans.eu>

Ein Projekt der Europäischen Union, das auf den Transport fokussiert ist, wobei dieser integriert betrachtet wird (alle Verkehrsmittel – multimodal). Themen der Flächennutzung und Planung werden nicht explizit berücksichtigt.

Sustainable Urban Transport Project (SUTP)

<http://www.sutp.org/index.php>

Das SUTP ist ein internationales Projekt, welches sich schnell entwickelnden Grosstädten insbesondere in Entwicklungs- und Schwellenländern helfen soll, Nachhaltigkeitsziele im Verkehrsbereich zu erreichen. Es werden zahlreiche Informationen zum Stand des Wissens, Erfahrungen und Projekte in verschiedenen Ländern, mögliche Massnahmen, Ausbildung uvm. in verschiedenen Sprachen zur Verfügung gestellt.

11.2 Der Einfluss der gebauten Umwelt auf die Nachhaltigkeit

11.2.1 Einfluss der gebauten Umwelt auf die Nachhaltigkeit allgemein

Alberti, M. (1999) Urban patterns and environmental performance: What do we know?, *Journal of Planning Education and Research*, **19** (2) 151-163.

Baccini, P. (2001) Ist out, wer baut?: Nachhaltigkeit verlangt den Umbau unserer Städte - Architektur und Ingenieurwesen bleiben stumm, *Tec21*, **127** (13) 16-20.

Doughty, M.R.C. und G.P. Hammond (2004) Sustainability and the built environment at and beyond the city scale, *Building and Environment*, **39** (10) 1223-1233.

Rees, W. und M. Wackernagel (1996) Urban ecological footprints: Why cities cannot be sustainable - And why they are a key to sustainability, *Environmental Impact Assessment Review*, **16** (4-6) 223-248.

11.2.2 Übersichten zum Themenkomplex Nachhaltigkeit, Stadt und Verkehr

Banister, D. (2011) Cities, mobility and climate change, *Journal of Transport Geography*, **19** (6) 1538-1546.

Hull, A. (2011) *Transport Matters: Integrated Approaches to Planning City-Regions*, Routledge, Abingdon und New York.

Kenworthy, J.R. und F.B. Laube (1999) Patterns of automobile dependence in cities: An international overview of key physical and economic dimensions with some implications for urban policy, *Transportation Research Part a-Policy and Practice*, **33** (7-8) 691-723.

Mitchell, G., A. Hargreaves, A. Namdeo und M. Echenique (2011) Land use, transport, and carbon futures: The impact of spatial form strategies in three UK urban regions, *Environment and Planning A*, **43** (9) 2143-2163.

Newman, P.W.G. und J.R. Kenworthy (1999) *Sustainability and Cities: Overcoming Automobile Dependence*, Island Press, Washington, D.C.

Im Zentrum dieses Werks steht die Aussage, dass der Verkehr – beziehungsweise der Umgang damit – der entscheidende Faktor für die nachhaltige Entwicklung einer Stadt ist. Für die Überwindung der Abhängigkeit vom Auto werden Konzepte und Beispiele vorgestellt.

Rosenthal, J.K., E.D. Sclar, P.L. Kinney, K. Knowlton, R. Crauderueff und P.W. Brandt-Rauf (2007) Links between the built environment, climate and population health: Interdisciplinary environmental change research in New York City, *Annals Academy of Medicine Singapore*, **36** (10) 834-846.

Williams, K. (Hg.) (2005) *Spatial Planning, Urban Form, and Sustainable Transport*, Ashgate, Aldershot und Burlington.

Die Aufsatzsammlung ist dem Einfluss der gebauten Umwelt auf die Voraussetzungen für eine nachhaltige Verkehrsentwicklung in Städten sowie den Bedingungen und der Umsetzung einer nachhaltigen Verkehrspolitik gewidmet.

11.2.3 Einfluss der gebauten Umwelt auf das Verkehrsverhalten

Aditjandra, P.T., C. Mulley und J.D. Nelson (2009) Extent to which sustainable travel to work can be explained by neighborhood design characteristics, *Transportation Research Record*, (2134) 114-122.

Brownstone, D. und T.F. Golob (2009) The impact of residential density on vehicle usage and energy consumption, *Journal of Urban Economics*, **65** (1) 91-98.

- Cao, X.Y., S.L. Handy und P.L. Mokhtarian (2006) The influences of the built environment and residential self-selection on pedestrian behavior: Evidence from Austin, TX, *Transportation*, **33** (1) 1-20.
- Cervero, R. (1996) Jobs-housing balance revisited - Trends and impacts in the San Francisco Bay Area, *Journal of the American Planning Association*, **62** (4) 492-511.
- Cervero, R. (2002a) Built environments and mode choice: Toward a normative framework, *Transportation Research Part D-Transport and Environment*, **7** (4) 265-284.
- Cervero, R. (2002b) Travel by design: The influence of urban form on travel, *Journal of the American Planning Association*, **68** (1) 106-107.
- Cervero, R. (2003) Road expansion, urban growth, and induced travel - A path analysis, *Journal of the American Planning Association*, **69** (2) 145-163.
- Cervero, R. und M. Duncan (2006) Which reduces vehicle travel more: Jobs-housing balance or retail-housing mixing?, *Journal of the American Planning Association*, **72** (4) 475-490.
- Cervero, R. und J. Murakami (2010) Effects of built environments on vehicle miles traveled: Evidence from 370 US urbanized areas, *Environment and Planning A*, **42** (2) 400-418.
- Crane, R. (1996) On form versus function: Will the new urbanism reduce traffic, or increase it?, *Journal of Planning Education and Research*, **15** (2) 117-126.
- Dieleman, F.M., M. Dijst und G. Burghouwt (2002) Urban form and travel behaviour: Micro-level household attributes and residential context, *Urban Studies*, **39** (3) 507-527.
- Ewing, R., M. Greenwald, M. Zhang, J. Walters, M. Feldman, R. Cervero, L. Frank und J. Thomas (2011) Traffic generated by mixed-use developments: Six-region study using consistent built environmental measures, *Journal of Urban Planning and Development-Asce*, **137** (3) 248-261.
- Forsyth, A., J.M. Oakes, K.H. Schmitz und M. Hearst (2007) Does residential density increase walking and other physical activity?, *Urban Studies*, **44** (4) 679-697.
- Handy, S., X.Y. Cao und P.L. Mokhtarian (2006) Self-selection in the relationship between the built environment and walking - Empirical evidence from northern California, *Journal of the American Planning Association*, **72** (1) 55-74.
- Hankey, S. und J.D. Marshall (2010) Impacts of urban form on future US passenger-vehicle greenhouse gas emissions, *Energy Policy*, **38** (9) 4880-4887.
- Holden, E. und K. Linnerud (2011) Troublesome leisure travel: The contradictions of three sustainable transport policies, *Urban Studies*, **48** (14) 3087-3106.
- Lee, C. und A.V. Moudon (2006) The 3Ds+R: Quantifying land use and urban form correlates of walking, *Transportation Research Part D-Transport and Environment*, **11** (3) 204-215.
- Lin, J.J. und A.T. Yang (2009) Structural analysis of how urban form impacts travel demand: Evidence from Taipei, *Urban Studies*, **46** (9) 1951-1967.

- Maat, K. und H.J.P. Timmermans (2009) A causal model relating urban form with daily travel distance through activity/travel decisions, *Transportation Planning and Technology*, **32** (2) 115-134.
- Maat, K., B. van Wee und D. Stead (2005) Land use and travel behaviour: Expected effects from the perspective of utility theory and activity-based theories, *Environment and Planning B-Planning & Design*, **32** (1) 33-46.
- Ozbil, A., J. Peponis und B. Stone (2011) Understanding the link between street connectivity, land use and pedestrian flows, *Urban Design International*, **16** (2) 125-141.
- Rickwood, P. und G. Glazebrook (2009) Urban structure and commuting in Australian cities, *Urban Policy and Research*, **27** (2) 171-188.
- Rodriguez, D.A. und J. Joo (2004) The relationship between non-motorized mode choice and the local physical environment, *Transportation Research Part D-Transport and Environment*, **9** (2) 151-173.
- Tracy, A.J., P. Su, A.W. Sadek und Q. Wang (2011) Assessing the impact of the built environment on travel behavior: A case study of Buffalo, New York, *Transportation*, **38** (4) 663-678.
- Vance, C. und R. Hedel (2007) The impact of urban form on automobile travel: Disentangling causation from correlation, *Transportation*, **34** (5) 575-588.
- Zhang, M. (2004) The role of land use in travel mode choice - Evidence from Boston and Hong kong, *Journal of the American Planning Association*, **70** (3) 344-360.

11.2.4 Einfluss der gebauten Umwelt auf die Kosten öffentlicher Dienste

- Benito, B., F. Bastida und M.D. Guillamon (2010) Urban Sprawl and the cost of public services: An evaluation of Spanish local governments, *Lex Localis-Journal of Local Self-Government*, **8** (3) 245-264.
- Carruthers, J.I. und G.F. Ulfarsson (2003) Urban sprawl and the cost of public services, *Environment and Planning B-Planning & Design*, **30** (4) 503-522.

11.2.5 Agglomerationseffekte

- Graham, D.J. (2007) Agglomeration, productivity and transport investment, *Journal of Transport Economics and Policy*, **41** 317-343.
- Graham, D.J., P.S. Melo, P. Jiwattanakulpaisarn und R.B. Noland (2010) Testing for causality between productivity and agglomeration economies, *Journal of Regional Science*, **50** (5) 935-951.
- Melo, P.C., D.J. Graham und R.B. Noland (2012) The effect of labour market spatial structure on commuting in England and Wales, *Journal of Economic Geography*, **12** (3) 717-737.
- Rigby, D.L. und R. Essletzbichler (2002) Agglomeration economies and productivity differences in US cities, *Journal of Economic Geography*, **2** (4) 407-432.

11.3 Urban Metabolism und Gebäudepark

- Baccini, P. (1996) Understanding regional metabolism for a sustainable development of urban systems, *Environmental Science and Pollution Research*, **3** (2) 108-111.
- Browne, D., B. O'Regan und R. Moles (2009) Assessment of total urban metabolism and metabolic inefficiency in an Irish city-region, *Waste Management*, **29** (10) 2765-2771.
- Codoban, N. und C.A. Kennedy (2008) Metabolism of neighborhoods, *Journal of Urban Planning and Development-Asce*, **134** (1) 21-31.
- Decker, E.H., S. Elliott, F.A. Smith, D.R. Blake und F.S. Rowland (2000) Energy and material flow through the urban ecosystem, *Annual Review of Energy and the Environment*, **25** 685-740.
- Hall, M.H.P. (2011) A preliminary assessment of socio-ecological metabolism for three neighborhoods within a rust belt urban ecosystem, *Ecological Modelling*, **223** (1) 20-31.
- Kennedy, C., J. Cuddihy und J. Engel-Yan (2007) The changing metabolism of cities, *Journal of Industrial Ecology*, **11** (2) 43-59.
- Muller, D.B. (2006) Stock dynamics for forecasting material flows - Case study for housing in The Netherlands, *Ecological Economics*, **59** (1) 142-156.
- Newton, P. und D. Meyer (2012) The determinants of urban resource consumption, *Environment and Behavior*, **44** (1) 107-135.
- Parshall, L., K. Gurney, S.A. Hammer, D. Mendoza, Y.Y. Zhou und S. Geethakumar (2010) Modeling energy consumption and CO(2) emissions at the urban scale: Methodological challenges and insights from the United States, *Energy Policy*, **38** (9) 4765-4782.
- Perkins, A., S. Hamnett, S. Pullen, R. Zito und D. Trebilcock (2009) Transport, housing and urban form: The life cycle energy consumption and emissions of city centre apartments compared with suburban dwellings, *Urban Policy and Research*, **27** (4) 377-396.
- Sartori, I., H. Bergsdal, D.B. Muller und H. Brattebo (2008) Towards modelling of construction, renovation and demolition activities: Norway's dwelling stock, 1900-2100, *Building Research and Information*, **36** (5) 412-425.
- Tanikawa, H. und S. Hashimoto (2009) Urban stock over time: Spatial material stock analysis using 4d-GIS, *Building Research and Information*, **37** (5-6) 483-502.

11.4 Analyse und Modellierung von Städten und Strukturen

- Batty, M., R. Carvalho, A. Hudson-Smith, R. Milton, D. Smith und P. Steadman (2008) Scaling and allometry in the building geometries of Greater London, *European Physical Journal B*, **63** (3) 303-314.
- Boyko, C.T. und R. Cooper (2011) Clarifying and re-conceptualising density, *Progress in Planning*, **76** 1-61.

- Croci, E., S. Melandri und T. Molteni (2011) Determinants of cities' GHG emissions: A comparison of seven global cities, *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, **3** (3) 275-301.
- Horner, M.W. (2008) 'Optimal' accessibility landscapes? Development of a new methodology for simulating and assessing jobs-housing relationships in urban regions, *Urban Studies*, **45** (8) 1583-1602.
- Katoshevski-Cavari, R., T. Arentze und H. Timmermans (2010) A multi-agent planning support-system for assessing externalities of urban form scenarios: Results of case studies, *Sustainability*, **2** (7) 2253-2278.
- Krizek, K.J. (2003) Operationalizing neighborhood accessibility for land use-travel behavior research and regional modeling, *Journal of Planning Education and Research*, **22** (3) 270-287.
- Robinson, D. (Hg.) (2011) *Computer Modelling for Sustainable Urban Design: Physical Principles, Methods and Applications*, Earthscan, London.
- Diese Aufsatzsammlung bietet viele Vorschläge und Methoden zu Modellierung verschiedener Aspekte einer Stadt sowie zur Bewertung der Nachhaltigkeit einer Stadt.
- Srinivasan, S. (2002) Quantifying spatial characteristics of cities, *Urban Studies*, **39** (11) 2005-2028.

11.5 Nachhaltigkeitsbeurteilung

11.5.1 Bücher und Aufsätze zur Nachhaltigkeitsbeurteilung in einem städtischen Kontext

- Bithas, K.P. und M. Christofakis (2006) Environmentally sustainable cities: Critical review and operational conditions, *Sustainable Development*, **14** (3) 177-189.
- Der Aufsatz beschäftigt sich mit den Bedingungen, um ökologische Nachhaltigkeit in Städten zu operationalisieren und schlägt eine Grundlage zur Beurteilung der Entwicklung von Städten hinsichtlich ökologischer Nachhaltigkeit vor.
- Brandon, P.S. und P. Lombardi (2011) *Evaluating Sustainable Development in the Built Environment*, Blackwell Science, Oxford.
- Die Autoren liefern eine Einleitung in die Fragen im Zusammenhang mit der Nachhaltigkeitsbeurteilung der gebauten Umwelt. Zudem versuchen sie, einen strukturierten und verständlichen eigenen Ansatz zu entwickeln und dessen Anwendung zu erklären.
- Devuyt, D., L. Hens und W. De Lannoy (Hg.) (2001) *How Green is the City? Sustainability Assessment and the Management of Urban Environments*, Columbia University Press, New York.
- Die Aufsatzsammlung vereint Arbeiten zur nachhaltigen Entwicklung in städtischen Gebieten sowie zur Beurteilung der Nachhaltigkeit einer städtischen Entwicklung.

- Forsberg, A. und F. von Malmborg (2004) Tools for environmental assessment of the built environment, *Building and Environment*, **39** (2) 223-228.
- Graymore, M.L.M., A.M. Wallis und A.J. Richards (2009) An index of regional sustainability: A GIS-based multiple criteria analysis decision support system for progressing sustainability, *Ecological Complexity*, **6** (4) 453-462.
- Huang, S.L., J.H. Wong und T.C. Chen (1998) A framework of indicator system for measuring Taipei's urban sustainability, *Landscape and Urban Planning*, **42** (1) 15-27.
- Kajikawa, Y., T. Inoue und T.N. Goh (2011) Analysis of building environment assessment frameworks and their implications for sustainability indicators, *Sustainability Science*, **6** (2) 233-246.
- Krank, S. und H. Wallbaum (2011) Lessons from seven sustainability indicator programs in developing countries of Asia, *Ecological Indicators*, **11** (5) 1385-1395.
- Masnavi, M.R. (2007) Measuring urban sustainability: Developing a conceptual framework for bridging the gap between theoretical levels and the operational levels, *International Journal of Environmental Research*, **1** (2) 188-197.
- Olalla-Tarraga, M.A. (2006) A conceptual framework to assess sustainability in urban ecological systems, *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, **13** (1) 1-15.
- Vreeker, R., M. Deakin und S. Curwell (Hg.) (2005) *Sustainable Urban Development - Volume 3: The Toolkit for Assessment*, Routledge, London und New York.
- Anhand von Fallbeispielen aus Europa wird dargestellt, wie die Nachhaltigkeit von Städten, Stadtteilen, Nachbarschaften und Gebäuden beurteilt werden kann.
- Zellner, M.L., T.L. Theis, A.T. Karunanithi, A.S. Garmestani und H. Cabezas (2008) A new framework for urban sustainability assessments: Linking complexity, information and policy, *Computers Environment and Urban Systems*, **32** (6) 474-488.
- Zhang, Y. und B. Guindon (2006) Using satellite remote sensing to survey transport-related urban sustainability part 1: Methodologies for indicator quantification, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **8** (3) 149-164.

11.5.2 Beurteilungswerkzeuge und –verfahren für eine nachhaltige Entwicklung

Nachhaltige Entwicklung

Nachhaltigkeitsbeurteilung (NHB)

<http://www.are.admin.ch/themen/nachhaltig/00270/index.html?lang=de>

Die NHB des Amtes für Raumentwicklung (ARE) dient der Berücksichtigung der Grundsätze der nachhaltigen Entwicklung bei Projekte und politischen Entscheiden auf verschiedenen Staatsebenen.

BellagioSTAMP

<http://www.iisd.org/measure/principles/progress/bellagiostamp/>

Der BellagioSTAMP besteht aus einem Satz von Leitideen, die benutzt werden, um den Fortschritt in Richtung Nachhaltigkeit zu messen und zu bewerten.

Verkehr

COST 356: EST - Towards the definition of a measurable environmentally sustainable transport

<http://cost356.inrets.fr/>

Das Projekt COST 356 befasst sich mit Methoden zur Messung der Auswirkungen des Verkehrs auf die Umwelt mittels Indikatoren und Indizes sowie mit dem Einsatz solcher Indikatoren und Indizes in der Planung in der Entscheidungsfindung.

Von grossem Interesse ist insbesondere der Schlussbericht „Indicators of Environmental Sustainability in Transport“ – er liefert einen äusserst umfassenden theoretischen Hintergrund zu Indikatoren im Allgemeinen und im Verkehrswesen:

Joumard, R. und H. Gudmundsson (2010) Indicators of Environmental Sustainability in Transport: An Interdisciplinary Approach to Methods, *Les collections de l'INRETS*, **R282**, Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité – INRETS, Bron cedex.

Methodology for describing the accessibility of transport in Europe (Mediate)

<http://www.mediate-project.eu/>

Mediate hatte zum Ziel, eine gemeinsame europäische Methodik zur Messung der Zugänglichkeit im öffentlichen Verkehr zu entwickeln. Dabei wird detailliert auf die konkrete Angebotsgestaltung im ÖV eingegangen. Es werden unter anderem Indikatoren, ein Leitfaden und ein Werkzeug zur Selbstbewertung zur Verfügung gestellt.

Das Projekt *Accessible Public Transport in Europe* (APTIE) (<http://www.aptie.eu/site/>) zeigt die Ergebnisse des Projekts Mediate auf.

Procedures for Recommending Optimal Sustainable Planning of European City Transport Systems (PROSPECTS)

<http://www.ivv.tuwien.ac.at/forschung/projekte/international-projects/prospects-2000.html>

Ein älteres Projekt (2003 abgeschlossen), das aber in verschiedenen zugehörigen Berichten zahlreiche Indikatoren zu nachhaltiger Mobilität und zudem sehr wertvolle Literaturhinweise bietet.

Quality management tool for Urban Energy efficient Sustainable Transport (QUEST)

<http://www.quest-project.eu>

Im Rahmen des EU-Projekts QUEST wird ein Beurteilungswerkzeug für die Verkehrspolitik einer Stadt entwickelt. Das Ziel ist es, Städte bei der Entwicklung nachhaltigerer Verkehrssysteme zu unterstützen.

Im Bericht „State of the Art of Urban Mobility Assessment“ werden zahlreiche Werkzeuge und Ansätze zur Evaluation der städtischen Verkehrspolitik aufgelistet und kurz beschrieben:

Barham, P., S. Jones und M. van der Voet (2012) State of the Art of Urban Mobility Assessment, *QUEST: Quality management tool for Urban Energy efficient Sustainable Transport*, **D3.1**, European Commission, Executive Agency for Competitiveness and Innovation, Brüssel.

Verkehr und Flächennutzung

Design and Implementation Support Tools for Integrated Local land Use, Transport and the Environment (DISTILLATE)

<http://www.distillate.ac.uk/index.php>

Das britische Projekt DISTILLATE zielt auf eine Überwindung von Hindernissen bei der Entwicklung wirksamer Strategien nachhaltiger städtischer Mobilität und Flächennutzung.

EcoMobility SHIFT

<http://www.ecomobility.org/shift-project>

Im Rahmen des Projekts EcoMobility SHIFT soll eine Methode entwickelt werden, um die ökologische Nachhaltigkeit von Massnahmen lokaler Exekutiven in der Verkehrs- und Flächennutzungsplanung zu bewerten, zu verbessern und zu fördern.

Anhang: Daten-CD

Keine CD vorhanden?

Beim Autor erhältlich:

christian.m.marti@gmail.com

Enthaltene Daten

Das folgende Verzeichnis führt alle auf der beiliegenden CD enthaltenen Daten auf. Es folgt dabei der Ordnerstruktur der CD.

01 Bericht

Masterarbeit_Marti.pdf

02 Präsentation vom 26. Juni 2012

Präsentation_Masterarbeit_Marti.pdf

03 Abbildungen als PNG-Dateien (ohne Excel-Grafiken)

- Abbildung 00: Titelbild
- Abbildung 20: Modellprinzip
- Abbildung 21: Elastizitäten
- Abbildung 22: Beurteilung Winterthur identische Intervalle, ohne BIP
- Abbildung 23: Beurteilung Winterthur Quantile, ohne BIP
- Abbildung 24: Beurteilung Schlieren und Dietikon identische Intervalle, ohne BIP
- Abbildung 25: Beurteilung Schlieren und Dietikon Quantile, ohne BIP
- Abbildung 36: Verkehrszonen Schlieren und Dietikon
- Abbildung 57: Beurteilung Winterthur Quantile, mit BIP
- Abbildung 58: Beurteilung Schlieren und Dietikon Quantile, mit BIP

04 Literatur

Literatur_Masterarbeit_Marti.enl (EndNote Library, mit PDF-Dateien verknüpft)

Literatur_Masterarbeit_Marti.Data (Verzeichnis):

- PDF: Verzeichnis mit allen als PDF verfügbaren im Literaturverzeichnis oder in der kommentierten Bibliographie zitierten Werken
- rdb: EndNote Datenverzeichnis

05 Scripts

Sämtliche Scripts müssen in den Ordner /scripts im GRASS-Installationspfad kopiert werden. Danach können sie aus einer laufenden GRASS-Session aufgerufen und ausgeführt werden.

05_1 Beurteilungstools (in GRASS ausführbar)

- s_assessment_multiple.py
- s_assessment_single.py
- s_assessment_single_reduced.py

05_2 Grundlagenscrips (nicht ausführbar)

- s_functions.py
- s_global_variables.py
- s_measures.py
- s_selection.py
- s_sql_commands.py

05_3 Zusatztools (in GRASS ausführbar)

- s_map_patcher.py
- s_street_network_creator_doubleclean.py
- s_embodied_and_operational.py
- s_entropy.py

06 Eingangsdaten

Auf der CD sind nur diejenigen Daten enthalten, welche effektiv für die durchgeführten Beurteilungen benötigt wurden. Es handelt sich einerseits um Vektorkarten im GRASS-Format, andererseits um CSV-Dateien.

06_1 GRASS-Daten

Location: *MA_Dataset_Marti*

Mapset: *PERMANENT*

Karten:

Gebaute Umwelt Limmattal:	AP_cities_Limmattal AP_zones_Limmattal AP_parcels_Limmattal AP_buildings_Limmattal AP_new_buildings_Limmattal AP_hh_Limmattal AP_jobs_Limmattal
Gebaute Umwelt Winterthur:	GR_cities230 GR_zones230 GR_parcels230 GR_buildings230 GR_new_buildings230 GR_hh230 GR_jobs230
Strassennetz:	GM_street_network_Limmattal GM_street_network_230

Mapset: *additional_maps*

Karte:

ÖV-Haltestellen:	halte
------------------	-------

06_2 CSV-Dateien

Simulationsergebnisse aus *SustainCity* 2001-2010 für Haushalte und Arbeitsplätze

07 Verwendete Befehle

Die abgelegten Textdateien enthalten Befehle, mit welchen sich alle im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Beurteilungen ausführen lassen.

```
Befehle_multiple_Limmattal.txt
Befehle_multiple_Limmattal_timeline.txt
Befehle_multiple_Winterthur.txt
Befehle_single_reduced_Limmattal_timeline.txt
```

Zur Durchführung der Beurteilungen mit den enthaltenen Befehlen muss der Inhalt des Ordners 06 Eingangsdaten auf den Rechner kopiert werden. In GRASS muss als Location *MA_Dataset_Marti* gewählt werden, als aktives Mapset *PERMANENT*. In den Befehlen sind für die CSV-Eingangsdaten nur die Dateinamen aufgeführt; werden sie in einem Unterordner des Systems abgelegt, müssen die Befehle entsprechend angepasst werden.

08 Generierte Rohdaten

Die generierten CSV- und Pickle-Dateien (bei Version *single reduced*) sind nach verwendetem Tool und Beurteilungsart getrennt abgelegt, mit folgender Einteilung:

```
multiple
multiple timeline
single reduced timeline
```

Die folgenden Resultate-Karten befinden sich ebenfalls im GRASS-Mapset *PERMANENT*, der Location *MA_Dataset_Marti*. Die entsprechenden Daten sind im Ordner *06 Eingangsdaten/06_1 GRASS-Daten* zu finden.

```
Resultate-Karten Limmattal:  AR_multiple_Limmattal
                             AR_multiple_Limmattal_GDP
Resultate-Karten Winterthur: AR_multiple_230
                             AR_multiple_230_GDP
```

09 Auswertung

09_1 QGIS Karten

QGIS Auswertung Limmattal.qgs

QGIS Auswertung Winterthur.qgs

QGIS Zonen Limmattal.qgs

Verzeichnis *Shapefiles* mit shp-Dateien, auf die in den QGIS-Projekten verwiesen wird

09_2 Excel-Dateien mit Auswertungs-Grafiken

AUSWERTUNG_ ANTEILE.xlsx

AUSWERTUNG_ KORRELATIONEN_ Winterthur.xlsx

AUSWERTUNG_ KORRELATIONEN_ Winterthur_ BIP.xlsx

AUSWERTUNG_ multiple_ Limmattal_ TIMELINE.xlsx

AUSWERTUNG_ single_ reduced_ Limmattal_ TIMELINE.xlsx