



**Vom Ökologischen Fußabdruck zum Ressourcen- und
Umweltmanagement am Beispiel der Wiener Linien
(ÖFRU)**

**Arbeitspaket 1:
Ökologischer Fußabdruck der U2 Verlängerung**

Endbericht Arbeitspaket 1

Jakob Lederer, Ulrich Kral, Paul H. Brunner

Im Auftrag der
Wiener Linien GmbH & Co KG

Wien, 10. September 2010

Projektleitung
Paul H. Brunner

Projektbearbeitung
Jakob Lederer
Ulrich Kral

Grafische Gestaltung und Layout
Inge Hengl

Impressum
Technische Universität Wien
Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft
A-1040 Wien, Karlsplatz 13/226
Tel.: +43 1 58 801 226 41 (Skr.)
Fax.: +43 1 58 801 22697
E-Mail: aws@iwa.tuwien.ac.at
<http://www.iwa.tuwien.ac.at>



Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit ist ein Zwischenbericht des Projektes „Vom Ökologischen Fußabdruck zum Ressourcen- und Umweltmanagement am Beispiel der Wiener Linien“. Er beinhaltet die Ergebnisse des ersten Projektteils „Ökologischer Fußabdruck der U2 Verlängerung“. Diese werden im Zuge der Eröffnung der U-Bahnlinie präsentiert und veröffentlicht. Der zweite Teil hat die Erstellung einer umfassenden ressourcen- und umweltbezogenen Wissensbasis für die Wiener Linien zum Ziel, und wird Ende des Jahres 2011 veröffentlicht.

Ziel

Ziel des ersten Projektteils ist, die beiden technischen Verkehrssysteme „U-Bahn“ und „motorisierter Individualverkehr (MIV)“ mit Hilfe des Bewertungsindikators „Ökologischer Fußabdruck“ zu vergleichen. Als Bezugseinheit dient der auf einen Personenkilometer normierte Ökologische Fußabdruck der beiden Transportleistungen. Gegenstand der Untersuchung ist die neu gebaute Verlängerung der Wiener U-Bahnlinie 2 von Station „Schottentor“ bis „Seestadt“ sowie ein MIV-Referenzsystem mit der gleichen Transportleistung.

Vorgangsweise

Zuerst wird die Originalmethode nach Wackernagel und Rees vorgestellt, und in Fallbeispielen demonstriert. Zur Berechnung des Indikators wird die Methode im Hinblick auf die Aktivität „Transportieren/Kommunizieren“ adaptiert und auf die beiden technischen Transportsysteme angewandt. Die Datengrundlage baut auf einer Inventarisierung der immobilien U-Bahninfrastruktur und des Wagenmaterials auf. Sowohl der energetische als auch der materielle Aufwand zur Bereitstellung der Infrastruktur und des Betriebes werden in Rechnung gestellt. Die Umrechnung des Inventars auf Flächeneinheiten im Sinne des Ökologischen Fußdruckes greift auf Faktoren der GEMIS Datenbank (Globales Emissionsmodell Integrierter Systeme) zurück.

Ergebnis – Ökologischer Fußabdruck

Es zeigt sich, dass unter den gegebenen Rahmenbedingungen der Wiener Linien eine U-Bahnfahrt einen rund 3-mal geringeren Fußabdruck verursacht, als eine PKW-Fahrt. Der jährliche Anteil der U2-Verlängerung am Fußabdruck der Stadt Wien beträgt ca. 0,05%, wird der Pkw gewählt, beträgt er 0,16%. Bei der U-Bahn entfallen 43% des Fußabdruckes auf die Bereitstellung der Infrastruktur und des Wagenmaterials, 57% stehen für den Betrieb der U-Bahn sowie den Funktionserhalt der Stationen.

Mit 99,9% Anteil am gesamten Fußabdruck der U2-Verlängerung dominieren die Energieflächen zur Absorption der CO₂-Emissionen. Somit reagiert der Fußabdruck stark sensitiv auf die Wahl von Strommix und Energieaufwand (Bandbreite 0,16 – 0,25 m²/Pers-km.a).

Die direkte Flächenbeanspruchung durch Versiegelung hat keinen nennenswerten Einfluss auf den gesamten ÖF. Aus stadtplanerischer Sicht ist er aber von Bedeutung. So ist der direkte Flächenbedarf der U2-Verlängerung 6-mal geringer als jener des MIV-Referenzsystems.

Das strategische Ziel der Stadt Wien, einen 40%-igen Modal-Split-Anteil des ÖVs zu erreichen, führt zur Reduktion des Fußabdruckes einer U2-Fahrt um 10-20% (~ 0,14 m²/Pers-km.a).

Maßnahmen zur Reduktion des Ökologischen Fußabdruckes

Um den Fußabdruck im Wiener Verkehrssektor zu senken, bedarf es einer Reduktion der Treibhausgasemissionen. Dabei zeigen Energieeffizienzmaßnahmen im ÖV nicht jene ökonomische und umweltwirksame Effizienz, wie Treibhausgasreduktionen im MIV. Darüber hinaus kann es durchaus sinnvoll sein, den ÖF der Wiener Linien durch Angebots- und Netzerweiterung geringfügig zu erhöhen, um damit eine Verlagerungswirkung vom MIV hin zum ÖV zu erreichen. Allerdings kann durch solche Maßnahmen der Auslastungsgrad der U-Bahn abnehmen, was direkt zu einer Vergrößerung des ÖF der Wiener Linien führt.

Soll ausschließlich der ÖF der Wiener Linien gesenkt werden, so gilt es in Zukunft a) beim Bau jenen Beton und Stahl zu verwenden, der in den Vorketten geringere CO₂-Emissionen verursacht, b) im Betrieb jenem Strommix den Vorzug zu geben, der geringere CO₂-Emissionen ausweist, c) den Energiekonsum des Wagenmaterials und der Stationen zu reduzieren, d) den Besetzungsgrad zu erhöhen, e) unter Berücksichtigung der Funktion des jeweiligen Verkehrsträgers, den optimalen Mix zwischen Straßenbahnen, Bussen und U-Bahnen zu finden. Einzelne dieser Maßnahmen, die sich aus dem Konzept des Ökologischen Fußabdruckes ableiten, können im Widerspruch zu verkehrspolitischen oder verkehrswirtschaftlichen Zielsetzungen stehen: Eine Erhöhung des Besetzungsgrades könnte beispielsweise durch eine Einschränkung der Betriebszeiten erreicht werden. Dies zeigt, dass im Sinne einer Güterabwägung der ÖF nur als ein Indikator gelten kann, der durch andere, die Ziele des Verkehrsmittelangebotes besser abbildende Maßstäbe ergänzt werden muss.

Ausblick: Der Schritt zum Ressourcenmanagement

Der Ökologische Fußabdruck hat aufgrund seiner einfachen Verständlichkeit, und den vielfältigen Anwendungen einen großen, öffentlichen Bekanntheitsgrad. Somit ist er für die mediale Kommunikation gut geeignet. Die Ergebnisse einzelner Fußabdruck-Studien sind



allerdings aufgrund stark variierender Systemgrenzen, Allokationsregeln, Umrechnungsfaktoren, und funktionellen Einheiten nur eingeschränkt vergleichbar.

Der Schritt vom Ökologischen Fußabdruck zum Ressourcen- und Umweltmanagement bedarf eines breiteren Methodensets. Der Ökologische Fußabdruck ist aufgrund methodischer Restriktionen und seiner Funktion als hochaggrierter Indikator nicht unmittelbar als Entscheidungsgrundlage zur operativen Unternehmenssteuerung geeignet. Beide Aspekte legen nahe, eine Informationspyramide mit abgestuften Ebenen in Abhängigkeit von der Zielgruppe zu entwickeln ist. An der Spitze stehen medial kommunizierbare Indizes, an der Basis analytische Informationsgrundlagen in Hinblick auf die operative Unternehmenssteuerung. Teil dieser Wissensbasis sind u.a. Stoff- und Energiebilanzen auf Unternehmensebene (Hauptsystem). Diese dienen neben der Quantifizierung direkter Effekte als Ausgangspunkt zur Inventarisierung der indirekten Effekte (Hinterland).



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
Abbildungsverzeichnis.....	iii
Tabellenverzeichnis	iii
Terminologie.....	vi
1 Einleitung.....	1
2 Ziele und Fragestellungen	3
2.1 Ziele	3
2.2 Fragestellungen	3
3 Grundlagen.....	5
3.1 Der Ökologische Fußabdruck nach Wackernagel und Rees	5
3.1.1 Konzept.....	5
3.1.2 Berechnung des Ökologischen Fußabdruckes	7
3.2 Anwendungsbeispiele.....	7
3.2.1 Geografischer Ansatz.....	7
3.2.2 Sektoraler Ansatz: Der Fußabdruck des Bausektors.....	8
3.2.3 Aktivitätenansatz: Transport & Kommunikation	9
4 Ermittlung des Ökologischen Fußabdruckes	11
4.1 Vorgangsweise	11
4.2 Zieldefinition	11
4.3 Berechnungsgrundlagen.....	11
4.3.1 Methode	11
4.3.2 Algorithmus	12
4.4 Systemgrenzen und funktionelle Einheit	13
4.4.1 Grundlagen bei der Wahl von Systemgrenzen	13
4.4.2 Systemgrenzen	14
4.4.3 Funktionelle Einheit.....	15
4.5 Systembeschreibung	15
4.5.1 System „U2 Verlängerung“	15
4.5.2 Referenzsystem „Motorisierter Individualverkehr“	21
4.6 Inventar (Datenerfassung)	22
4.6.1 Übersicht.....	23

4.6.2	Allokationsregeln	23
4.6.3	System „U2 Verlängerung“	24
4.6.4	Referenzsystem „Motorisierter Individualverkehr“	31
4.7	Flächenbeanspruchung: Vom Inventar zum Fußabdruck	34
4.7.1	System „U2 Verlängerung“	35
4.7.2	Referenzsystem „Motorisierter Individualverkehr“	38
5	Ergebnisse und Interpretation.....	39
5.1	System „U2 Verlängerung“	39
5.1.1	Ökologischer Fußabdruck der U2 Verlängerung.....	39
5.1.2	Parametervariation	44
5.2	Referenzsystem „Motorisierter Individualverkehr“	46
5.2.1	Ökologischer Fußabdruck des MIV	46
5.2.2	Parametervariation	46
5.3	Vergleich der Ergebnisse.....	47
5.3.1	U-Bahn versus PKW	47
5.3.2	Stadt Wien versus Region Merseyside	48
6	Schlussfolgerungen und Diskussion	51
6.1	Methodisch	51
6.2	Inhaltlich.....	54
7	Literatur	57
8	Anhang.....	63
8.1	System „U2 Verlängerung“	63
8.1.1	Kenndaten	63
8.1.2	Inventar	64
8.1.3	Eingabedaten für GEMIS Berechnungen	65
8.1.4	Ökologischer Fußabdruck.....	67
8.2	Referenzsystem „Motorisierter Individualverkehr“	68
8.2.1	Inventar	68
8.2.2	Eingabedaten für GEMIS Berechnungen	70
8.2.3	Ökologischer Fußabdruck.....	70
8.3	Datenträger.....	71



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: U-Bahnlinie U2 – Bestandsstrecke und Ausbaustufen.....	16
Abbildung 2: Fahrgastaufkommen U2 [30].....	18
Abbildung 3: Fahrzeugzusammensetzung Metro Oslo nach Kampenhuber (2006) (zitiert in Struckl [32])	29
Abbildung 4: Anteile von Bereitstellung und Betrieb am Ökologischen Fußabdruck der U2-Verlängerung($\text{ÖF}_{\text{Bereitstellung+Betrieb}} = 3.079 \text{ ha/a}$)	41
Abbildung 5: Ökologischer Fußabdruck der Infrastrukturbereitstellung ($\text{ÖF}_{\text{Bereitstellung}} = 1.758 \text{ ha/a}$).....	42
Abbildung 6: Ökologischer Fußabdruck des Betriebes ($\text{ÖF}_{\text{Betrieb}} = 1.321 \text{ ha/a}$).....	42
Abbildung 7: Einzelkomponenten des Ökologischen Fußabdruckes der U2Verlängerung ($\text{ÖF}_{\text{Bereitstellung+Betrieb}} = 3.079 \text{ ha/a}$).....	43
Abbildung 8: Ökologischer Fußabdruck der U2-Verlängerung in Abhängigkeit des Auslastungsgrades	45
Abbildung 9: Ökologischer Fußabdruck des MIV in Abhängigkeit vom Besetzungsgrad	47
Abbildung 10: Vergleich des Ökologischen Fußabdruckes anhand eines Personenkilometers bei der U2-Verlängerung und dem Referenzsystem „motorisierter Individualverkehr“.....	48
Abbildung 11: Vergleich der Ergebnisse mit der Studie von Merseyside.....	49
Abbildung 12: Aggregationsbaum der GEMIS 4.5 Prozesse	70

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Land- und Landnutzungskategorien [17, S. 93]	6
Tabelle 2: Material- und Energiekonsumenten der beiden Verkehrssysteme	14
Tabelle 3: Abschreibedauer von Fahrzeugen und Bauwerken	15
Tabelle 4: Bauabschnitte laut Plan.....	17
Tabelle 5: Stationsübersicht und Stationsabstände laut Plan.....	17
Tabelle 6: Prognose der Personenkilometer (Pers-km) pro Tag und Jahr für die U2 Verlängerung in beiden Fahrtrichtungen (Bezugsjahr 2025)	18
Tabelle 7: Ermittlung des Auslastungsgrades der U2-Verlängerung (Bezugsjahr 2025)	19
Tabelle 8: Transportleistung im Jahr 2025 (Zahlen sind gerundet).....	21
Tabelle 9: Anzahl der Pkws je Fahrtrichtung	22
Tabelle 10: Übersicht zu Landkategorien und korrespondierende Daten der Inventarisierung	23

Tabelle 11: Betrachtete Güter und Energieträger	24
Tabelle 12: Güterzusammensetzung von Pkws	33
Tabelle 13: Güterzusammensetzung von Pkws als Eingabedaten für GEMIS	33
Tabelle 14: CO ₂ -äug. Emissionen und Flächeninanspruchnahme in Abhängigkeit vom Strommix	35
Tabelle 15: Ökologischer Fußabdruck der U2-Verlängerung	40
Tabelle 16: Ökologischer Fußabdruck der U2-Verlängerung und Treibhausgasemissionen	40
Tabelle 17: Ökologischer Fußabdruck der U2-Verlängerung in Abhängigkeit vom Strommix	44
Tabelle 18: Treibhausgasemissionen vom Traktionsstromkonsum in Abhängigkeit vom Strommix	44
Tabelle 19: Ökologischer Fußabdruck der U2-Verlängerung in Abhängigkeit vom Traktionsstromkonsum	45
Tabelle 20: Direkte Flächenbeanspruchung von U-Bahn und MIV	48
Tabelle 21: Kenndaten zur Charakterisierung der Transportleistung der U2 Verlängerung	63
Tabelle 22: Rohdaten der U2-Inventarisierung	64
Tabelle 23: Strom Mix Wien – Verbrauch, Anteil nach Daxbeck [6, S. 98] und GEMIS 4.5	65
Tabelle 24: Strom-Mix Österreich 2010 nach GEMIS 4.5 (El-KW-Park-AT-2010)	65
Tabelle 25: Strom-Mix EU 2010 nach GEMIS 4.5 (El-KW-Park-EU-17-2010)	66
Tabelle 26: Kenndaten zur Ermittlung des ÖF der U2-Verlängerung (Bezugsjahr 2025)	67
Tabelle 27: ÖF zur Bereitstellung der Bauwerke und Fahrzeuge (ohne Abschreibung)	68
Tabelle 28: Straßenbau	68
Tabelle 29: Strom und Wärme für PKW-Herstellung im Werk	69
Tabelle 30: Fahrweg und Parkplätze	70
Tabelle 31: Normierter Ökologischer Fußabdruck des PKW	70
Tabelle 32: Gesamter Ökologischer Fußabdruck der PKW (Bezugsjahr 2025, Besetzungsgrad 1,4)	71
Tabelle 33: Normierter Ökologischer Fußabdruck in Abhängigkeit vom Besetzungsgrad	71
Tabelle 34: ÖF des MIV in Abhängigkeit vom Besetzungsgrad und im Vergleich zum ÖF der Stadt Wien	71



Abkürzungsverzeichnis

ÖF Ökologischer Fußabdruck

Verkehrsträger

MIV Motorisierter Individualverkehr

ÖV Öffentlicher Verkehr

Rad Fahrrad

FG Fußgeher

Einheiten

FZG Fahrzeug

Pers. Person

kg Kilogramm

EW Einwohner

ha Hektar

m² Quadratmeter

a anno

Terminologie

Die Begriffe Stoff, Gut und Material entstammen der Terminologie zur Beschreibung von Stoffhaushaltssystemen und werden wie folgt definiert [vgl. 1]:

- Stoff** Material, das aus identischen Einzelteilen besteht und entweder ein chemisches Element (Einzelteil Atom, z.B.: Natrium, Kohlenstoff oder Kupfer) oder eine chemische Verbindung in reiner Form (Einzelteil Molekül, z.B.: NH₃, CO₂, Kupfersulfat) ist. Keine Stoffe sind z.B.: Trinkwasser, da es nicht nur aus reinem Wasser besteht, sondern auch Kalzium und viele Spurenelemente, oder PVC, da es neben polymerisiertem Vinylchlorid auch Additive enthält.
- Gut** Material, das aus einem oder mehreren Stoffen besteht und handelbar ist
Der Handelswert von Gütern kann je nach Betrachter sowohl positiv (z.B.: Heizöl, Mineralwasser) als auch negativ (z.B.: Restmüll, Abwasser) sein. In besonderen Fällen gibt es Güter, die keinen monetären Wert aufweisen, d.h. sie verhalten sich wertmäßig neutral. Beispiele dafür sind Luft, Kfz-Abgase oder Niederschlag. Ein Gut besteht aus einem oder mehreren Stoffen und ist handelbar. Der Wert von Gütern kann sowohl positiv (Heizöl, Trinkwasser) als auch negativ (Restmüll, Abwasser) sein. In besonderen Fällen gibt es Güter, die keinen Wert aufweisen, d. h. sie verhalten sich wertmäßig neutral. Beispiele dafür sind Luft, Abluft oder Niederschlag.
- Material** übergeordneter Begriff für ein Gut oder einen Stoff
Der Begriff Material wird dann verwendet, wenn Güter und Stoffe betrachtet werden, oder wenn man sich noch nicht festlegen will, auf welcher Ebene (Güter oder Stoffe) eine Untersuchung durchgeführt werden soll. Material schließt Rohmaterialien sowie alle durch biologische, physikalische oder chemische Prozesse veränderten Substanzen ein.



1 Einleitung

Die Stadt Wien hat als strategisches Ziel die Ressourcenschonung festgelegt [2, S. 337], und damit ein Bekenntnis zur kontinuierlichen Verbesserung ihres Ressourcenhaushaltes abgegeben. Die zentrale Frage lautet: Wie kann der Stoffhaushalt der Stadt Wien langfristig ressourcenschonend und umweltverträglich gebaut und betrieben werden? In den Jahren 1994 – 2003 wurden deshalb neben der Ermittlung des Ökologischen Fußabdruckes auch Stoffbilanzen als notwendige Informationsgrundlage erkannt und erstellt [3-9]. Damit wurde ein entscheidender Schritt am Weg zur ökologischen Nachhaltigkeit gesetzt [vgl. 10].

Das vorliegende Projekt schließt sich dieser Initiative an und liefert weitere Grundlagen in Hinblick auf die Optimierung des Stoffhaushaltes der Stadt Wien. Im Speziellen wird bei den Wiener Linien GmbH & Co KG – einem Geschäftsbereich der Wiener Stadtwerke Holding AG - gezeigt, wie der Weg vom ökologischen Fußabdruck zum zielorientierten Umwelt- und Ressourcenmanagement beschritten werden kann, welcher Nutzen dabei entsteht und welche Datenlage dafür erforderlich ist.

Ein Indikator, der im Zusammenhang von nachhaltiger Entwicklung oft herangezogen wird, ist der sogenannte „Ökologische Fußabdruck“. Aufgrund seiner einfachen Verständlichkeit und dem damit verbundenen Bekanntheitsgrad kommt ihm bei der Öffentlichkeitsarbeit, teilweise auch zu Bildungszwecken, eine besondere Relevanz zu [11].

Der ökologische Fußabdruck der Stadt Wien ist mit jenen anderer Großstädte vergleichbar und mit 3,9 ha/EW eher unterdurchschnittlich. Um sich dem umweltverträglichen Grenzwert von 1,7 ha/EW [6] anzunähern, sind weiterhin Maßnahmen zu dessen Reduktion erforderlich. Dabei spielt das Maßnahmenfeld Mobilität eine wichtige Rolle. Österreichweit beträgt der Anteil der Mobilität am nationalen Fußabdruck 22% [12], wobei 90% durch den motorisierten Individualverkehr und Flüge verursacht werden [13]. Wenngleich in Wien 34% der Wege mit dem ÖV zurückgelegt werden, und damit doppelt so viele im Vergleich Gesamtösterreich [14, S. 98], so ist weiterhin ein verkehrspolitisches Ziel der Stadt Wien, den Modal Split noch mehr zugunsten der sanften Mobilitätsformen (ÖV, Rad, FG) zu verschieben [15]. Damit plant Wien einen signifikanten Beitrag zur Reduktion des Ökologischen Fußabdruckes.

Mit der im zweiten Arbeitspaket angestrebten Informationsgrundlage für Ressourcen- und Umweltmanagement am Beispiel der Wiener Linien wird der in Wien begonnene Weg zum umweltverträglichen urbanen Stoffhaushalt fortgesetzt.



2 Ziele und Fragestellungen

Das vorliegende Kapitel formuliert die Ziele und Fragestellung in Bezug auf das erste Arbeitspaket, in dem der Indikator „Ökologischer Fußabdruck“ berechnet wird. Die Ziele und Fragestellungen des zweiten Arbeitspaketes „Wissensbasis für Ressourcen- und Umweltmanagement“ werden hier nicht behandelt.

2.1 Ziele

Ziel ist, die beiden technischen Verkehrssysteme „U-Bahn“ und „motorisierter Individualverkehr“ mit Hilfe des Bewertungsindikators „Ökologischer Fußabdruck“ zu vergleichen. Gegenstand der Untersuchung ist die neu gebaute Verlängerung der Wiener U-Bahnlinie 2 von Station „Schottentor“ bis „Seestadt“ sowie ein MIV Referenzsystem mit der gleichen Transportleistung.

2.2 Fragestellungen

Aus der Zielsetzung leiten sich folgende methodischen und inhaltlichen Fragestellungen ab:

Methodisch:

1. Welche Vorgangsweise ist geeignet, um einen konkreten Streckenabschnitt einer Verkehrsinfrastruktur im Sinne des Ökologischen Fußabdruckes zu bewerten?
2. Welcher zukünftige Stellenwert lässt sich dem Indikator beim Ressourcen- und Umweltmanagement der Wiener Linien zuschreiben?
3. Welche Bewertungsmethoden erweitern oder ergänzen die Originalmethode zur Berechnung des Fußabdruckes nach Wackernagel und Rees?

Inhaltlich:

1. Welche Verkehrsmittelwahl (U-Bahn vs. PKW) führt zu einem geringeren Ökologischen Fußabdruck?
2. Inwiefern wirkt sich die U2-Verlängerung auf den Ökologischen Fußabdruck der Stadt Wien aus?
3. Welche Maßnahmen leiten sich aus dem Bewertungskonzept Ökologischer Fußabdruck ab, um den Fußabdruck der Stadt Wien beziehungsweise der Wiener Linien zu senken?



3 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der Bewertungsmethode „Ökologischer Fußabdruck“ erläutert. Dabei wird der methodische Ansatz kurz umrissen, der Berechnungsalgorithmus dargestellt und durch Fallbeispiele in seiner Anwendung demonstriert.

3.1 Der Ökologische Fußabdruck nach Wackernagel und Rees

3.1.1 Konzept

Sowohl der Begriff, als auch die Methode zur Berechnung des Ökologischen Fußabdruckes stammen ursprünglich von Mathis Wackernagel und William Rees. Wackernagel verwendete den Begriff auch im Titel seiner Dissertation „Ecological footprint and appropriated carrying capacity: a tool for planning toward sustainability“ [16]. Später erschien zuerst auf Englisch, dann auf Deutsch das Buch mit dem Titel „Our Ecological Footprint“ beziehungsweise „Unser Ökologischer Fußabdruck“ [17].

Ökologischer Fußabdruck vs. ökologische Tragfähigkeit

Laut den Autoren handelt es sich beim Ökologischen Fußabdruck um ein Werkzeug, das dazu dient, den Verbrauch von „Natur“, sprich Ökosystemen, durch den Menschen zu messen [vgl. 17]. Dabei werden die vom Menschen genutzten ökologisch produktiven Flächen den vorhandenen ökologisch produktiven Flächen gegenüber gestellt. Die gemeinsame Bezugsgröße wird Flächeneinheiten (z.B.: Hektar) ausgedrückt. Dadurch soll gezeigt werden, wie sich Belastung und Tragfähigkeit der Natur zueinander verhalten.

Ökologischer Fußabdruck

„Der ökologische Fußabdruck einer gegebenen Bevölkerung (oder deren Wirtschaft) kann als das Gebiet von biologisch produktivem Land (und Wasser) in verschiedenen Kategorien wie Ackerland, Weiden, Wäldern usw. definiert werden, das erforderlich wäre, um mit der heutigen Technologie für diese Bevölkerung

1. alle konsumierte Energie und alle materiellen Ressourcen bereit zu stellen und
2. allen Abfall zu absorbieren,

wo auch immer auf der Erde sich die Flächen befinden“ [17, S. 77].

Wackernagel und Rees unterscheiden bei der Anwendung unterschiedliche Konsumkategorien [17, S. 90]: Nahrung, Wohnen, Transport, Konsumgüter, und Dienstleistungen.

Des Weiteren differenzieren die Autoren [17] acht unterschiedliche Land- und Landnutzungskategorien, auf die sich der Ökologische Fußabdruck einzelner Konsumkategorien, Dienstleistungen, Regionen oder Staaten aufteilt (s. Tabelle 1).

Tabelle 1: Land- und Landnutzungskategorien [17, S. 93]

Gruppen	Landkategorien
I. Land für Fossilenergie	a. Land, das durch fossile Energie verwendet wird („Energiland“)
II. Verbrauchtes Land	b. verbautes Land (versiegelte Flächen)
III. Heute beanspruchtes Land	c. Gärten (Land, das reversibel bebaut ist) d. Ackerland (kultiviertes Land) e. Weiden (Land, das durch landwirtschaftliche Tiernutzung beweidet wird) f. Kulturwald (Wald als von Menschen verwendete und bewirtschaftete Kulturfläche)
IV. Begrenzt nutzbares Land	g. unberührte Wälder (natürliche produktive Ökosysteme) h. nichtproduktive Flächen (Wüsten, Berggipfel, Eis)
V. Meeresflächen	

Ökologische Tragfähigkeit

Das von Wackernagel und Rees dargestellte Berechnungsschema muss, um eine Aussage über die Auswirkung menschlichen Handelns zeigen zu können, in einen Zusammenhang gebracht werden, da das Ergebnis für sich alleine stehend kaum Bedeutung hat. Aus diesem Grund verwenden die Autoren den Begriff der „Tragfähigkeit“ („carrying capacity“) einer Region. Diese ist begrenzt durch die in einer Region, sei es die Erde oder ein Staat, vorhandene biologisch produktive Fläche. Dazu zählen nicht nur Land-, sondern auch Wasserflächen.

Die „Tragfähigkeit“ wird nun über den Vergleich der in der Region vorhandenen biologisch produktiven Fläche mit dem Verbrauch dieser Fläche durch die in Tabelle 1 beschriebenen Landnutzungen bestimmt. Ausgedrückt werden sowohl Verbrauch, als auch Reserven, je Einwohner und Jahr.

Exkurs: Methodische Integration fossiler Energieträger

Ein besonderer Aspekt bei der Methode nach Wackernagel und Rees ist der Umgang mit fossilen Energieträgern. Die versiegelten Flächen (für Förderung, Bereitstellung, etc.) spielen im Gegensatz zum Energieland keine signifikante Rolle¹. Für die Inkludierung fossiler Energieträger gibt es drei verschiedene Ansätze, von denen sich der „CO₂ Absorptionsansatz“ durchgesetzt hat [18]. Dabei werden jene Waldflächen in Rechnung stellt, die zur

¹ Hier muss jedoch festgehalten werden, dass auch die Förderung in den betroffenen Gebieten – etwa dem Nigerdelta oder dem Kaspischen Meer – große Schäden an der Umwelt anrichtet.



Absorption fossiler CO₂ Emissionen erforderlich sind [17, S. 97 ff, 18]. Nachdem die nicht-erneuerbaren Ressourcen lediglich indirekt über den Energieaufwand (und dessen CO₂) Emission der Vorketten berücksichtigt werden [11, S. 48], dominieren die Energieflächen oftmals den Ökologischen Fußabdruck. Dies führte dazu, dass in vielen Studien nur mehr der CO₂ berücksichtigt werden, was zum Ausdruck „Carbon Footprint“ geführt hat [18]. CO₂ ist auch die einzige Emissionskategorie im gesamten Emissionsspektrum, die von Wackernagel und Rees im Sinne des Landverbrauches² Berücksichtigung findet.

3.1.2 Berechnung des Ökologischen Fußabdruckes

Die Berechnung des Indikators nach Wackernagel und Rees basiert auf den nachfolgenden Überlegungen [17, S. 89].

$$\text{Formel 1} \quad fl_i = v_i / p_i$$

fl_i Belegung der ökologischen Fläche für jedes Gut i (ha/EW)

v_i Jährlicher Verbrauch des Gutes i (kg/EW.a)

p_i ökologische Produktivität / Ernte (kg/ha.a)

$$\text{Formel 2} \quad \ddot{öf} = \sum_{i=1}^n fl_i$$

$\ddot{öf}$ ökologischer Fußabdruck für n Güter

3.2 Anwendungsbeispiele

Im folgenden Abschnitt werden exemplarisch einzelne Anwendungsbeispiele vorgestellt. Die Fallstudien verfolgen entweder einen geografischen, sektoralen oder aktivitätsbezogenen Ansatz.

3.2.1 Geografischer Ansatz

Weltweiter und nationaler Kontext

Wird als Systemgrenze die Erde in ihrer Gesamtheit gewählt, so berechnen Wackernagel und Rees [17], die biologisch produktive Fläche mit 1,7 [ha/EW.a]. Wird dieser Wert durch den Ressourcenkonsum der Menschen überschritten, so führt dies nach Meinung der Erfinder des ÖF zum Konflikt mit der Nachhaltigkeit des Systems. Darüber hinaus verringert sich die biologisch produktive Fläche je Einwohner im darauf folgenden Jahr.

² Die Ressource „geeignete Senke“ für eine stoffliche Emission wird von Wackernagel und Rees (außer für CO₂) nicht behandelt.

Neben der Erde werden of Staats- oder Regionsgrenzen als Systemgrenzen gewählt. Dabei wird dann die in dem Staat oder der Region vorhandene biologisch produktive Fläche mit dem Verbrauch verglichen. Oftmals ist hier der Verbrauchswert oft deutlich höher als die vorhandenen Ressourcen, besonders in dicht besiedelten Gebieten und/oder Gebieten mit hohem Ressourcenumsatz [vgl. 6, 17].

Städtischer Kontext

Urbanisierung spielt bei der Nutzung natürlicher Ressourcen eine wichtige Rolle. Dies zeigt sich auch in der Vielzahl der Studien zum Ökologischen Fußabdruck von Städten. Hier wird lediglich auf die Stadt Wien und die Stadt York (Großbritannien) eingegangen.

Daxbeck et al. [6] berechnete 2001 im Auftrag der Magistratsabteilung 22 den Ökologischen Fußabdruck der Stadt Wien. Zuerst verwendete er die klassische Methode nach Wackernagel und Rees [17], um die Vergleichbarkeit mit anderen Städten herzustellen. In der Gegenüberstellung mit Berlin, London, Toronto und Santiago de Chile zeigt sich, dass Wien einen unterdurchschnittlichen Fußabdruck im Ausmaß von 3,9 ha/EW besitzt. Darüber hinaus wurde eine modifizierte Berechnungsweise verwendet, die „Volumetrische Ressourcen“ wie Baustoffe berücksichtigt.

Barret et al. [19] führte seine Studie für die Stadt York durch. Im Gegensatz zu anderen Studien kombinierten Barret et al. die Methode des Ökologischen Fußabdruckes mit der Materialflussanalyse und bezogen sich dabei auf Quellen des Wuppertal Institutes. Wie Daxbeck et al. fanden auch diese Autoren einen signifikanten Anteil der Mobilität am Ökologischen Fußabdruck der Stadt, hauptsächlich durch die zu absorbierenden CO₂ Emissionen und den hohen direkten Flächenbeanspruchung des Motorisierten Individualverkehrs. Der Sektor Mobilität steht für 0,58 [ha/Pers], wobei 0,54 [ha/Pers] (93%) auf den motorisierten Individualverkehr entfallen. Für den Vergleich mit der vorliegenden Studie sind diese Daten auf jeden Fall von Bedeutung, da die Komponente „Personentransport“ sehr detailliert ausgearbeitet und dargestellt ist.

3.2.2 Sektoraler Ansatz: Der Fußabdruck des Bausektors

An dieser stellt werden zwei Arbeiten exemplarisch angeführt, da sie eine Erweiterung der Methode ÖF charakterisieren. Erstere berücksichtigt das gesamte Emissionsspektrum, zweitere inkludiert graue Energieumsätze des Ressourcenkonsums.

Im Zuge der weitreichenden Anwendung des ÖF fand auch eine methodische Weiterentwicklung in Form des „Sustainable Process Index“ (SPI) [20] statt. Anwendung fand das Konzept beispielweise bei König und Krotscheck [21]. Dabei wurden für den Bausektor



die Bauinfrastruktur und die Nutzung bewertet. Im Gegensatz zur Methode von Wackernagel und Rees beziehen die Autoren hier weitere Emissionen (z.B.: NO_x) und das korrespondierende Verdünnungspotential (z.B.: Luftvolumen) an.

In Italien führten Bastianoni et al. [22] eine Ökologische Fußabdruckberechnung für Baustoffe durch. Die betrachteten Flächenkomponenten sind versiegelte Flächen durch Bautätigkeiten, verbrauchte Waldflächen und Energieflächen zur Absorption von CO_2 Emissionen. Bei letzteren ist zu erwähnen, dass die Autoren sich nicht nur auf den unmittelbaren CO_2 Ausstoß beziehen, sondern im Sinne eines Lebenszyklusansatzes den gesamten CO_2 Rucksack eines Baustoffes inkludieren.

3.2.3 Aktivitätenansatz: Transport & Kommunikation

Nachdem zahlreiche Fußabdruckstudien den Anteil des Verkehrs am Ökologischen Fußabdruck von Städten ausweisen [vgl. etwa 6, 17, 19], wird der Verkehr als Teil der Aktivität „Transport & Kommunikation“ auch isoliert und unabhängig von anderen Aktivitäten betrachtet.

Ein Beispiel dazu liefern Wackernagel und Rees [17, S. 147ff] mit einem Vergleich verschiedener Personenverkehrsmittel (Fahrrad, PKW, und Öffentlicher Busverkehr). In der Berechnung wurden neben den Energieflächen auch versiegelte Verkehrsflächen berücksichtigt. Demnach beansprucht einen Pkw-Fahrt rund $0,52 \text{ m}^2/\text{Pkw-km}^3$.

Bei der Studie von Barret und Scott [23] wird der ÖF des Personentransport in der Region Merseyside (GB) ermittelt. Auch hier werden verschiedene Transportmittel verglichen. Das Ergebnis zeigt, dass der ÖF des PKW-Transports bei $0,83 \text{ m}^2/\text{Pkw-km}^4$ liegt.

³ Hilfsrechnung: $1.200 \text{ [m}^2/\text{PKW}] / 10 \text{ [km]} / 230 \text{ [d]} = 0,52 \text{ [m}^2/\text{PKW-km}]$

⁴ Hilfsrechnung: $0,59 \text{ [m}^2/\text{PKW}] / 1,6 \text{ [Pers]} = 0,83 \text{ [m}^2/\text{PKW-km}]$



4 Ermittlung des Ökologischen Fußabdruckes

Im vorliegenden Kapitel sind die Grundlagen zur Ermittlung des Ökologischen Fußabdruck, sowohl von der U2-Verlängerung als auch jene des Referenzsystems „Motorisierter Individualverkehr“ angeführt.

4.1 Vorgangsweise

Folgende Vorgangsweise zur Ermittlung des ÖF wird angewandt:

1. Zieldefinition
2. Definition der Berechnungsgrundlagen
3. Definition der Systemgrenzen
4. Definition der funktionellen Einheit
5. Systembeschreibung
6. Inventarisierung (Datenerfassung)
7. Berechnung des ÖF
8. Darstellung und Interpretation der Ergebnisse

4.2 Zieldefinition

Ziel ist, die beiden Verkehrsmittel „U-Bahn“ und „PKW“ mit Hilfe des Bewertungsindicators Ökologischer Fußabdruck zu vergleichen.

4.3 Berechnungsgrundlagen

4.3.1 Methode

Die verwendete Methodik baut prinzipiell auf jener von Wackernagel und Rees [17] auf (siehe Kap. 3.1.2, S. 7). Dabei wird das durch die beiden Systeme „U-Bahn“ und „MIV“ in Anspruch genommene Land ermittelt.

Um die Aktivität „Transport“ abzubilden, bedarf es selektiver Adaptionen, die eine Abweichung von der Originalmethodik darstellen [vgl. 22, 23, 24, 25]:

- (1) Um dem Lebenszyklusgedanken gerecht zu werden, wird nicht nur die direkte Flächenbeanspruchung berücksichtigt, sondern auch jene die in den Vorketten (Ressourcenabbau, Materialherstellung) anfällt. Das bedeutet für die Energieflächen, dass alle CO₂-Emissionen entlang des Lebenszyklus eines Materials in die Berechnung mit einbezogen werden (s. Daxbeck et al. [6] für eine ähnliche Vorgangsweise).

- (2) Der ÖF setzt sich in der vorliegenden Arbeit lediglich aus den beiden Gruppen „Energiefläche“ und „beanspruchtes Land“ zusammen. Eine weiterführende Differenzierung in Waldflächen, Weideflächen, bereits bebaute Flächen, oder Meeresflächen wird nicht vorgenommen. Wenngleich dies bei ähnlichen Fußabdruckstudien der Fall ist [vgl. 23, 26], so wird im gegenständlichen Fall davon abgewichen. Zurückgeführt wird dies auf die mangelnde Nachvollziehbarkeit in der direkten Zuordnung der Flächentypen zu den energetischen und materiellen Ressourcennutzungen. Somit wird ein aggregierter Flächenwert verwendet, der jede beanspruchte Fläche als „biologisch produktiv“ voraussetzt.

4.3.2 Algorithmus

Ökologischer Fußabdruck

Der gesamte Ökologische Fußabdruck ergibt aus der Summe von „Land für Fossilenergie“ und „beanspruchtem Land“, nach Formel 3 zu:

Formel 3
$$\ddot{öf} = \sum_{i=1}^n fl_i$$

öf ökologischer Fußabdruck

Land für Fossilenergie

Zusätzlich wird der Flächenbeanspruchung, der für die Absorption von CO₂ Emissionen notwendig ist, in Rechnung gestellt. Dieses „EnergieLand“ wird über die Waldfläche, die notwendig ist, um das emittierte CO₂ zu fixieren, ermittelt. Der englische Fachausdruck dafür lautet „sequestration rate“ (Sequestrationsrate), kurz *SR*. Scotti et al. [27] gibt hierfür Werte für Europäische Wälder an. Demnach ergibt sich Formel 4, welche äquivalent zu Formel 5 ist, zu:

Formel 4
$$fl_i = e_i * SR$$

fl_i Belegung der ökologischen Fläche für jedes Gut *i* (ha/Pers-km)
e_i CO₂ Emission des Gutes *i* (kg CO₂/Pers-km), z.B.: Energieaufwand
SR Sequestrationsrate (ha/kg CO₂)

Beanspruchtes Land

Die Flächenbeanspruchung von Materialien wird über Formel 5 ermittelt:

Formel 5
$$fl_i = v_i * p_i$$

fl_i Belegung der ökologischen Fläche für jedes Gut *i* (ha/Pers-km)
v_i Verbrauch des Gutes *i* (kg/Pers-km) oder (kWh/Pers-km)



p_i Spezifischer Flächenbeanspruchung je Einheit des Gutes i (ha/kg) oder (ha/kWh)

Während v_i über das Inventar ermittelt wird (s. Kap. 4.6, S. 22), müssen für den spezifischen Flächenbeanspruchung p_i Literaturwerte verwendet werden (s. Kap. 4.7, S. 34).

4.4 Systemgrenzen und funktionelle Einheit

4.4.1 Grundlagen bei der Wahl von Systemgrenzen

Ein betrachtetes System definiert sich über seine Grenzen, wobei der Plural bewusst gewählt wird. Die häufigste Anwendung des ÖF bezieht sich auf geografisch-administrative Grenzen – also Nationalstaaten, Regionen oder Städte [vgl. 6, 17, 18, 19] – und ermittelt basierend auf statistischen Daten den ÖF, der für die Bereitstellung und Entsorgung von Gütern und Dienstleistungen in der jeweiligen Region pro Jahr notwendig ist.

Zusätzlich zur räumlichen Systemgrenze wird häufig auch eine thematische Grenze verwendet, welche sich auf die Bereitstellung und Entsorgung eines Gutes, wie etwa einer Tomate, den Bausektor einer Stadt, oder eben Transportservices, bezieht [17, 21, 23, 26].

Die Wahl des betrachteten Systems und seine Grenzen hat grundlegende Konsequenzen für die Ermittlung des Inventars.

Im ersten Fall (geografisch-administrative Systemgrenze) werden als Datengrundlage nationale und regionale Statistiken verwendet. Diese können eins zu eins als Inventar verwendet werden. Man spricht in diesem Falle von einem „top-down“ Ansatz [28].

Im zweiten Fall (thematische Grenze) sind häufig keine Statistiken vorhanden. Dies führt dazu, dass das Inventar erst durch eine aufwendige Datensammlung erstellt werden muss. Man spricht dann von einem „bottom-up“ Ansatz [vgl. 28]. Der Aufwand für die Datensammlung hängt von der Komplexität des betrachteten Systems ab. So ist etwa die Ermittlung des Inventars für den Transport mit einem Fahrrad weniger aufwendig als für den Transport mit einem hochtechnologischen Gerät wie einer Eisenbahn. Dies liegt am höheren und vielfältigerem Güter- und Stoffeinsatz. Anhand des Eisenbahnbeispiels wird deutlich, dass die „Inventarliste“ beim „bottom-up“ Ansatz nie vollständig erstellt werden kann, da nicht alle Materialien aus der Bereitstellung samt Vorketten berücksichtigt werden können. In diesem Falle schlagen sowohl Wackernagel und Rees [17], als auch Lewan und Simmons [28] eine sinnvolle Abgrenzung vor, um nur die bezüglich Masse und Umweltauswirkungen wichtigsten Materialien mit einzubeziehen.

4.4.2 Systemgrenzen

(1) Verkehrssystemgrenze

Die Verkehrssystemgrenze bezieht sich auf den Verkehrskorridor zwischen Schottenring im 1. Wiener Gemeindebezirk und der geplanten Seestadt, im 22. Wiener Gemeindebezirk. In diesem Korridor befindet sich das System „U2-Verlängerung“ von Station Schottentor bis Seestadt und das Referenzsystem „MIV“. Im Referenzsystem „MIV“ wird die gleiche Personentransportleistung erbracht, wie im System „U2-Verlängerung“. Das Sekundärnetz des ÖV sowie induzierte Siedlungsentwicklungen werden nicht berücksichtigt.

Folgende Material- und Energiekonsumenten werden berücksichtigt:

	System „U2-Verlängerung“	Referenzsystem „MIV“
BEREIT- STELLUNG	Ingenieurbauwerke (Fahrweg, Tunnels, Brücken) und Stationen	Straßenbauwerk
	Wagenmaterial	Fahrzeuge
	Deponierung von Baustellenabfällen	-
BETRIEB	Energiekonsum zur Traktion und Heizung/Kühlung der Fahrzeuge; Energiekonsum Strom, Erdgas, und Wärme zum Betrieb der Stationen	Energiekonsum für den Betrieb der Fahrzeuge

Tabelle 2: Material- und Energiekonsumenten der beiden Verkehrssysteme

(2) Räumliche Systemgrenze

Beim Ökologischen Fußabdruck werden sowohl die unmittelbaren Auswirkungen in Wien und Umgebung, als auch jene im globalen Hinterland, betrachtet. Dabei wird zwischen den beiden weder qualitativ, noch quantitativ eine Unterscheidung gemacht. Somit wird beispielsweise sowohl die direkte Flächenbeanspruchung durch Versiegelung in Wien, als auch die Flächenbeanspruchung durch den Abbau von Rohstoffen in anderen Ländern, berücksichtigt.

(3) Zeitliche Systemgrenze

Die zeitliche Systemgrenze beträgt aus Gründen der Vergleichbarkeit ein Jahr. Die in Anspruch genommenen Flächen zur Herstellung der Baumaterialien und der Fahrzeuge werden mit der jeweiligen angenommenen Lebensdauer abgeschrieben.



Tabelle 3: Abschreibedauer von Fahrzeugen und Bauwerken

Transportmittel	Produkt	Angenommene Lebensdauer bzw. Abschreibedauer
U-Bahn	Ingenieurbauwerke und Stationen	100 Jahre
U-Bahn	Fahrzeuge	30 Jahre
U-Bahn	Bauabfalldéponie	100 Jahre
Pkw	StraÙe + Parkplätze	25 Jahre
Pkw	Fahrzeuge	10 Jahre

Für die Normierung des Ökologischen Fußabdruckes je Passagierkilometer ist die Anzahl der Passagiere notwendig. Da die U2 bis zum Endbahnhof „Seestadt“ frühestens ab 2013 in Betrieb genommen wird liegen noch keine Passagierzählungen vor. Aus diesem Grund werden Verkehrsprognosen verwendet (s. Kap. 4.5.1.1, S. 15). Diese beziehen sich auf das Jahr 2025.

4.4.3 Funktionelle Einheit

Für den Vergleich des ÖF der U2-Verlängerung mit dem PKW-Transport wird die funktionelle Einheit „Quadratmeter pro Personenkilometer“ [$m^2/Pers\text{-}km$] gewählt.

Der absolute Ökologische Fußabdruck wird für die Bereitstellung der materiellen und energetischen Ressourcen sowie für die Errichtung der Bauwerke in Hektar [ha] angegeben. Für die jährliche Darstellung erfolgt die Angabe in Quadratmeter pro Jahr [m^2/a]. Dafür werden die Aufwendungen zur Bereitstellung von Gütern und Energie mit der produktspezifischen Lebensdauer lt.

Tabelle 3 beschrieben und dem jährlichen Aufwand des Betriebes hinzugerechnet.

4.5 Systembeschreibung

4.5.1 System „U2 Verlängerung“

4.5.1.1 Verkehrssystem

(1) U-Bahnlinie 2

Bis 2008 führte die U2 von der Haltestelle Karlsplatz über die ehemalige „2er-Linie“ bis zum Schottentor. Dabei teilte sich die U2 zwei Umsteigestationen mit der U4 (Karlsplatz, Schottenring), einen mit der U3 (Volkstheater), und einen mit der U1 (Karlsplatz).

Die weitere Verlängerung der U2 erfolgte beziehungsweise erfolgt in drei Projektschritten. Der erste Schritt war die Fertigstellung des Abschnittes von der bisherigen Endhaltestelle Schottentor bis zur Haltestelle Stadion. Dieser Abschnitt wurde rechtzeitig von der Fußball

Europameisterschaft 2008 fertig gestellt. Der zweite Abschnitt wird mit Anfang Oktober 2010 eröffnet und führt von der Haltestelle „Stadion“ bis zur „Aspernstraße“. 2013 soll die Linie bis zum neuen Siedlungsgebiet „Seestadt Aspern“ verlängert werden. Ab frühestens 2018 soll auch der Südabschnitt von der Station Karlsplatz bis zur Station Gudrunstraße eröffnet werden. Abbildung 1 gibt einen Überblick über die U2 samt Verlängerungen und Verlängerungsplänen.

Abbildung 1: U-Bahnlinie U2 – Bestandsstrecke und Ausbaustufen



Die hier durchgeführte Arbeit bezieht sich auf den **Streckenabschnitt U2-Schottenring bis U2-Seestadt**. In weitere Folge bezieht sich der Ausdruck „U2 Verlängerung“ auf diesen Streckenabschnitt.

(2) *U2-Verlängerung: Von U2-Schottenring bis U2-Seestadt*

Die U2 Verlängerung erstreckt sich über eine Länge von 13.3 [km] und verlängert somit die bisherige Strecke von Karlsplatz bis Schottenring auf 16.8 [km] [29]. Diese Werte ergeben eine geringe Abweichung zu den Werten aus dem Plan beziehungsweise aus der Aufsummierung der Bauabschnitte. Grund dafür ist, dass a) die Stationsabstände und Bauabschnitte nicht identisch sind, und b) der Stationsabstand an der Endstation die Abstell- und Revisionshalle nicht mit eingerechnet. Tabelle 4 zeigt die Auflistung der Bauabschnitte, Tabelle 5 die Stationsübersicht und Stationsabstände.



Tabelle 4: Bauabschnitte laut Plan

Bauabschnitt laut Plan	Länge [m]
U2-1	794
U2-2	1.398
U2-3	602
U2-4	1.537
U2-5	991
U2-6	1.236
U2-7	890
U2-8	1.102
U2-9	1.140
U2-10	669
U2-11-16	4.462
Gesamt	14.821

Tabelle 5: Stationsübersicht und Stationsabstände laut Plan

Nr.	Abschnitts- fangsstation	Stationsabstand ⁵ zur nächsten Station [m]	Lage
1	Schottentor	753	Tief
2	Schottenring	700	Tief
3	Taborstraße	958	Tief
4	Praterstern	833	Tief
5	Messe	777	Hoch
6	Trabrennstraße	661	Hoch
7	Stadion	1.127	Hoch
8	Donaustadtbrücke	855	Hoch
9	Seestern	1.177	Hoch
10	Stadlau	638	Hoch
11	Hardegggasse	682	Hoch
12	Donauspital	799	Hoch
13	Aspernstraße	857	Hoch
14	Hausfeldstraße	1.417	Hoch
15	Aspern Flugfeld	1.287	Hoch
16	Seestadt	0	Hoch
Summe = 13.521			

⁵ Laut Lageplan

(3) Fahrgastzahlen

Im Rahmen einer Netzanalyse hat das Österreichische Institut für Raumplanung ÖIR die geplant Ausbauten des öffentlichen Wiener Verkehrsnetzes untersucht. Dabei wurden die Fahrgastzahlen für die den U2 Ausbau erhoben und prognostiziert [29, 30]. Die prognostizierte Transportleistung beträgt somit rund **186,7 Mio. [Pers-km/a] im Jahr 2025** (s. Abbildung 2 und Tabelle 6).

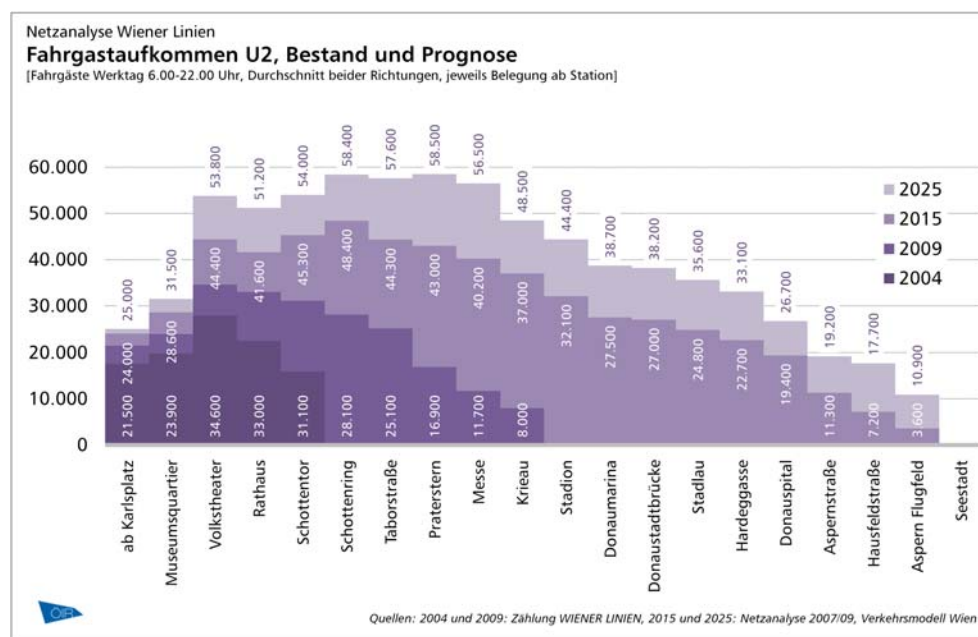


Abbildung 2: Fahrgastaufkommen U2 [30]

Tabelle 6: Prognose der Personenkilometer (Pers-km) pro Tag und Jahr für die U2 Verlängerung in beiden Fahrtrichtungen (Bezugsjahr 2025)

Querschnitt	Länge zwischen Stationen	Personen je Querschnitt	Pers-km je Tag	Pers-km je Jahr (gerundet)
	m	Pers/d	Pkm/d	Pkm/a
ab Schottentor	753	54.000	40.600	14.800.000
Schottenring	700	58.400	40.900	14.900.000
Taborstraße	958	57.600	55.200	20.100.000
Praterstern	833	58.500	48.700	17.800.000
Messe	777	56.500	43.900	16.000.000
Krieau	661	48.500	32.100	11.700.000
Stadion	1.127	44.400	50.100	18.300.000
Donaumarina	855	38.700	33.100	12.100.000
Donaustadtbrücke	1.177	38.200	45.000	16.400.000
Stadlau	638	35.600	22.700	8.300.000
Hardeggasse	682	33.100	22.600	8.200.000
Donauspital	799	26.700	21.300	7.800.000
Aspernstraße	857	19.200	16.400	6.000.000
Hausfeldstraße	1.417	17.700	25.100	9.200.000
Aspern Flugfeld	1.287	10.900	14.000	5.100.000
Seestadt				
Total	13.521	39.867	511.700	186.700.000



(4) Fahrleistung und Anzahl der Züge

Laut Angaben der Wiener Linien legt die U2 nach dem Ausbau auf der Strecke Karlsplatz – Seestadt 2,9 Mio [FZG-km/a] zurück [31]. Dies entspricht einem durchschnittlichen Zugintervall von 5 Minuten. Bezogen auf die U2-Verlängerung „Schottenring-Seestadt“ ergibt sich hier eine **Fahrleistung** von rund **2,3 Mio. [FZG-km/a]**.

Analog dazu reduziert sich die Anzahl der Züge, um diese Strecke zu bedienen, von 19 (Gesamtstrecke Karlsplatz – Seestadt) auf 15 Züge (Schottenring-Seestadt) [31]. Diese haben eine durchschnittliche Lebensdauer von 30 Jahren [32].

(5) Auslastungsgrad

Der Auslastungsgrad ist die Anzahl der transportierten Personen in Bezug auf das gesamte Platzangebot in den U-Bahngarnituren. Die Darstellung des ÖF erfolgt in Abhängigkeit der platzbezogenen Auslastung der U-Bahngarnituren, um die Elastizität zwischen Modal-Split Änderungen und dem ÖF darstellen zu können. Tabelle 7 zeigt die Berechnungsgrundlagen für den prognostizierten Auslastungsgrad von 9,5% für das Jahr 2025.

Tabelle 7: Ermittlung des Auslastungsgrades der U2-Verlängerung (Bezugsjahr 2025)

Bezeichnung	Betrag	Einheit	Anmerkung
Fahrzeugkilometer	2.3 Mio.	FZG-km/a	
Plätze je FZG-Garnitur	878	Plätze	Quelle: [33]
Sitzplätze	260	Stück	
Stehplätze	618	Stück	Ann.: 4 Pers./m ² ⁶ , Quelle: [34]
Platzkilometer	2,0 Mio.	Platz-km/a	
Personenkilometer (2025)	190 Mio.	Pers.-km/a	
Auslastungsgrad (2025)	9,5	%	

4.5.1.2 Energie

Aufgrund der ersten Recherche konnten drei relevante Energieträger ermittelt werden: Elektrische Energie, (Fern-)Wärme und Primärenergieträger (Diesel und Erdgas). Diese kommen sowohl im Betrieb, wie auch in der Errichtung zu tragen.

4.5.1.3 Güter

Für die Errichtung des U2-Ausbaus und die Herstellung der Fahrzeuge werden unterschiedlichste Materialien verwendet. Die Verwendung dieser Materialien zieht eine Beanspruchung von Fläche nach sich. So wird beispielsweise beim Tagbau von Metallen wie Aluminium eine bestimmte Menge an Land benötigt. Diese Landfläche geht als Verbrauch in die Berechnung des Fußabdrucks ein.

⁶ Die Dichte von 4 Personen / m² entspricht der europäischen Planungsgröße bei Kapazitätsberechnungen im U-Bahnverkehr. In asiatischen Metropolen wird mit Dichten von 8 Personen / m² gerechnet.

Sowohl die Infrastruktur selbst, als auch die Fahrzeuge bestehen aus einer großen Anzahl an Gütern. Das zeigt auch das Leistungsverzeichnis für Roh- und Stahlbau des U2 Ausbaus, welches über 5.000 Seiten umfasst. Die meisten Güter kommen jedoch in verhältnismäßig so geringen Mengen vor, dass sie kaum Einfluss auf das Ergebnis haben.

Aus diesen Gründen werden nur diejenigen Güter mit einbezogen, die aufgrund ihrer Eigenschaften und Menge als relevant betrachtet werden können. Welche Materialien dies sind, wird aufgrund von Literatur und Expertenmeinung festgelegt [31, 35, 36].

Die untersuchten Güter sind:

(1) *Beton*

Die Bauwerke (Tunnels, Brücken, Gebäude) des U2 Ausbaus bestehen hauptsächlich aus Beton, weswegen Beton in die Berechnung mit einbezogen wird.

(2) *Stahl*

Das mengenmäßig zweitwichtigste Gut in den Gebäuden ist Bau- und Betonstahl. Wenn auch die Gesamtmenge mit großer Wahrscheinlichkeit kleiner als bei Beton ist, so ist jedoch der Energiekonsum für eine Einheit Stahl höher.

(3) *Aluminium*

Mengenmäßig weniger wichtig ist Aluminium. Jedoch ist die Herstellung von Aluminium sehr energieintensiv (Faktor 7 im Vergleich zu Stahl), weswegen Aluminium, das hauptsächlich für die Züge, Verkleidungen in den Stationen und Installationen verwendet wird, berücksichtigt wird.

(4) *Kupfer*

Kupfer kommt in großen Mengen in den Leitungen einer U-Bahn vor. Da die Herstellung energieintensiver als bei Stahl ist, wird Kupfer mit einbezogen.

4.5.1.4 Flächenbeanspruchung Ablagerung von Abfällen

Die Ablagerungen von Abfällen benötigt eine gewisse Fläche. Besonders bei Bauabfällen kann dies relevant sein, da hier große Mengen zu erwarten sind, wie auch Brunner und Rechberger bezüglich des Stoffhaushaltes der Stadt Wien zeigen [37].

In der vorliegenden Studie werden nur Bauabfälle, nicht jedoch Kommunale Abfälle, die in den Stationen entstehen, berücksichtigt.

4.5.1.5 Direkte Flächenbeanspruchung durch Verbauung

Durch die Errichtung der U-Bahn wird Fläche direkt als Verkehrsfläche beansprucht. Bei unterirdischer Linienführung betrifft dies nur die Stationen, bei oberirdischer Linienführung sowohl Stationen, als auch Fahrwege.



4.5.2 Referenzsystem „Motorisierter Individualverkehr“

Wie schon unter Punkt 4.4 erwähnt bedarf der Ökologische Fußabdruck einer Kontextualisierung, um Aussagen über Auswirkungen von Ressourcenkonsum für die Bereitstellung einer Dienstleistung treffen zu können. Hierfür wird als Vergleichssystem die Bereitstellung der Dienstleistung Transport mit einem Kraftfahrzeug verwendet.

4.5.2.1 Verkehrssystem

Die Funktionelle Einheit bezieht sich auf einen Personenkilometer (Pers-km), also den Transport einer Person über einen Kilometer. Als Transportvehikel wird ein Personenkraftwagen (Pkw) mit durchschnittlicher Besetzungsgrad von 1,4 Personen pro Fahrzeug angenommen [38], der Mix zwischen Benzin- und Dieselfahrzeugen wird mit 1:1 angenommen.

Wie aus Tabelle 6 zeigt eine prognostizierte Transportleistung von 186,7 Mio. [Pers-km/a] im Jahr 2025. Die durchschnittliche Anzahl der auf der Strecke transportierten Personen entspricht 39.867. Mit dem Besetzungsgrad von 1,4 Personen pro Pkw [38] ergeben sich einerseits 28.500 [Pkw] um die Strecke zu bedienen, andererseits die jährliche Fahrleistung im Ausmaß von 133,4 Mio. [Pkw-km/a] (siehe Tabelle 8).

Tabelle 8: Transportleistung im Jahr 2025 (Zahlen sind gerundet)

Querschnitt	Transportierte Personen	Anzahl der Pkw	Fahrleistung	Transportleistung
	[Pers/d]	[Pkw/d]	[Pkw-km/a]	[Pers-km/a]
ab Schottentor	54.000	38.600	10.600.000	14.800.000
Schottenring	58.400	41.700	10.700.000	14.900.000
Taborstraße	57.600	41.100	14.400.000	20.100.000
Praterstern	58.500	41.800	12.700.000	17.800.000
Messe	56.500	40.400	11.400.000	16.000.000
Krieau	48.500	34.600	8.400.000	11.700.000
Stadion	44.400	31.700	13.100.000	18.300.000
Donaumarina	38.700	27.600	8.600.000	12.100.000
Donaustadtbrücke	38.200	27.300	11.700.000	16.400.000
Stadlau	35.600	25.400	5.900.000	8.300.000
Hardegasse	33.100	23.600	5.900.000	8.200.000
Donauspital	26.700	19.100	5.600.000	7.800.000
Aspernstraße	19.200	13.700	4.300.000	6.000.000
Hausfeldstraße	17.700	12.600	6.500.000	9.200.000
Aspern Flugfeld	10.900	7.800	3.700.000	5.100.000
Seestadt			-	
Total / Mittelwert	39.900	28.500	133.400.000	186.700.000

Die Angaben in Tabelle 8 beziehen sich auf beide Fahrrichtungen. Wird angenommen, dass jeder Pkw diese Strecke hin und retour zurücklegt, so halbiert sich die Anzahl der Pkw auf 14.250 Pkw.

Tabelle 9: Anzahl der Pkws je Fahrrichtung

	Einheit	Betrag
Personen	Pers/d	39.900
Pkw pro Tag	Pkw/d	28.500
Pkw pro Tag und Richtung	Pkw/d.Ri	14.250

4.5.2.2 Energie

Energie wird bei der Herstellung der Straße, der Herstellung des Fahrzeuges, und hauptsächlich beim Betrieb des Fahrzeuges benötigt. Die Daten dazu liefert GEMIS 4.5, Gruden [39, 40], und Teufel et al. [41] in ihrer Studie zur Ökobilanz von Kraftfahrzeugen, beziehungsweise Schmid [42, S. 104] für die Herstellung von Straßen.

4.5.2.3 Güter

Entsprechend der Vorgangsweise bei den U-Bahn Zügen werden auch beim Pkw die Güter Stahl, Kunststoffe, Magnesium, Aluminium und Kupfer berücksichtigt. Daten dazu liefern u.a. Teufel et al. [41], Gruden [39, 40], der Österreichische Verein für Kraftfahrzeugtechnik [43] beziehungsweise GEMIS 4.5.

4.5.2.4 Flächenbeanspruchung Ablagerung von Bauabfällen

Die Ablagerung von Abfällen, die bei der Errichtung der Straße entstehen, wird nicht in Rechnung gestellt.

4.5.2.5 Direkte Flächenbeanspruchung durch Versiegelung

Für die direkte Flächenbeanspruchung durch Versiegelung werden die Straße und der zu den Fahrzeugen zugehörige Parkplatz in Rechnung gestellt.

4.6 Inventar (Datenerfassung)

Im folgenden Abschnitt wird die Datengrundlage, für die weiterführende Berechnung des Ökologischen Fußabdruckes in Form eines Inventars, dargestellt. Es werden nur jene Güter und Energieträger berücksichtigt, die für die größte Inanspruchnahme von Energieland und beanspruchtes Land verantwortlich sind. Die Inventarisierung greift auf Primärdaten (Leistungsverzeichnisse, Herstellerangaben) und Sekundärliteratur zurück.



4.6.1 Übersicht

Aufgrund der gewählten Vorgangsweise (siehe Kap. 4.1, S. 11) ergibt sich für beide Transportsysteme die in Tabelle 10 dargestellte Inventarisierung zur Ermittlung des Ökologischen Fußabdruckes.

Tabelle 10: Übersicht zu Landkategorien und korrespondierende Daten der Inventarisierung

Landkategorie	Inventarisierung
I. Land für Fossilenergie	<ul style="list-style-type: none"> a. Direkter Energiekonsum beim Bau der U-Bahninfrastruktur der Straßeninfrastruktur b. Direkter Energiekonsum bei Herstellung der Fahrzeuge c. Direkter Energiekonsum beim Betrieb der U-Bahn und der PKWs d. Grauer Energiekonsum zur Bereitstellung von Gütern
II. Beanspruchtes Land	<ul style="list-style-type: none"> e. Flächenbeanspruchung durch den Abbau von Rohstoffen f. Flächenbeanspruchung durch die Ablagerung von Abfällen g. Direkte Flächenbeanspruchung im Verkehrskorridor

4.6.2 Allokationsregeln

Für die Erbringung der Verkehrsdienstleistung „Personentransport“ wird eine bestimmte Menge an materiellen und energetischen Ressourcen verwendet, es werden aber auch Abfälle erzeugt. Die Bereitstellung, Verwendung und Entsorgung dieser Güter und Energieträger hat Umweltauswirkungen zur Folge, welche in dieser Arbeit in Form des ökologischen Fußabdruckes bewertet werden. Da die lückenlose Erfassung aller Güter und Energieströme zu zeitintensiv wäre, muss eine sinnvolle Abwägung zwischen Aufwand und Ergebnis erfolgen. Somit müssen Allokationsregeln festgelegt werden, die eine Abgrenzung der Güter und Energieströme bedingen. Es werden nur jene Güter- und Energieströme Berücksichtigung, die aufgrund der Masse bzw. des Energieaufwandes einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis haben. Bei den materiellen Ressourcen werden nur jene berücksichtigt, die aufgrund der Masse und des fossilen Energiebedarfs für die Bereitstellung relevant sind. Bei den energetischen Ressourcen werden zwar alle Energieformen berücksichtigt, aber nur jene Prozesse ausgewählt die als Hauptkonsumenten gelten.

Aufgrund des gewählten bottom-up Ansatzes setzten sich die Datenquellen sehr mannigfaltig zusammen (z.B.: Leistungsverzeichnisse, Primär- und Sekundärliteratur, Interviews bezüglich). Beispiel weise finden sich in der Literatur Expertenbefragung beim schwedischen Eisenbahnunternehmen Banverket. Diese ergaben, dass Stahl, Beton, Aluminium und Kupfer hinsichtlich Menge und lebenszyklusbezogenem Energieaufwand relevant ist [44, S. 251].

Ein Überblick zu den selektierten Gütern und Energieformen findet sich in Tabelle 11, eine detaillierte Aufstellung in Kap. 4.5, S. 15ff.

Tabelle 11: Betrachtete Güter und Energieträger

Gruppe	Kategorie	Güter, Energieform	U-Bahn	MIV
Land für Fossilenergie	a. Energiekonsum zur Bereitstellung der Verkehrswege (Ingenieurbauwerke und Stationen bei U-Bahn; Straßen bei Pkw)	Strom	X	X
		Wärme		
		Diesel	X	X
	b. Energiekonsum bei der Herstellung der Fahrzeuge im Werk	Strom	X	X
		Wärme	X	X
	c. Direkter Energiekonsum im Betrieb	Strom	X	
		Wärme	X	
		Diesel		X
		Benzin		X
	d. Grauer Energiekonsum zur Bereitstellung von Gütern (in CO ₂ Äquivalent je Einheit ausgedrückt)	Beton	X	
		Stahl	X	X
		Kupfer	X	X
		Aluminium	X	X
		Kunststoffe		X
Oberbau Straße			X	
Beanspruchtes Land	e. Flächenbeanspruchung durch den Abbau von Rohstoffen und die Bereitstellung von Energie (Direkte Flächenbeanspruchung)	Beton	X	X
		Stahl	X	X
		Kupfer	X	X
		Aluminium	X	X
		Strom	X	X
		Wärme	X	X
		Diesel	X	X
	Benzin	X	X	
f. Flächenbeanspruchung durch die Ablagerung von Abfällen	Abfall	X		

4.6.3 System „U2 Verlängerung“

Für derzeit in Bau befindlichen Streckenabschnitt „Schottentor“ bis „Aspernstraße“ liegen konkrete Daten vor, die von den Wiener Linien zu Verfügung gestellt wurden. Für die Bauabschnitte ab Station „Aspernstraße“ bis „Seestadt“ (Abschnitte 11-16) sind noch keine Daten vorhanden, da diese erst gebaut werden. Aus diesem Grund werden die Werte der vorhergehenden, ähnlichen Abschnitte, hochgerechnet.



4.6.3.1 Direkter Energiekonsum beim Bau der U-Bahninfrastruktur

Bei der Errichtung der U-Bahn werden hauptsächlich Baustrom und Treibstoffe (Diesel) für die Baumaschinen benötigt. Die aktuellen Werte für die U2 Verlängerung werden von den Wiener Linien bezogen. Gibt es dazu keine Werte, so werden Ökobilanzdaten der schweizerischen Ecoinvent-Datenbank [45] oder aus Deutschland verwendet [42] verwendet. Für die Plausibilitätsprüfung und Vergleich kommen ebenfalls diese Quellen zum Einsatz.

(1) Baustrom

Laut Angaben der Wiener Linien wurde für den Abschnitt U2-7 286.164 [kWh] Strom konsumiert. Dieser wurde von der Wien Energie bezogen [35]. Bei einer Bauabschnittslänge von 890 [m] ergibt sich ein spezifischer Energiekonsum von 322 [kWh/m]. Der Abschnitt U2-7 ist oberirdisch und auf Stützen angeordnet. Der unterirdische Bauabschnitt 2 benötigt 20.500.000 [kWh] Strom. Dies entspricht bei einer Abschnittslänge von 1.398 [m] einem spezifischen Bedarf von 14.664 [kWh/m].

Die Ecoinvent Datenbank gibt für Eisenbahntunnel einen Wert von 569 [kWh/m.a] an. Bei einer Lebensdauer von 100 [a] entspricht dies 56.900 [kWh/m]. Bei Straßentunnels liegt dieser Wert deutlich darunter (138 [kWh/m.a] oder 13.800 [kWh/m]). Somit liegen diese Werte in einem ähnlichen Bereich.

In Summe ergibt sich bei Verwendung der Baustellendaten ein Baustromkonsum von 81.095.011 [kWh]. Der Wert wurde in Abhängigkeit von der Bauabschnittlänge und der Hoch- bzw. Tieflage ermittelt. Bei einer 100-jährigen Lebensdauer des Bauwerkes ergibt sich ein jährlicher Konsum von 810.950 [kWh/a].

(2) Baudiesel

Laut Angaben der Wiener Linien beträgt der Baudieselkonsum für den Bauabschnitt 2 (Tunnel) 490.000 [l], was für die Gesamtstrecke 5.194.771 [l] (351 Liter/m) entspricht. Bei 100 Jahren Bauzeit ergeben sich 51.948 [l/a].

Maibach [46, S. 218] liefert für den Baudieselkonsum des Lötschberg-Basistunnels einen vergleichbaren Wert von 135 MJ/m.a (43,3 kWh/m.a = 440 Liter/m⁷).

4.6.3.2 Direkter Energiekonsum beim Bau der U-Bahnwagen

Struckl [32, S. 84] gibt den Energiekonsum für die Produktion der Fahrzeuge mit 170 [MWh] Strom, 411 [MWh] Wärme und 38 [MWh] Erdgas je Fahrzeug an. Das Werk befindet sich in Wien, weswegen für die Ermittlung der CO₂ Emissionen der Wiener Fernwärme-, Strom- und Gasmix herangezogen wird.

⁷ Annahme: 100 Jahr Lebensdauer

4.6.3.3 Direkter Energiekonsum beim Betrieb der U-Bahn

Durch den Betrieb der U-Bahn entsteht ein Energiebedarf, der im Nachhaltigkeitsbericht der Wiener Linien von 2005 wie folgt zusammengefasst wird [47]:

- (1) Elektrische Energie zur Fortbewegung (Traktionsstromkonsum)
- (2) Elektrische Energie für Beleuchtung, Kommunikation und sonstigem in den Stationen (Stationsstromkonsum)
- (3) Raumwärme für Stationen (Fernwärmekonsum)

Zusätzlich wird eine vernachlässigbare Menge an Erdgas genutzt. Die Daten im Nachhaltigkeitsbericht beziehen sich auf den gesamten Energiekonsum der Wiener Linien aus den Jahren 2003 bis 2005. Eine Aufteilung dieser Werte auf einzelne Linien und Stationen ist nicht möglich, da das Netz in Bezug auf sein Alter (alte und neue Linien) und seine Eigenschaften (etwa über- und unterirdische Stationen und Linienführung) sehr heterogen ist. Aus diesem Grund wurden die Energiedaten für die neue U2 direkt beim Betreiber beziehungsweise beim Hersteller der Fahrzeuge (Siemens) eingeholt. Zur Überprüfung der Plausibilität werden Literaturdaten herangezogen.

(1) *Traktionsstromkonsum*

Laut Kindler [48] betrug der gesamte Traktionsstromkonsum U-Bahnen U1, U2, U3 und U4 im Jahre 2005 131.283.444 [kWh/a]. Dies entspricht einem Konsum von ca. 17 [kWh/km], ein Wert, der mit Literaturangaben gut korrespondiert [vgl. 49].

Diese Werte beziehen sich jedoch auf den Betrieb verschiedener Bautypen von U-Bahngarnituren mit unterschiedlichen Konsumwerten. Zum Teil stammen die U-Bahngarnituren der Serie „U“ aus den 1970er Jahren. Die neuen „V“ Wagen von Siemens, die auch die neue U2 bedienen beziehungsweise bedienen werden, sind energie-effizienter. Die Bauart entspricht der neuen Metro in Oslo, welche im Rahmen einer Ökobilanz von Struckl [32, 50] beziehungsweise Struckl und Wimmer [51] untersucht wurde. Diese Ökobilanz lieferte für Oslo ein Ergebnis, dass umgerechnet auf die um den Faktor 1.8 schwereren Wiener Garnituren 12 [kWh/km] ergab. Ein großer Anteil davon wird jedoch für die Heizenergie verwendet [vgl. 32]. Aufgrund der veränderten Klimawerte in Wien sind demnach hier niedrigere Werte zu erwarten.

Direkte Messungen des Traktionsstromkonsum erfolgten im Jänner 2009 im Zuge von Fahrttests mit dem „V-Wagen“ der Wiener U-Bahn. Das Ergebnis liefert einen Energiekonsum von lediglich 6 [kWh/FZG-km] [36]. Diese deutliche Unterschreitung im Vergleich zur Metro in Oslo liegt am wärmeren Klima und der Teils unterirdischen Linienführung, im Vergleich zum alten „U-Wagen“ an der höheren Effizienz und dem hohen Anteil an rück gespeister Bremsenergie [32, 36]. Obwohl über den Jahresdurchschnitt noch niedrige-



re Werte erreicht werden können, wird dieser Wert von 6 [kWh/km] für die Berechnung verwendet.

(2) *Stationsstromkonsum*

Der Gesamtstromkonsum aller Gebäude der Wiener Linien wird von Kindler [48] mit 89.115.550 [kWh] für das Jahr 2005 angegeben. Laut Angaben der Wiener Linien beträgt der Wert je Station 1.000.000 [kWh/a] für überirdische und 670.000 [kWh/a] für unterirdische Stationen. Somit ergibt sich ein durchschnittlicher Energiekonsum von 835.000 [kWh/a]. Diese Werte korrespondieren mit den Angaben von Hong und Kim [52] für die U-Bahn in Seoul, die einen durchschnittlichen Konsum je Station von 780.560 [kWh/a] angeben.

Für alle 16 Stationen (4 Tief-, 12 Hochstationen) ergibt sich daraus ein Stromkonsum von 12.040.000 [kWh/a].

(3) *Fernwärmekonsum*

Der Gesamtfernwärmekonsum aller Gebäude der Wiener Linien wird von Kindler [48] mit 64.000.000 [kWh] für das Jahr 2005 angegeben. Der Anteil der Stationen beim Stromkonsum liegt bei 75% des Gesamtstromkonsums. Wird dieser Wert (75%) auch näherungsweise auf den Wärmebedarf von Stationen angewendet und durch die Anzahl der Stationen des Wiener U-Bahnnetzes von 2005 (ca. 80 Stationen, siehe Kindler [48]) dividiert, so ergibt sich eine durchschnittliche Fernwärmenutzung von 600.000 [kWh/a] je Station und Jahr. Bezogen auf 16 Stationen sind dies 9.600.000 [kWh/a].

(4) *Sonstiger Energiekonsum*

Neben den bisher erwähnten Energieträgern dient zur Aufrechterhaltung des Betriebes auch Erdgas. Für Gebäude wird dieses mit 9.684.000 [kWh/a] im Jahr 2005 angegeben [48]. Da der Großteil davon auf Verwaltungsgebäude entfällt, wird die Nutzung von Erdgas für den Betrieb der U2 nicht in Rechnung gestellt.

4.6.3.4 Grauer Energiekonsum zur Bereitstellung der Güter und Abbauflächen zur Rohstoffgewinnung

Bei der Verwendung von Gütern entsteht ein gewisser Flächenbedarf durch den Abbau und die Ablagerung. Dies wird auch in der Originalmethodik des Ökologischen Fußabdruckes nach Wackernagel und Rees [17] berücksichtigt.

Abweichend von der Originalmethodik wird auch noch die sogenannte „Graue Energie“ für die Bereitstellung der Güter mit einbezogen (s. Kap. 4.3, S. 11).

In beiden Fällen ist die Menge der wichtigsten Bau- und Konstruktionswerkstoffe zu ermitteln. Als wichtig werden jene angesehen, die mengenmäßig (Beton, Stahl) beziehungsweise wegen der Auswirkung ihrer Bereitstellung (Aluminium, Kupfer) relevant sind.

Die Daten beziehen sich auf Angaben der Wiener Linien [35] und Studien zu den Fahrzeugen [32, 36, 50].

(1) *Beton*

Beton ist ein essentieller Bestandteil von Infrastrukturprojekten. Besonders im Tunnelbau werden große Mengen dieses Baustoffs verwendet.

Die Betonmenge für die U2 Verlängerung wird aus den Ausschreibungsleistungsverzeichnissen für den Rohbau ermittelt [35]. Diese liegen als PDF Dateien vor. Die Suche nach relevanten Betonmengen wird getrennt mit den Suchwörtern „m³“, „m²“ und „Beton“ durchgeführt, wobei darauf zu achten ist, dass Doppelzählungen vermieden werden. Dies wird durch Identifikation der Positionsnummern bei mengenmäßig wichtigen Positionen erreicht. Gerechnet werden sämtliche Betone, also auch Fertigteile, nicht jedoch Estriche.

Die ermittelte Betonmenge wird zuerst in [m³] ausgedrückt. Die Zusammensetzung eines durchschnittlichen [m³] Betons wird mit 300 [kg] Zement, 1.900 [kg] Sand-Kies Gemisch und 180 [kg] Wasser, also einer Dichte von 2.380 [kg/m³] Beton angenommen [53]. Dies entspricht einem Beton der Klasse C25/30. Schließlich wird die Gesamtmenge an Beton, Zement und Sand-Kies-Gemisch in [m³] beziehungsweise [kg] ausgedrückt. Für die Streckenabschnitte U2 11-16 liegt noch kein Leistungsverzeichnis vor, weswegen der durchschnittliche Wert der im Streckenverlauf ähnlichen Abschnitte U2 9-10 verwendet wird.

Für die gesamte Neubaustrecke der U2 ergibt sich somit eine Betonnutzung von 721.972 [m³] beziehungsweise 1.718.293.360 [kg]. Dies entspricht einer Zementmenge von 216.591.723 [kg] und einer Sand-Kies Gemisch Menge von 1.371.747.580 [kg].

Bezogen auf die Lebensdauer ergibt sich daraus 17.182.934 [kg/a] Beton (Berechnung s. Kap. 8.1, S. 63).

(2) *Stahl*

Der Stahlkonsum fließt auf zweierlei Weise in die Berechnung mit ein, zum einen als Bau- und Betonstahl für die Errichtung der Bauwerke (0), zum anderen als Konstruktionsstahl für die Herstellung der Fahrzeuge 0.

Bau- und Betonstahl: Stahl spielt eine wichtige Rolle im Ingenieurbau. Beträchtliche Mengen werden entweder als Betonstahl in Stahlbetontragwerken und –bauten, oder als Bau- stahl in Stahltragwerken eingebaut. Jedoch ist Stahl ein energieintensiver Baustoff, weswegen er in ökologischen Bewertungsverfahren berücksichtigt werden muss.

Im vorliegenden Projekt U2 Ausbau werden beide zuvor erwähnten Stahlkategorien berücksichtigt. Die Stahlmenge wird aus den Ausschreibungsleistungsverzeichnissen für



Roh- und Stahlbau ermittelt [35]. Es werden nur Positionen jene Positionen inkludiert, die Mengenmäßig relevant sind.

Die Leistungsverzeichnisse liegen als PDF Dokumente vor. In diesen Dokumenten wird mit den Suchwörtern „Stahl“, „kg“ und „m²“ durchgeführt, wobei darauf zu achten ist, dass Doppelzählungen vermieden werden. Dies wird durch Identifikation der Positionsnummern bei Mengenmäßig wichtigen Positionen erreicht. Die Einzelpositionen werden dann zusammengezählt.

Die Gesamtmenge wird dann in [kg] ausgedrückt. Für die Streckenabschnitte U2 11-16 liegt noch kein Leistungsverzeichnis vor, weswegen der durchschnittliche Wert der im Streckenverlauf ähnlichen Abschnitte U2 9-10 verwendet wird.

Für die gesamte Neubaustrecke der U2 ergibt sich dann ein Stahlkonsum von 81.807.891 [kg] oder – auf 100 Jahre bezogen – 818.079 [kg/a].

Konstruktionsstahl zur Herstellung der Fahrzeuge: Die U2 wird mit Fahrzeugen der Firma Siemens befahren. Während heute noch teilweise Fahrzeuge der Serie „U“ unterwegs sind, so wird in naher Zukunft der Betrieb komplett mit den neueren und effizienteren „V“ Wagen geführt.

Die Daten für die materielle Zusammensetzung der „V“ Wagen basieren auf einer Dissertation am Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik an der Technischen Universität von Herrn Dr. Walter Struckl. In dieser Arbeit wurde eine Ökobilanz des U-Bahnzuges der Metro in Oslo durchgeführt [32]. Auf Nachfrage konnte Herr Struckl bestätigen, dass die Materielle Zusammensetzung des Wiener „V“ Wagens den Osloer Zug ähnlich ist und für die hier angeführte Aufgabenstellung reiche. Da der Wiener „V“ Wagen länger und somit auch schwerer ist (sechs statt 3 Glieder), muss das Gewicht angepasst werden [36].

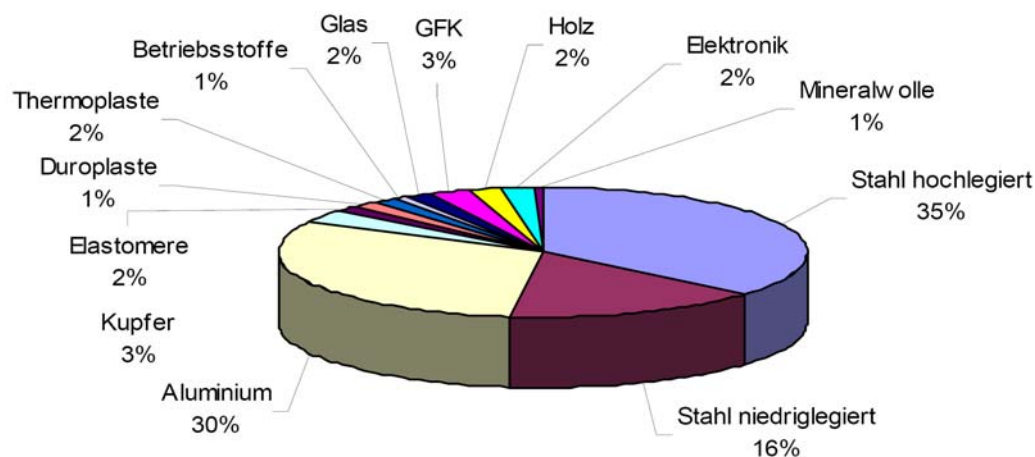


Abbildung 3: Fahrzeugzusammensetzung Metro Oslo nach Kampenhuber (2006) (zitiert in Struckl [32])

Aus der Zusammensetzung und dem Zugsgewicht des „V“ Wagens (167.600 kg) und dem Stahlanteil von 51% ergibt sich eine Stahlmenge von 85.476 [kg/Zug]. Bei einer Lebensdauer von 30 Jahren und 15 Zügen die notwendig sind, um die Strecke zu bedienen, ergibt dies 42.738 [kg/a] beziehungsweise 1.282.140 [kg] gesamt.

(3) *Kupfer*

Wie Stahl fließt auch Kupfer in zweierlei Weise in die Berechnung mit ein: zum einen als Kupfer im Bauwerk (Elektroinstallationen), zum anderen in den Installationen der Fahrzeuge.

Kupfer im Bauwerk: Die meisten Elektroinstallationen für den U-Bahn Betrieb bestehen aus Kupfer. Zusätzlich ist die Bereitstellung von Kupfer energie- und flächenintensiv, weswegen Kupfer berücksichtigt wird. Laut Angaben der Wiener Linien befinden sich umgerechnet auf einen Streckenkilometer circa 200 Tonnen Kupfer [54]. Für die Gesamtlänge des Bauwerks ergeben sich somit 2.964.200 [kg] Kupfer. Auf eine Lebensdauer von 100 Jahren gerechnet sind dies 29.642 [kg/a].

Kupfer in den Fahrzeugen: Aus (2), Punkt 0 ist der Kupferanteil des Fahrzeuges ersichtlich (3%). Das Gut wird hier hauptsächlich in Leitungen eingesetzt und ist mengenmäßig weniger relevant, wird aber ob der Vollständigkeit mitgerechnet. Bezogen auf ein Fahrzeuggewicht von 167.600 [kg] ergibt sich eine Menge von 5.028 [kg/Zug]. Bei einer Lebensdauer von 30 Jahren und 15 Zügen die notwendig sind, um die Strecke zu bedienen, ergibt dies 2.514 [kg/a] beziehungsweise 75.420 [kg] gesamt.

(4) *Aluminium*

Wie Stahl und Kupfer fließt auch Aluminium in zweierlei Weise in die Berechnung mit ein: zum einen als Aluminium im Bauwerk (Stromschiene), zum anderen als Konstruktionswerkstoff in den Fahrzeugen.

Aluminium im Bauwerk: Im Bauwerk beinhalten zum einen die Stationen einen gewissen Kupferanteil, zum anderen auch Installationen und Leitungen, wie die Stromschiene. Das Aluminium im Bauwerk wird über die Leistungsverzeichnisse für den Stahlbau ermittelt (im Rohbau tritt fast kein Aluminium auf). Aluminium kommt hier vor allem in flächiger Form, etwa als Abdeckungen in Stationen vor. Das Suchwort für die PDF Leistungsverzeichnisse lautet „Aluminium“. Für die Bauabschnitte 11-16 wurden die Werte der Abschnitte 9 und 10 hochgerechnet. Anhand dieser Suche wurde die Menge von Aluminium im Bauwerk mit 204.600 [kg] beziehungsweise 2.046 [kg/a] ermittelt.



Aluminium in den Fahrzeugen: Aus (2), Punkt 0 ist der Aluminiumanteil des Fahrzeuges ersichtlich (30%). Aluminium wird hier als Konstruktionswerkstoff verwendet. Bezogen auf ein Fahrzeuggewicht von 167.600 [kg] ergibt sich eine Aluminiummenge 50.280 [kg/Zug]. Bei einer Lebensdauer von 30 Jahren und 15 Zügen die notwendig sind, um die Strecke zu bedienen, ergibt dies 25.140 [kg/a] beziehungsweise 754.200 [kg] gesamt.

4.6.3.5 Flächenbeanspruchung zur Ablagerung der Bauabfälle

Um die Bauabfälle, wie Bodenaushub und Abbruch, zu entsorgen, müssen Baurestmassen- und Bodenaushubdeponien angelegt werden. Die dafür verwendete Fläche wird in die Berechnung mit einbezogen. Die zu deponierende Menge wird von den Wiener Linien ermittelt und zur Verfügung gestellt.

Entlang der Abschnitte U2-1 bis U2-5 entstanden 2.023.323.000 [t] Bauabfall [35]. Die Abschnitte U2-6 bis U2-10 erzeugten 240.000 [t] Bauabfall. Der Unterschied lässt sich durch den Tunnelausbruch in den Abschnitten 1-5 erklären. Inkludiert man die hochgerechneten Werte für die Abschnitte 11-16, so ergeben sich daraus 2.481.105 [t] oder 24.811 [t/a] bezogen auf 100 Jahre Lebensdauer.

4.6.3.6 Direkte Flächenbeanspruchung (Verkehrskorridor)

Bei allen Bauvorhaben – auch beim U-Bahn Bau – werden Oberflächen verbaut und damit versiegelt. Diese Flächenversiegelung wird hier auf Basis von Daten der Wiener Linien in Rechnung gestellt.

Der Flächenbeanspruchung wird über die von den Wiener Linien zur Verfügung gestellten Planunterlagen ermittelt [35]. Dabei wird keine Unterscheidung gemacht, welche Flächen-nutzung auf dem Gelände zuvor stattgefunden hat.

Laut diesen Unterlagen ergibt sich ein Flächenbeanspruchung von 176.000 [m²]. 71.000 [m²] davon entfallen auf Fahrwege, 105.000 [m²] auf Stationen. Pro Jahr sind dies 1.760 [m²/a] bzw. 0.176 [ha/a].

4.6.4 Referenzsystem „Motorisierter Individualverkehr“

4.6.4.1 Direkter Energiekonsum beim Bau der Straßeninfrastruktur

Der Energiekonsum für die Errichtung der Straße wird nach Schmid et. al. [42, S. 104] mit 1,1 [MJ/m.d] angegeben. Für die Berechnung wird der in derselben Quelle genannte Wert von 46 [g CO₂/ m.d] und 168 [mg CH₄/ m.d] verwendet.

4.6.4.2 Direkter Energiekonsum beim Bau der PKWs

Der Energiekonsum für die Produktion der Pkw wird nach Gruden [40] mit 2 [MWh] Strom und 3 [MWh] Wärme angenommen. Die CO₂ Emission und der Flächenbedarf wer-

den mit GEMIS für den Österreichischen Strommix und den Wiener Fernwärmemix gerechnet.

Zur anteilmäßigen Berücksichtigung der Pkw-Produktion am ÖF wird der Aufwand auf Pers.-km und Jahr normiert und abgeschrieben. Dazu wird die Lebensdauer des Pkw mit 10 Jahren angenommen. Die Fahrleistung je Pkw bezieht sich auf die im Jahr 2005 zurückgelegten Kilometer der MIV-Lenker und ist laut BMVIT 61,6 Mrd. Pers.-km/a [14]. Die durchschnittliche österreichweite Fahrleistung ergibt sich unter Berücksichtigung von 4,157 Mio. Pkw zu 14.819 Pkw-km/a.

4.6.4.3 Direkter Energiekonsum beim Betrieb der PKWs

Der Energiekonsum und die dazugehörigen CO₂ Emissionen im U-Bahn Betrieb werden mit GEMIS 4.5 gerechnet. Die Werte beziehen sich auch die im GEMIS dargestellten Prozesse „Pkw-Benzin-IO-2010“ und „Pkw-Diesel-IO-2010“. Die Bezeichnung „IO“ bezieht sich dabei auf den Betrieb des Fahrzeuges Innerorts. Diese Werte setzen sich zusammen aus dem mittleren Mix an kleinen, mittleren, und großen Pkw und enthalten den Energiekonsum und die CO₂ Emissionen für den Betrieb. Der Mix aus Benzin und Dieselfahrzeugen wird mit 1:1 angenommen.

Die Zusammensetzung der Benzinflotte ergibt sich zu 30% Kleinwagen, 50% mittleren, und 10% großen Pkws. Die Dieselflotte setzt sich zu 70% aus mittleren und 30% aus großen Pkws zusammen. Kleinwagen definieren sich über ein Gewicht von circa 1,1 [t], mittlere über 1,4 [t] und große über 2,2 [t].

4.6.4.4 Grauer Energiekonsum zur Bereitstellung der Güter (PKW)

GEMIS gibt die Güterzusammensetzung für die Pkws mit den Codes „Pkw-Benzin-IO-2010“ und „Pkw-Diesel-IO-2010“ an. Beide Codes richten sich nach der mittleren Zusammensetzung unterschiedlicher Pkw-Größen der Deutschen Pkw Flotte (siehe 4.6.4.3).

Die materielle Zusammensetzung der PKWs schwankt stark nach in Abhängigkeit von Baujahr und Fahrzeugtyp. Generell lassen sich folgende Trends im Fuhrpark erkennen [55, S. 18]:

- 1) Das Fahrzeugleergewicht der PKWs nahm in der Vergangenheit zu
- 2) Der Anteil an Stahl/Eisen reduziert sich auf Kosten von verstärktem Einsatz von Ne-Metallen, Kunststoffen, Glas sowie Textilien.

Wenngleich die in der Literatur angeführten, flottenweiten Durchschnittswerte schwanken, so sind sie in ihrer Größenordnung gleich [55, S. 19, 56, S. 289, 57, S. 61, 58-60]. Für die weiterführende Berechnung wird die im Diskussionsforum des Österreichischen Kraftfahrzeugverbands veröffentlichte Materialzusammensetzung verwendet. Diese erscheint aufgrund der Aktualität der Zahlen als geeignete Berechnungsgrundlage. Unter Bezug auf das



Jahr 2015 ergeben sich die in Tabelle 12 angeführten Anteile. Die Abschätzung der Güterzusammensetzung der verschiedenen Gewichtsklassen erfolgt proportional zum Gesamtgewicht.

Tabelle 12: Güterzusammensetzung von Pkws

Güter	Anteil	PKW-Typ		
		Klein	Mittel	Groß
	[%]	[kg]	[kg]	[kg]
Eisenmetalle	61,4%	675	860	1.351
Ne-Metalle	11,6%	128	162	255
Kunststoffe	16,0%	176	224	352
Gummi	5,2%	57	73	114
Glas	2,6%	29	36	57
Flüssigkeiten	1,2%	13	17	26
andere Güter	2,0%	22	28	44
Gesamt Pkw	100,0%	1.100	1.400	2.200

Für die Eingabe in GEMIS wurden lediglich die in Tabelle 13 angeführte, stark vereinfachte Güterzusammensetzung berücksichtigt. Als zusätzliche Orientierung zur Charakterisierung der Anteile dient u.a. die stoffliche Zusammensetzung von Shredderrückständen [55, S. 24]. Die grobe Abschätzung scheint gerechtfertigt, da die Ergebnisse in der Literatur stark schwanken, und kein verifizierbarer Mittelwert ermittelt werden kann.

Tabelle 13: Güterzusammensetzung von Pkws als Eingabedaten für GEMIS

Güter	GEMIS Prozess	Anteil	PKW-Typ		
			Klein	Mittel	Groß
		[%]	[kg]	[kg]	[kg]
Stahl/Eisen	Metal\Stahl-DE-mix-2010	61,4%	675	860	1.351
Aluminium	Metal\Aluminium-DE-mix-2010	7,0%	77	98	154
Kupfer	Metal\Kupfer-DE-mix-2010	1,0%	11	14	22
Magnesium	Metal\Magnesium	1,0%	11	14	22
Kunststoffe	Chem-Org\HDPE	22,0%	242	308	484
andere Güter (unberücksichtigt)		7,6%	84	106	167
Gesamt Pkw		100,0%	1.100	1.400	2.200

4.6.4.5 Flächenbeanspruchung zur Ablagerung der Bauabfälle

Der Flächenbeanspruchung zur Ablagerung von Bauabfällen im Straßenbau ist im Vergleich zum U-Bahnbau vernachlässigbar gering. Unter der Annahme, dass der Bodenaushub wiederverwendet, findet er keine rechnerische Berücksichtigung.

4.6.4.6 Direkte Flächenbeanspruchung (Verkehrskorridor)

Durch die Errichtung der Straße und von Parkplätzen wird Fläche versiegelt und daher in Rechnung gestellt. Die Länge der Straße wird entsprechend Routenplaner mit 14,9 [km] angenommen, die Breite mit 12 [m]. Je Pkw wird eine Parkplatzfläche von 40 [m²] verwendet, die Anzahl der Stellplätze wird mit 28.476 angenommen. (siehe 4.5.2.1, Seite 21).

4.7 Flächenbeanspruchung: Vom Inventar zum Fußabdruck

Nach Zusammenstellung der Inventare wird die Nutzung von Ressourcen mittels Faktoren in Flächeneinheiten im Sinne des Ökologischen Fußabdruckes umgerechnet. Grundsätzlich werden jene Elemente, die sich auf den Bau der U-Bahn und der Züge beziehen, mit der jeweiligen Lebenszeit (100 bzw. 30 Jahre) dividiert, wie dies schon beim Inventar (Abschnitt 4.6) gezeigt wurde.

Es werden zwei Komponenten von Umrechnungsfaktoren unterschieden:

(1) *Land für Fossilenergie*

Der üblicherweise größte Anteil des Ökologischen Fußabdruckes besteht aus jener Fläche, die das emittierte CO₂ in der Biomasse fixiert. Die Datengrundlage für die CO₂-äqu. Emissionen selbst liefert das GEMIS 4.5 Programm [61], welches nicht nur Daten für direkte CO₂ Emissionen durch fossile Energieträger liefert, sondern auch die CO₂ Emissionen, die bei der Bereitstellung von Gütern und Energie entstehen. Die CO₂ Emissionen werden dann mit einem Faktor multipliziert, der die durchschnittliche Fläche zur Sequestration des CO₂ in Biomasse angibt. Diese Sequestrationsrate (SR) liegt laut [27] bei 1,09 [t C/ha.a] oder 3,99 [t CO₂ / ha.a]. Umgerechnet ergibt sich dadurch ein CO₂ Sequestrationsflächenbedarf von 0,25 (ha.a / t CO₂) beziehungsweise 0,00025 (ha.a / kg CO₂).

(2) *Beanspruchtes Land*

Für die Bereitstellung der Güter (Beton, Stahl, Kupfer, Aluminium) und Energieträger (Strom, Fernwärme, Diesel) werden Flächen in Anspruch genommen. Diese werden beim ÖF in Rechnung gestellt. Dahinter liegt die Annahme, dass jene Flächen, die durch die Bereitstellung von Gütern und Energieträgern umgewidmet werden, zuvor biologisch produktiv waren, und dies nach der Umwidmung nicht mehr sind. Ein Beispiel wäre hier der Bau einer Straße oder einer Fabrik auf biologisch produktiver Fläche. Obwohl dies nicht in jedem Fall zutrifft, wird diese Annahme hier getroffen.

Die Unterscheidung direkt und indirekt bezieht sich darauf, wo die Flächennutzung stattfindet und auch, woher die Daten dazu stammen. Der direkte Flächenbedarf ist die durch die Errichtung der U-Bahn oder der Straße versiegelte Fläche. Diese wird im Falle der U-Bahn mit den vorhandenen Daten der Wiener Linien ermittelt, im Falle der Straße mit angenommenen und Literaturwerten.

Indirekt bedeutet, dass etwa die Bereitstellung von Gütern und Energie in der Vorkette einen gewissen Flächenbedarf hat, zum Beispiel der Abbau von Sand und Kies für die Herstellung von Beton oder die Produktion von Strom mit einem Wasserkraftwerk. Dieser Flächenbedarf wird über Ökobilanz-Daten des deutschen Öko-Institutes und seiner dafür produzierten Software GEMIS (Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme) ermittelt



[62]. Für die Datensätze des GEMIS-Programms wird in den Anlagenkenndaten lediglich eine Flächenkenngröße eingetragen, die bei Kraftwerken das eigentliche Betriebsgelände und beim Bergbau die direkt durch den Abbau beeinträchtigte Fläche angibt [63, S. 205]. Wegen lückenhaft vorliegender Daten wird in GEMIS darauf verzichtet, unterschiedliche Flächenkategorien zu verwenden

4.7.1 System „U2 Verlängerung“

4.7.1.1 Energie und Energieträger

(1) Strom

Nachdem sich die Wahl des Strommix signifikant auf den Ökologischen Fußabdruck auswirkt, werden vier verschiedene Annahmen getroffen, und in Tabelle 14 gegenübergestellt.

Tabelle 14: CO₂-äqu. Emissionen und Flächeninanspruchnahme in Abhängigkeit vom Strommix

N°	Strommix ⁸	Treibhausgasemissionen [kg CO ₂ -äqu./kWh]	Flächeninanspruchnahme [m ² /kWh]	Quelle
1	Strom Mix Wien - Verbrauch ⁹	0,397	0,0028	Daxbeck 2001 [6, S. 98] / GEMIS 4.5
2	El-KW-Park-AT-2010	0,196	0,0067	GEMIS 4.5
3	El-KW-Park-EU-17-2010	0,336	0,0015	GEMIS 4.5
4	UCTE Mix 2009	0,432	-	E-CONTROL GmbH [64]

An dieser Stelle wird lediglich die Vorgangsweise für den in Tabelle 14 an zweiter Stelle angeführten Strommix exemplarisch erläutert. GEMIS 4.5 weist beim Prozess „El-KW-Park-AT-2010“ für die Bereitstellung von 1 [TJ] Strom 54.320,5 [kg CO₂-äqu./TJ] beziehungsweise 0,196 [kg CO₂-äqu./kWh] aus. Neben den Emissionen wird die Flächeninanspruchnahme im Ausmaß von 1.875 [m²/TJ] beziehungsweise 0,0067 [m²/kWh] berücksichtigt.

(2) Fernwärme

Auch für die Fernwärme liefert GEMIS Daten für den österreichischen Fernwärme-Mix. Da das Umweltbundesamt jedoch eine Ökobilanz zur Fernwärme Wien durchgeführt hat,

⁸ Die Anteile der Energieträger, sowie die angenommenen GEMIS Prozesse finden sich im Anhang, S. 60.

⁹ Um den Vergleich des ÖF der U2-Verlängerung mit jenem der Stadt Wien konsistent abzubilden, wurde jener Strommix herangezogen der auch dem ÖF von Wien als Berechnungsgrundlage diente.

werden diese Werte verwendet [65]. Die Ökobilanz selbst wurde basierend auf spezifische Wiener Daten mit dem GEMIS 4.5 Programm gerechnet.

Demnach liegen die CO₂ Emissionen der Fernwärme Wien im Jahr 2005 bei 0,197 [kg CO₂-äqu./kWh], wobei vorgelagerte Prozesse inkludiert sind [65, S. 16] .

Der Flächenbeanspruchung wurde in dieser Studie nicht ermittelt, kann jedoch in Bezug auf die GEMIS 4.5 Werte für den Österreichischen Fernwärme-Mix (Fernwärme-mix-AT-2005) als vernachlässigbar angenommen werden [61].

Die Berechnung selbst wird demnach nicht mit GEMIS durchgeführt, da die vorhandenen Werte von Pölz [65] als akkurater betrachtet werden.

(3) *Diesel*

Diesel wird auf der Baustelle zum Betrieb der Baugeräte verwendet. In die Berechnung des Fußabdruckes geht Diesel in zweierlei Weise ein. Zum einen sind dies die CO₂ Emissionen und der Flächenbeanspruchung, die bei der Bereitstellung einer Einheit Diesel entstehen. Zum anderen entsteht durch die Verbrennung des Diesels im Motor CO₂.

Bereitstellung einer Einheit Diesel:

GEMIS 4.5 gibt Daten für die Bereitstellung eines [TJ] Diesel unter dem Code „Tankstelle\Diesel-DE-2010“ mit 11,6057*10³ [kg CO₂-äqu/ TJ Diesel] und einer Flächen-inanspruchnahme von 12,82 [m²/ TJ Diesel] an. Bei einem Heizwert von 42,6 [MJ/kg] und einer Dichte von 0,845 [kg/l] ergeben sich daraus 0,417770 [kg CO₂-äqu/ l Diesel] und 4,61*10⁻⁴ [m²/ l Diesel].

Die CO₂ Emissionen und der Flächenbeanspruchung werden mit GEMIS gerechnet.

Verbrennung einer Einheit Diesel:

Nach Buchal [66] verbrennt ein Liter Diesel mit einem Heizwert von 9,8 [kWh] zu 2,40 [kg CO₂]. Dieser Wert wird mit der Dieselmenge multipliziert, um den Gesamtausstoß an CO₂ der Dieselbaufahrzeuge zu ermitteln.

(4) *Erdgas*

Erdgas wird bei der Herstellung der Züge verwendet. Wie bei Diesel geht in die Berechnung des Fußabdruckes des Erdgases auf zweierlei Weise ein. Zum einen sind dies die CO₂ Emissionen und der Flächenbeanspruchung, die bei der Bereitstellung einer Einheit Diesel entstehen. Zum anderen entsteht durch die Verbrennung des Diesels im Motor CO₂.

Bereitstellung einer Einheit Erdgas:

GEMIS 4.5 gibt Daten für die Bereitstellung eines [TJ] Erdgas unter dem Code „Tankstelle\Erdgas-DE-2010“ mit 13,4331*10³ [kg CO₂-äqu/ TJ Erdgas] und einer Flächeninanspruchnahme von 56,82 [m²/ TJ Erdgas] an. Somit beträgt der CO₂ Aus-



stoß 0,048355 [kg CO₂/ kWh Erdgas]¹⁰ und die Flächeninanspruchnahme 2,0*10⁻⁴ [m²/ kWh Erdgas] beträgt.

Die CO₂ Emissionen und der Flächenbeanspruchung werden mit GEMIS gerechnet.

Verbrennung einer Einheit Erdgas:

Nach Buchal [66] verbrennt ein [m³] Erdgas mit einem Heizwert von 10 [kWh] zu 1,98 [kg CO₂], das heißt pro [kWh] entstehen 0,198 [kg] CO₂. Dieser Wert wird mit der Gasmenge multipliziert, um den Gesamtausstoß an CO₂ aufgrund der Erdgasverbrennung zu ermitteln.

4.7.1.2 Güter

(1) Beton

GEMIS liefert Daten für die Bereitstellung von 1 [kg] Beton (Code: „Steine-Erden\Beton“ mit Ortsbezug Deutschland). Demnach entstehen dabei 0,1744 kg CO₂-äqu. Der Flächenbedarf je [kg] ist so gering, dass er im GEMIS, welches nur zwei Kommastellen angibt, mit null dargestellt wird. Die CO₂ Emissionen und der Flächenbeanspruchung werden mit GEMIS gerechnet.

(2) Stahl

GEMIS liefert Daten für die Bereitstellung von 1 [kg] Stahl (Code: „Metall\Stahl-DE-mix-2010“ mit Ortsbezug Deutschland). Demnach entstehen dabei 1,4992 kg CO₂-äqu.. Der Flächenbedarf je [kg] ist so gering, dass er im GEMIS, welches nur zwei Kommastellen angibt, mit null dargestellt wird. Die CO₂ Emissionen und der Flächenbeanspruchung werden mit GEMIS gerechnet.

(3) Aluminium

GEMIS liefert Daten für die Bereitstellung von 1 [kg] Aluminium (Code: „Metall\Aluminium-DE-mix-2010“ mit Ortsbezug Deutschland). Demnach entstehen dabei 17,6014 kg CO₂-äqu. Der Flächenbedarf je [kg] ist 0,04 [m²/kg Al]. Die Berechnung wird mit GEMIS durchgeführt.

(4) Kupfer

GEMIS liefert Daten für die Bereitstellung von 1 [kg] Kupfer (Code: „Metall\Kupfer-DE-mix-2010“ mit Ortsbezug Deutschland). Demnach entstehen dabei 3,9766 kg CO₂-äqu. Der Flächenbedarf je [kg] ist 0,01 [m²/kg Al]. Die Berechnung wird mit GEMIS durchgeführt.

¹⁰ Umrechnungsfaktor: 1 TJ = 277.800 kWh

4.7.1.3 Flächenbeanspruchung Deponierung von Abfällen

Bei der Deponierung wird eine Ablagerungsdichte von 2 [t/m³] und einer Deponiehöhe von 10 [m] ausgegangen, um die Deponierungsfläche zu ermitteln. Diese geht dann mit dem Faktor 1 in die Berechnung ein.

4.7.1.4 Direkte Flächenbeanspruchung

Die direkte Flächenbeanspruchung wird durch die Lebensdauer dividiert und in [ha/Pers-km.a] dargestellt.

4.7.2 Referenzsystem „Motorisierter Individualverkehr“

4.7.2.1 Energiekonsum im Betrieb und Herstellung der Güter für PKW Produktion

GEMIS liefert die Daten für einen Kilometer Transportdienstleistung. Dabei sind sowohl der Kraftstoffkonsum im Betrieb als auch die Bereitstellung der Güter für die PKW Produktion berücksichtigt. Somit ergeben sich 0,295 kg [CO₂-äqu./Pkw-km]. Der Flächenbedarf wird mit 0,00 m²/Pkw-km angegeben und aufgrund dessen vernachlässigt. Die Berechnungsgrundlagen finden sich in Kap. 4.6.4.2, S. 31 und Kap. 4.6.4.3, S. 32.

4.7.2.2 Energiekonsum im PKW-Werk

GEMIS liefert die Daten für die Energiebereitstellung von Strom und Wärme. Im gegenständlichen Fall wurden jene spezifischen Werte verwendet, die auch beim System „U2 Verlängerung“ verwendet wurden (siehe Kap. 4.7.1.1, S. 35).

4.7.2.3 Herstellung der Straße

Unter Berücksichtigung der CO₂ und CH₄ Emissionen bei der Herstellung der Straße ergibt sich das Land für Fossilenergie mit $4 \cdot 10^{-3}$ [m²/Pkw-km.a]. Die Berechnung findet sich im Anhang in Tabelle 28, S. 68.

4.7.2.4 Direkte Flächenbeanspruchung

Die direkte Flächenbeanspruchung ergibt unter Berücksichtigung der Flächen für Fahrwege und Parkplätze $2,09 \cdot 10^{-4}$ [ha/Pkw-km.a] beziehungsweise 3,9 [ha/a]. Die Berechnung findet sich im Anhang in Tabelle 30, S. 70.



5 Ergebnisse und Interpretation

Im vorliegenden Kapitel wird der Ökologische Fußabdruck sowohl für die U2-Verlängerung, als auch für das Referenzsystem „Motorisierter Individualverkehr“ dargestellt, und um die entsprechende Interpretation der Daten ergänzt.

5.1 System „U2 Verlängerung“

Im vorliegenden Abschnitt wird der Ökologische Fußabdruck der U2-Verlängerung sowohl für die Bereitstellung der Infrastruktur und dem Betrieb gemeinsam, also auch getrennt voneinander dargestellt und interpretiert. Darüber hinaus wird der Einfluss der Parameter Strommix, Traktionsstromkonsum und Auslastungsgrad auf den ÖF ermittelt.

5.1.1 Ökologischer Fußabdruck der U2 Verlängerung

Der Ökologische Fußabdruck der U2-Verlängerung beträgt rund 3.100 ha/a, der spezifische 0,16 m²/Pers-km.a¹¹. Mit der U2-Verlängerung erhöht sich der jährliche ÖF der Stadt Wien von 6.236.500 ha/a auf 6.239.600 ha/a (+ 0,05%). Das Land für Fossilenergie dominiert den ÖF der U2-Verlängerung mit 99% (Tabelle 15).

Unter Berücksichtigung von Bereitstellung und Betrieb der U2-Verlängerung ergeben sich 64 g CO₂-äqu./Pers-km.a, wobei auf den Betrieb 37 g CO₂-äqu./Pers-km.a (57%) entfallen. (Tabelle 16). Der treibhausgasrelevante Anteil des Betriebes macht 0,08% der Wiener Treibhausgasemissionen aus (8,83 Mio. t CO₂-äqu./a, Bezugsjahr 2002 [67]).

Beim Betrieb selbst, verursacht der Traktionsstrom 14 g CO₂-äqu./Pers-km.a bzw. 1,3 g CO₂-äqu./Platz-km.a. Dieser Wert ist mit jenem des ÖBB Personenverkehrs vergleichbar (16,4 g CO₂/Pers-km) [68].

Die Bereitstellung der Bauwerke und der Fahrzeuge erhöhen den jährlichen ÖF der Stadt in Wien in der Bauphase (2001 – 2013) um durchschnittlich 0,16%, der Betrieb ab 2013 um 0,03%.

¹¹ Rahmenbedingungen: Bezugsjahr 2025, Auslastungsgrad 9,5%, Österreichweiter Strommix

Tabelle 15: Ökologischer Fußabdruck der U2-Verlängerung

Kategorie	Land für Fossilenergie (CO ₂ -Fußabdruck) [ha/a]	Beanspruchtes Land [ha/a]	ÖF _{gesamt} [ha/a]	ÖF _{normiert} [m ² /Pers-km.a]	ÖF rel. [%]
Bereitstellung	1.319	1	1.321	0,07	43%
Bauwerke	1.163	1,3	1.165	0,06	38%
Züge	156	6,E-06	156	0,01	5%
Betrieb	1.740	17	1.758	0,09	57%
Traktionsstrom	676	9,31	686	0,04	22%
Strom Stationen	590	8,13	598	0,03	19%
Wärme Stationen	474	-	474	0,02	15%
Direkte Flächenbeanspruchung		0,30	0,30	9,E-06	0,010%
Fahrweg + Stationen		0,18	0,18		0%
Bauabfälle		0,13	0,13		0%
Gesamt	3.060	19	3.079	0,16	100%

Tabelle 16: Ökologischer Fußabdruck der U2-Verlängerung und Treibhausgasemissionen

Lebenszyklusphase	Emission [g CO ₂ -äqu./Pers-km.a]	Land für Fossilenergie (CO ₂ -Fußabdruck) [ha/a]	Beanspruchtes Land (indirekt)	Beanspruchtes Land (direkt)	ÖF _{gesamt} [ha/a]
Bereitstellung und Betrieb	64	3.060	19	0,30	3.079
Bereitstellung	28	1.740	2		1.742
Betrieb	37	1.319	17		1.337

Abbildung 4 zeigt, dass 43% auf die Bereitstellung der Infrastruktur sowie der Fahrzeuge entfallen, und 57% durch den Betrieb der U-Bahn verursacht werden. Die direkte Flächenbeanspruchung durch Stationen, Fahrweg und in Anspruch genommener Deponieflächen ist mit < 1% vernachlässigbar. Die absolut größten Beiträge entstehen durch die Bereitstellung von Stahl und Beton, sowie durch den Energiekonsum im Betrieb (Abbildung 7).

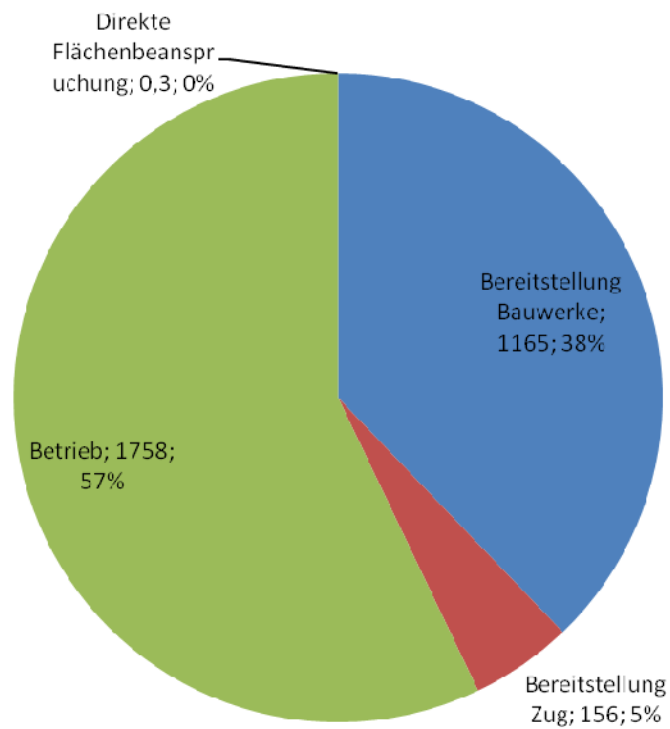


Abbildung 4: Anteile von Bereitstellung und Betrieb am Ökologischen Fußabdruck der U2-Verlängerung ($\text{ÖF}_{\text{Bereitstellung+Betrieb}} 3.079 \text{ ha/a}$)

Bereitstellung: Abbildung 5 zeigt, dass bei der Bereitstellung der immobilen Infrastruktur die Beton- und Stahlherstellung mit 84% dominiert. Der direkte Energieaufwand beim Bau, sowie jener zur Herstellung der Güter Kupfer und Aluminium spielen mit 16% eine untergeordnete Rolle. Die Herstellung der U-Bahngarnituren hat mit einem Anteil von 5% ebenfalls einen geringen Anteil am gesamten ÖF.

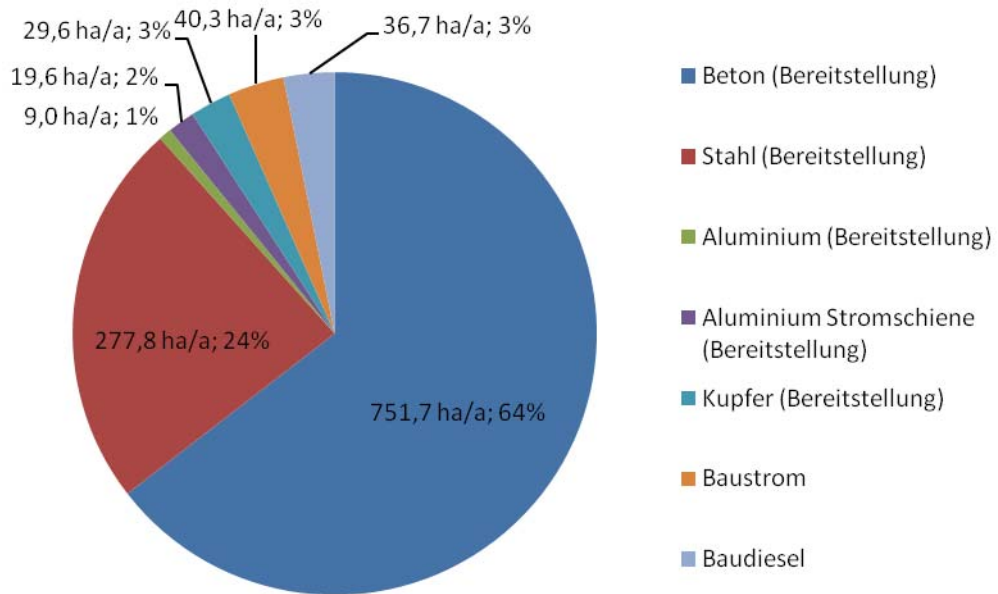


Abbildung 5: Ökologischer Fußabdruck der Infrastrukturbereitstellung ($\text{ÖF}_{\text{Bereitstellung}} = 1.758 \text{ ha/a}$)

Betrieb: Abbildung 6 zeigt, dass beim Betrieb 39% auf den Traktionsstrom und 61% auf die Energiebereitstellung für die Stationen entfallen. Grundsätzlich profitiert der Betrieb von vergleichsweise niedrigen Strombedarf der V-Wagen und den im Ländervergleich hohen Anteil an Stromversorgung durch Wasserkraft.

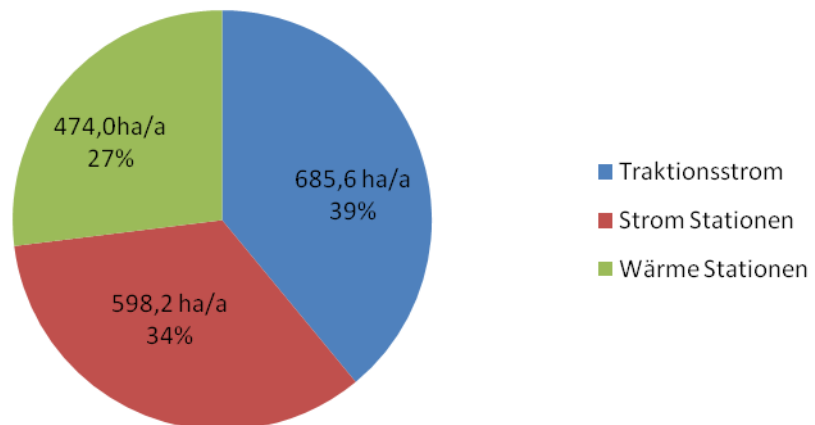


Abbildung 6: Ökologischer Fußabdruck des Betriebes ($\text{ÖF}_{\text{Betrieb}} = 1.321 \text{ ha/a}$)

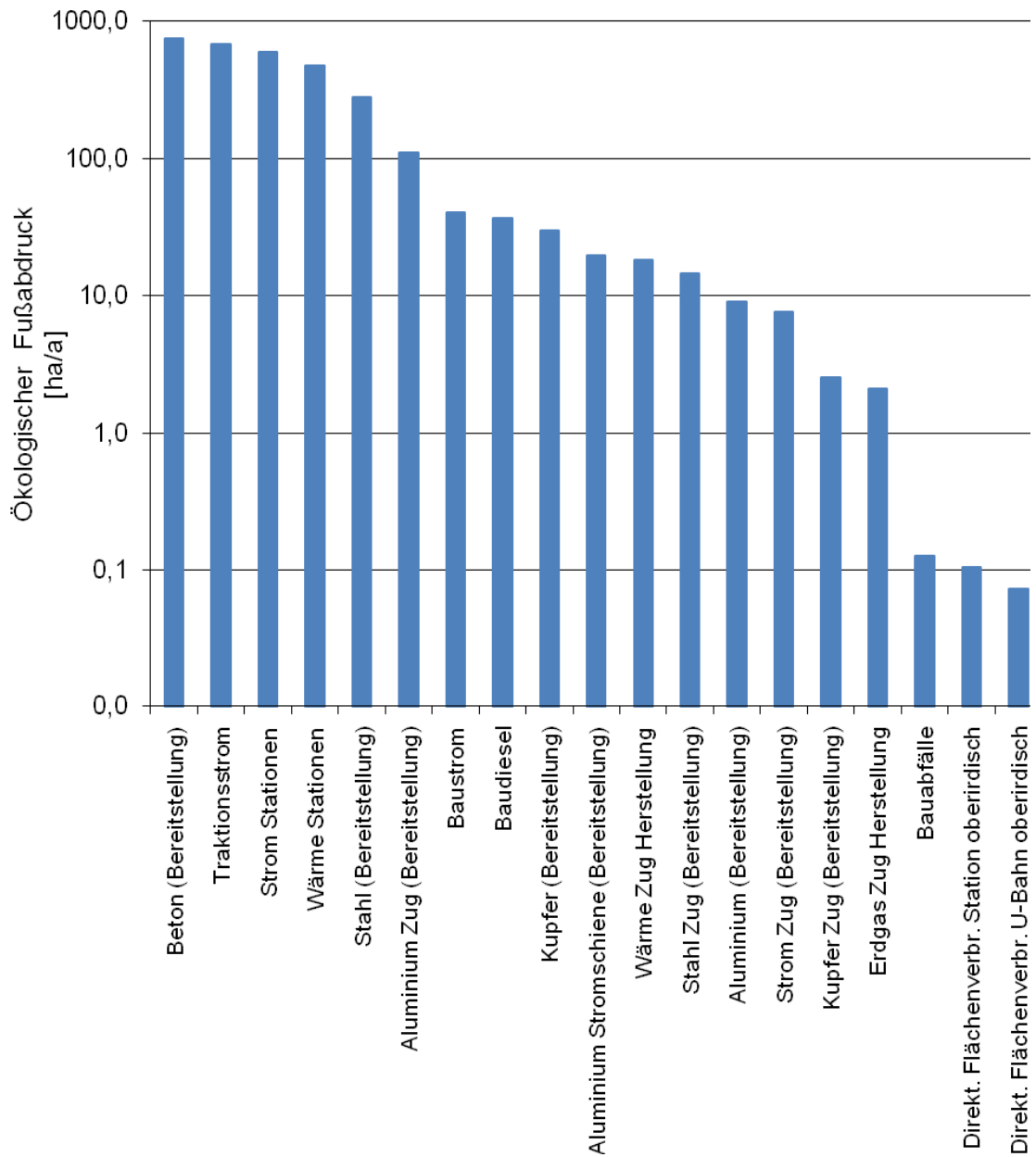


Abbildung 7: Einzelkomponenten des Ökologischen Fußabdruckes der U2Verlängerung ($\text{ÖF}_{\text{Bereitstellung+Betrieb}}$ 3.079 ha/a)

5.1.2 Parametervariation

Im vorliegenden Abschnitt werden die Auswirkungen der Variation der Parameter Strommix, Traktionsstromkonsum und Auslastungsgrad auf den ÖF der U2-Verlängerung dargestellt und interpretiert.

5.1.2.1 Strommix

Tabelle 17 zeigt den Ökologischen Fußabdruck in Relation zum Strommix, um die Elastizität der beiden Kenngrößen zu veranschaulichen. Je nach Wahl des Strommix (vgl. Kap.(1), S. 35) schwankt der Ökolog. Fußabdruck zwischen 0,16 und 0,25 m²/Pers-km.a. Eine annähernde Verdopplung der CO₂-äquivalenten Emission von 196 g CO₂-äqu./kWh auf 432 CO₂-äqu./kWh bewirkt einer Erhöhung des ÖF um rund 50%. Somit liegt eine lineare Korrelation vor, die den starken Einfluss der Treibhausgasemissionen auf den ÖF der U2-Verlängerung widerspiegelt.

Tabelle 17: Ökologischer Fußabdruck der U2-Verlängerung in Abhängigkeit vom Strommix

Strommix	Emission [kg CO ₂ -äqu. / kWh]	ÖF _{normiert} [m ² /Pers-km.a]	Relation [%]
El-KW-Park-AT-2010	0,196	0,162	100%
El-KW-Park-EU-17-2010	0,397	0,212	131%
Strom Mix Wien - Verbrauch	0,336	0,234	145%
UCTE Mix 2009	0,432	0,247	152%

Tabelle 19 zeigt die normierten CO₂-Emissionen in Abhängigkeit vom Strommix. Dabei wird lediglich der Traktionsstromkonsum berücksichtigt. Je Personenkilometer schwanken die Emissionen zwischen 14 und 31 g CO₂-äqu./Pers-km, je Platzkilometer zwischen 1,3 und 3,0 g CO₂-äqu./Pers-km.

Tabelle 18: Treibhausgasemissionen vom Traktionsstromkonsum in Abhängigkeit vom Strommix

Strommix	Emission [kg CO ₂ -äqu. / kWh]	Emissionen [g CO ₂ -äqu./Pers-km]	Emissionen [g CO ₂ -äqu./Platz-km]
El-KW-Park-AT-2010	0,196	14	1,3
El-KW-Park-EU-17-2010	0,336	24	2,3
Strom Mix Wien - Verbrauch	0,397	29	2,7
UCTE Mix 2009	0,432	31	3,0

5.1.2.2 Traktionsstromkonsum

Tabelle 19 zeigt den Ökologischen Fußabdruck in Relation zum Traktionsstromkonsum, um die Elastizität der beiden Kenngrößen zu veranschaulichen. So bewirkt beispielweise



die Halbierung des Traktionsstromkonsum von 12 auf 6 kWh/FZG-km eine Reduktion des ÖF von 18%. Somit eine unterlineare Korrelation vor.

Tabelle 19: Ökologischer Fußabdruck der U2-Verlängerung in Abhängigkeit vom Traktionsstromkonsum

Traktionsstromkonsum [kWh/km]	Datenquelle für Traktionsstromkonsum (Details s. Kap. 4.6.3.3, S.26)	Ökol. Fußabdruck [m ² /Pers-km.a]
6	Messungen am Wiener V-Wagen	0,16
12	Schätzwert für Wiener V-Wagen auf Basis des Osloer V-Wagens	0,20
17	Mittelwert auf Basis des Verbrauches an der U1, U2, U3 und U4, wobei hier hauptsächlich U-Wagen im Einsatz waren	0,23

5.1.2.3 Auslastungsgrad

Abbildung 8 zeigt den ÖF in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad der U-Bahngarnituren. Dabei zeigt sich, dass sich der ÖF einem theoretischen Grenzwert von ca. 0,01 m²/Pers-km.a asymptotisch annähert, wobei sich der ÖF bis zu einem Auslastungsgrad von ca. 25% - 30% deutlich verringert. Die derzeit prognostizierte Auslastung für das Jahr 2025 liegt bei ca. 9%, was wiederum einen ÖF von 0,16 m²/Pers-km.a bewirkt.

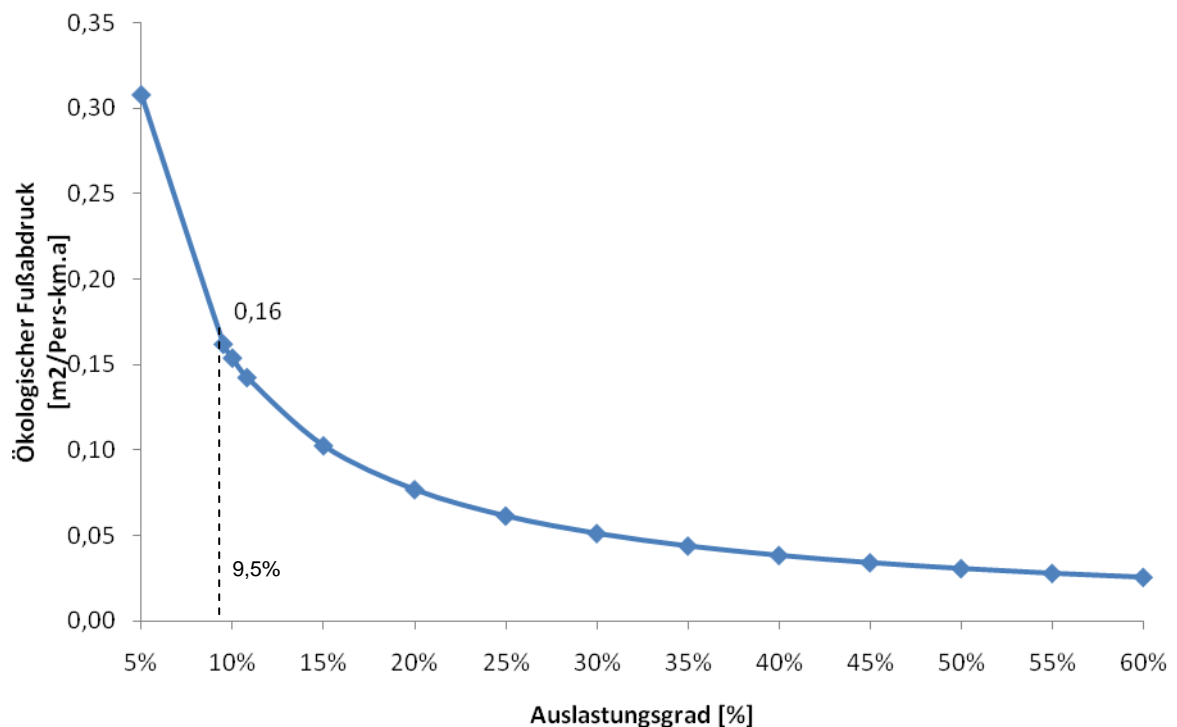


Abbildung 8: Ökologischer Fußabdruck der U2-Verlängerung in Abhängigkeit des Auslastungsgrades

Die Stadt Wien strebt als strategische Ziel einen Modal-Split-Anteil des ÖV von 40% an [15]. Berechnungen des ÖIR zufolge, lässt sich das Ziel mit einem Maßnahmenbündel im Bereich des ÖVs und der MIVs erreichen. Dieses Maßnahmenbündel lässt Fahrgassteigerungen an der U2 von 10% bis 20% erwarten [69]. Unter Annahme einer 15% Steigerung gegenüber der Prognose 2025 ergeben sich ein Auslastungsgrad von 10,9% und damit ein Ökologischer Fußabdruck von 0,14 m²/Pers-km.a.

5.2 Referenzsystem „Motorisierter Individualverkehr“

5.2.1 Ökologischer Fußabdruck des MIV

Die Transportleistung der U-Bahn mit 190 Mio. Pers-km/a wird im hypothetischen Referenzsystem durch den MIV erbracht. Dabei beträgt der Ökologische Fußabdruck beträgt rund 10.100 ha/a, der spezifische 0,54 m²/Pers-km.a¹². Dadurch würde sich der jährliche ÖF der Stadt Wien von 6.236.500 ha/a auf 6.246.600 ha/a (+ 0,16%) erhöhen. Das Land für Fossilenergie dominiert den ÖF des MIV mit über 99,9%.

98% des ÖF entfallen auf den Energiekonsum im Betrieb, sowie den Energieaufwand zur Bereitstellung der Güter für die PKW Produktion. 2% entfallen auf den Energieaufwand im PKW Werk, weniger als 1% die Herstellung der Straße und den direkten Flächenbeanspruchung durch Fahrwege und Parkplätze.

5.2.2 Parametervariation

Abbildung 9 zeigt die Abhängigkeit des ÖF vom Besetzungsgrad im MIV, wobei eine Verdopplung des Besetzungsgrades eine Halbierung des ÖF bewirkt. Dies begründet sich in der Dominanz des Betriebes auf den ÖF des MIV

¹² Bezugsjahr 2025, Besetzungsgrad 1,4 Personen/PKW

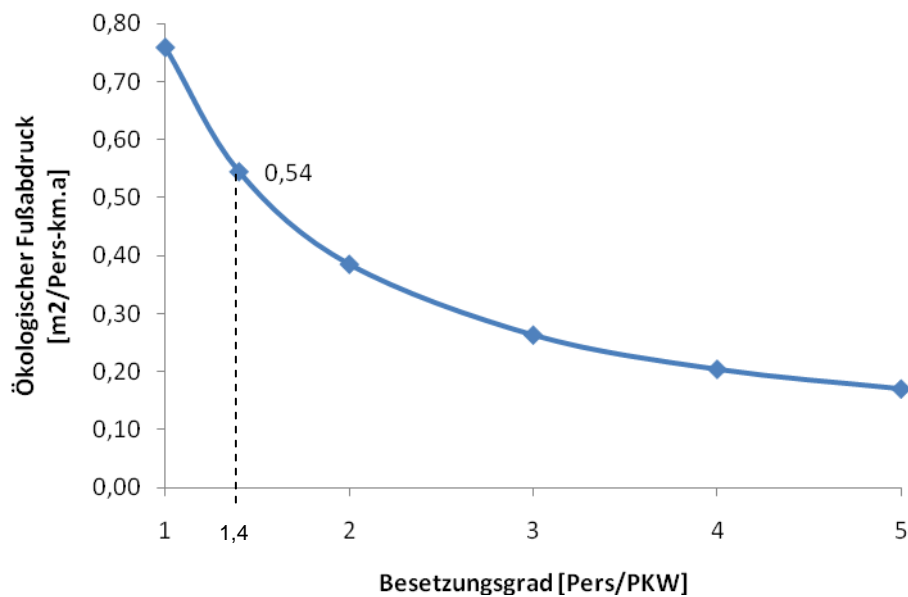


Abbildung 9: Ökologischer Fußabdruck des MIV in Abhängigkeit vom Besetzungsgrad

5.3 Vergleich der Ergebnisse

5.3.1 U-Bahn versus PKW

Abbildung 10 zeigt, dass der normierte Ökologische Fußabdruck des PKW-Transportes rund 3-mal höher ist als jener des U-Bahntransportes.

Begründet wird die Differenz damit, dass a) der betriebliche Energieaufwand im MIV deutlich über jenem des ÖV liegt. Dies bestätigt sich auf durch das Energieflussbildes der Stadt Wien [70]. Dabei werden bei gleichen Modal-Split Anteilen des MIV bzw. ÖV dem MIV ~91% und dem ÖV ~9% der im Verkehrssektor konsumierten Energie zugeschrieben, und b) beim MIV hauptsächlich fossile Energieträger im Einsatz sind, welche wiederum für die großen CO₂-Sorbtiionsflächen verantwortlich sind.

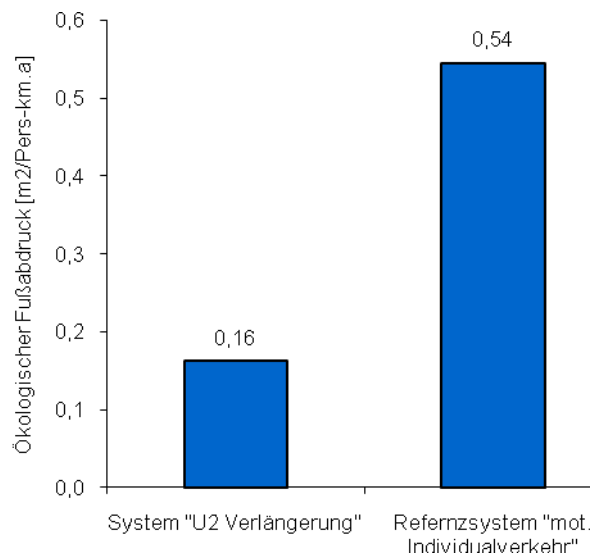


Abbildung 10: Vergleich des Ökologischen Fußabdruckes anhand eines Personenkilometers bei der U2-Verlängerung und dem Referenzsystem „motorisierter Individualverkehr“

Tabelle 20 vergleicht die direkte Flächenbeanspruchung der U2-Verlängerung mit dem MIV im Verkehrskorridor. Dabei liegt der absolute Flächenbeanspruchung des MIV rund 6-mal höher als jener der U2-Verlängerung. Ein ähnliches Bild zeigt sich auch für Flächenbedarf des gesamten ÖV-Netzes in Wien. Dieses beansprucht rund 11% des verkehrlichen Gesamtflächenbedarfes [71, S. 31].

Tabelle 20: Direkte Flächenbeanspruchung im System „U-Bahn“ und im „Referenzsystem „MIV“

System	Beanspruchtes Land (Direkte Flächenbeanspruchung)	Relation
	[ha]	[%]
System „U2-Verlängerung“	18	100%
Referenzsystem „MIV“	98	555%

5.3.2 Stadt Wien versus Region Merseyside

Jene Studie, welche von der Methodik her mit der vorliegenden vergleichbar ist, ist jene über den Personentransport in der Region Merseyside (UK) [23].

Abbildung 11 zeigt, dass die Ergebnisse der einzelnen Verkehrsträger korrespondieren. Sowohl PKW (Wien) und PKW (Merseyside), als auch die U-Bahn (Wien) und Zug (Merseyside) liegen beim Ökologischen Fußabdruck in der gleichen Größenordnung. Überraschend ist der niedrigere Abdruck der U-Bahn gegenüber dem Zug, obwohl die U-Bahn Errichtung aufgrund der Tunnelbauwerke aufwendiger ist. Das Ergebnis lässt sich durch die Energieeffizienz der Wiener U-Bahn und den angenommenen Strommix erklären.

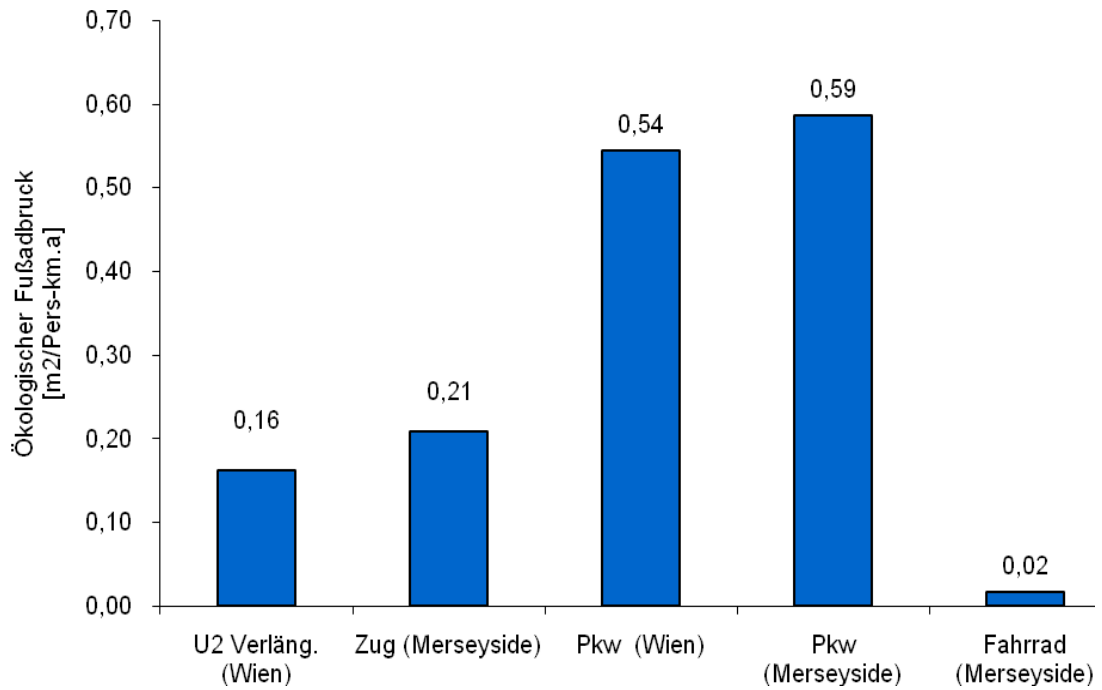


Abbildung 11: Vergleich der Ergebnisse mit der Studie von Merseyside



6 Schlussfolgerungen und Diskussion

6.1 Methodisch

In diesem Abschnitt werden die methodischen Schlussfolgerung sowie Diskussionen A) in Hinblick auf das Ressourcen- und Umweltmanagement bei den Wiener Linien erläutert, und B) in Bezug auf die angewendete Methode und den ermittelten Fußabdruck dargestellt:

A) Schlussfolgerungen in Hinblick auf das zweiten Arbeitspaketes, bei dem eine umfassende ressourcen- und umweltbezogene Informationsgrundlage für die Wiener Linien erstellt wird:

- Der Bewertungsindikator „Ökologischer Fußabdruck“ erlangte aufgrund seiner einfachen Verständlichkeit, sowie den häufigen und vielfältigen Anwendungen einen großen öffentlichen Bekanntheitsgrad. Somit ist er für die mediale Kommunikation gut geeignet. Als hochaggrierter Indikator liefert er auf der Mesoebene einen Vergleichswert zwischen a) verschiedenen Verkehrsträgern, und b) dem Sektor Mobilität im gesamtstädtischen Kontext. Somit bietet er eine grobe Orientierung im Bereich der ökologischen Nachhaltigkeit.
- Zur operational nutzbringenden ökologischen Bewertung der Wiener Linien ist der ÖF als einziger Indikator aus zwei Gründen nicht hinreichend:

1) Zwei für das Unternehmen entscheidende Aspekte werden aufgrund methodischer Restriktionen ausgeschlossen:

- Die Emissionssituationen der verglichenen Verkehrsträger werden unzureichend abgebildet. Der ÖF berücksichtigt lediglich die CO₂-Emissionen, und lässt stoffliche Emissionen (Cu, Zn, Pb, Cd, persistente org. Substanzen etc.) unberücksichtigt. Somit wird nur ein global wirksamer Stoff berücksichtigt. Umweltrelevante Auswirkungen können auf der Meso- und Mikroebene nicht hinlänglich beurteilt werden, da die ökologische Tragfähigkeit nicht hinreichend in der Methode verankert ist.
- Der ÖF zielt primär auf die Bewertung erneuerbarer Ressourcen. Die technische Infrastruktur der U-Bahnlinie besteht aber vorwiegend aus nicht-erneuerbaren Ressourcen wie Beton, Stahl, Kupfer und Aluminium. Diese werden beim ÖF aus methodischen Gründen nur indirekt berücksichtigt – nämlich über den Energieaufwand zu deren Bereitstellung.

2) Aufgrund des hohen Aggregationsniveaus liefert der Indikator keine direkten, prozessbezogenen Informationen. Diese sind allerdings erforderlich, um a) die ökologische Relevanz zu beurteilen, und b) Steuerungsmaßnahmen in Hinblick auf Ressourcenschonung und Umweltverträglichkeit abzuleiten.

Beide Aspekte legen nahe, eine Informationspyramide an ressourcen- und umweltorientierten Indikatoren in Abhängigkeit von der Zielgruppe zu entwickeln. An der Spitze stehen medial kommunizierbare Indikatoren, an der Basis jene die als Entscheidungsgrundlage für die operative Unternehmenssteuerung herangezogen werden können. Als Informationsgrundlage dienen u.a. Stoff- und Energiebilanzen auf Unternehmensebene.

- Sollte der Ökologische Fußabdruck in Zukunft für das gesamte Netz der Wiener Linien ermittelt und im Berichtswesen aufgenommen werden, so werden für dessen Berechnung zwei verfeinerte Methoden vorgeschlagen:

1) Sustainable Process Index SPI [20]. Dieser greift das Prinzip von Wackernagel und Rees auf, wobei das gesamte Spektrum an Emissionen und nicht-erneuerbare Ressourcen verstärkt Berücksichtigung finden. Wenngleich die Methode umfassender ist und wesentlich Kritikpunkte an der Originalmethode behebt, so dominieren auch hier die fossilen Treibstoffe den Fußabdruck.

2) Aufgrund der indirekten Bewertung nicht-erneuerbarer Ressourcen durch Inkludierung der Energieaufwendungen zur Bereitstellung der Güter, dominieren die fossilen Energieträger den gesamten Fußabdruck. Eine isolierte Berechnung des CO₂-Fußabdruckes verändert das Ergebnis somit nicht signifikant. Folgende Vorgangsweise wird vorgeschlagen: 1) Anwendung der Methode des kumulierten fossilen Energieaufwandes (KEA) [72, 73], 2) Umrechnung der Treibhausgas-Emissionen in Flächeneinheiten im Sinne des Ökologischen Fußabdruckes.

Den beiden Methoden sind die Stoff- und Energiebilanzen auf Unternehmensebene (Hauptsystem) gemein. Diese dienen neben der Quantifizierung direkter Effekte als Ausgangspunkt zur Inventarisierung der indirekten Effekte (Hintergrundsystem).



B) Schlussfolgerungen in Bezug auf den Fußabdruck von U-Bahn und PKW:

- In der vorliegenden Arbeit, wurden lediglich zwei ökologische Fußabdrücke gegenüber gestellt, um Aussagen hinsichtlich des ökologisch verträglicheren Szenarios im Sinne der Methode zu ermitteln. Somit wurde ein relativer Vergleichswert ausgewiesen. Die Vorgangsweise lässt keine Schlussfolgerungen in Bezug auf die absolute ökologische Verträglichkeit der U-Bahnverlängerung bzw. des PKW Transportes zu. Grund ist, dass sowohl die globale, nationale und vor allem die lokale Verträglichkeit aufgrund mangelnder Datengrundlagen nicht nachvollziehbar berechnet werden können.
- Als Einschränkung gilt derzeit die Vergleichbarkeit des Indikators bei spezifischen Sektoren, Aktivitäten oder Produkten. Speziell beim Mobilitätsfootprint sind kaum Vergleiche mit anderen Studien möglich, da Systemgrenzen, Allokationsregeln und Flächenfaktoren stark variieren. Eine Ausnahme bildet die Studie in der Region Merseyside (GB) [23], welche mit der vorliegenden vergleichbar ist. Die Bewertungsmethode des ÖF ist somit derzeit ein Konzept, in dessen Grenzen sehr unterschiedliche Ansätze verfolgt werden. Ein Standardisierungsverfahren würde hier Abhilfe schaffen. Dies bestätigt sich auch beim Städtevergleich von Ökologischen Fußabdrücken [6].
- Die Umrechnung des Ressourcenkonsums auf Flächeneinheiten mittels Faktoren, beruht auf Annahmen. Die Wahl von globalen, nationalen, oder lokalen Ertragsfaktoren können Schwankungen beim Fußabdruck um den Faktor 2 bewirken [74]. Die berechneten Werte der U2-Verlängerung sind dadurch mit deutlichen Unsicherheiten behaftet.
- Wichtige Einflussfaktoren auf die Größe des ÖF im Verkehrsbereich sind a) der Energiemix in den Vorketten des materialspezifischen Ressourceneinsatzes sowie beim Betrieb von Fahrzeugen und der immobilien Infrastruktur, und b) der Besetzungsgrad der Fahrzeuge.

6.2 Inhaltlich

Die inhaltlichen Schlussfolgerungen und Diskussionen werden A) aus gesamtstädtischer Sicht, und B) aus Sicht der Wiener Linien beleuchtet:

- A) Soll der ÖF der Stadt Wien im Sektor Verkehr gesenkt werden, so kann es durchaus sinnvoll sein, den ÖF der Wiener Linien durch Angebots- und Netzerweiterung geringfügig zu erhöhen, um damit eine deutliche Reduktion an MIV Fahrten zu erzielen. Orientierung liefert der direkte Energieeinsatz¹³ in der Stadt Wien. Rund 9% der im Wiener Verkehrssektor aufgewendeten Energie wird für den Betrieb des ÖV aufgewendet, rund 91% für den MIV [75]. Gleichzeitig bedient der ÖV 1/3 der Wege, der MIV ebenso. Um den Ökologischen Fußabdruck im Verkehrssektor zu senken, bedarf es aus der Sicht ökonomischer und umweltpolitischer Überlegungen, zuerst wirkungsvoller Maßnahmen im MIV. Aus gesamtstädtischer Sicht zeigen deshalb Energieeffizienzmaßnahmen im ÖV keine vergleichbaren Wirkungen, wie treibhausgasrelevante Reduktionsmaßnahmen beim MIV.
- B) Soll ausschließlich der ÖF der Wiener Linien gesenkt werden, so gilt es in Zukunft
- a) beim Bau jenen Beton und Stahl zu verwenden, der in den Vorketten geringere CO₂-Emissionen verursacht,
 - b) im Betrieb jenem Strommix den Vorzug zu geben, der geringere CO₂-Emissionen ausweist,
 - c) den Energiekonsum der U-Bahngarnituren und der Stationen zu reduzieren,
 - d) den Besetzungsgrad zu erhöhen,
 - e) unter Berücksichtigung der Funktion des jeweiligen Verkehrsträgers, den optimalen Mix zwischen Straßenbahnen, Bussen und U-Bahnen zu finden. Der Grund liegt im geringen energetischen und materiellen Aufwand von Straßenbahn und Bus im Vergleich zur U-Bahn. Dies hat im Sinne des Ökologischen Fußabdrucks eine geringere Energiefläche zur Folge.

Einzelne dieser Maßnahmen, die sich aus dem Konzept des Ökologischen Fußabdrucks ableiten, können im Widerspruch zu verkehrspolitischen oder verkehrswirtschaftlichen Zielsetzungen stehen: Eine Erhöhung des Besetzungsgrades könnte beispielsweise durch eine Einschränkung der Betriebszeiten erreicht werden. Dies zeigt, dass im Sinne einer Güterabwägung der ÖF nur als ein Indikator gelten kann, der durch andere, die Ziele des Verkehrsmittelangebotes besser abbildende Maßstäbe ergänzt werden muss.

¹³ Wenngleich bei einer Lebenszyklusbetrachtung der ÖF aufgrund des Betriebes der U-Bahnverlängerung 57% beträgt, so ist davon auszugehen, dass der Anteil im gesamten Netz der Wiener Linien deutlich höher ausfällt. Der kumulierte Energieaufwand des Materialeinsatzes von Straßenbahnen und Bussen ist deutlich geringer im Vergleich zu dem betrieblichen Energieaufwand. Somit ist bei gesamtstädtischer Betrachtung der direkte Energieeinsatz von entscheidender Bedeutung.





7 Literatur

1. Österr Normungsinstitut (2005): *ÖNORM S 2096-1 (Stoffflussanalyse - Teil 1: Anwendung in der Abfallwirtschaft - Begriffe)*, Wien.
2. Stadt Wien (2004): *Strategieplan Wien*, <http://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/strategien/strategieplan/pdf/strategieplan2004.pdf>, Hrsg.: M.S.u.S. Magistrat der Stadt Wien.
3. Daxbeck, H. (2001): *Abwasserrelevante Silberströme in Wien*, Hrsg.
4. Paumann, R., R. Obernosterer, and P.H. Brunner (1997): *Wechselwirkung zwischen anthropogenem und natürlichem Stoffhaushalt der Stadt Wien am Beispiel von Kohlenstoff, Stickstoff und Blei*, <http://www.wien.gv.at/umweltschutz/pool/pdf/stoffhaushalt.pdf>, Technische Universität Wien, Hrsg.: S.W.-M. 22, Wien.
5. Obernosterer, R., I. Reiner, and R. Smutny (2003): *Urbanes Ressourcenmanagement: Fallstudie Wien. Teilbereich Schadstoffmanagement diffuser Metallemissionen (Urban Resource Management: Case study Vienna. Subarea pollution management of diffuse metal emissions)*, Hrsg., Wien/Villach.
6. Daxbeck, H., A. Kisliakova, and R. Obernosterer (2001): *Der ökologische Fußabdruck der Stadt Wien (Projekt Footprint)*, <http://www.wien.gv.at/umweltschutz/nachhaltigkeit/pdf/fuss-studie.pdf>, Ressourcen Management Agentur (RMA) im Auftrag der Magistratsabteilung 22 - Umweltschutz der Stadt Wien, Hrsg., Wien.
7. Daxbeck, H., et al. (1994): *Die Stoffflußanalyse als Instrument für eine nachhaltige urbane Entwicklung - Studie zur Wiener Internationalen Zukunftskonferenz - WIZK 94 (Substance flow analysis as tool for sustainable urban development - A study provided for Vienna International Future Conference WIZK 94)*, UTEC Absorga, Hrsg., Wien.
8. Daxbeck, H., et al. (1996): *Der anthropogene Stoffhaushalt der Stadt Wien - N, C und Pb (The antropogenic metabolism of Vienna - Nitrogen, Carbon and Lead)*, Institut für Wassergüte Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft, Technische Universität Wien, Hrsg., Wien.
9. Maier, R., et al. (1997): *Der natürliche Stoffhaushalt als Grundlage einer nachhaltigen Entwicklung Wiens: Unter besonderer Berücksichtigung des natürlichen Kohlenstoff-, Stickstoff- und Bleihaushaltes: Zoologisch-Botanische Ges.*
10. Stadt Wien *Vom ökologischen Fußabdruck zum Ressourcenmanagement*, <http://www.wien.gv.at/umweltschutz/nachhaltigkeit/fussabdruck/ressourcen.html>, 05.08.2010.

11. Giljum, S., et al. (2006): *Wissenschaftliche Untersuchung und Bewertung des Indikators „Ökologischer Fußabdruck“* Forschungsbericht 363 01 135, Hrsg., Wien.
12. Verkehrsclub Österreich (2007): *Österreichs Mobilität im Umweltcheck*, Factsheet, Verkehrsclub Österreich, Hrsg., Wien.
13. Plattform Footprint (2008): *Footprint - die Grenzen von Planet Erde - Zahlen und Hintergrund-Info zum Ökologischen Fußabdruck*
<http://www.footprint.at/index.php?id=3858>, 05.08.2010.
14. Herry Consult GmbH (2007): *Verkehr in Zahlen*, Hrsg.: BMVIT (Abteilung V/Infra 5), Wien.
15. Stadt Wien (2010): *Zielsetzungen für 2020 - Masterplan Verkehr Wien 2003*. Available from:
<http://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/strategien/mpv/zielsetzungen/index.html>.
16. Wackernagel, M. (1994): *Ecological footprint and appropriated carrying capacity: a tool for planning toward sustainability* Dissertation, Faculty of Graduate Studies, The University of British Columbia.
17. Wackernagel, M. and W. Rees (1997): *Unser ökologischer Fußabdruck*. 1 ed, Basel Boston Berlin: Birkhäuser Verlag.
18. Wackernagel, M., et al. (2005): *National Footprint and Biocapacity Accounts 2005: The underlying calculation method*, Global Footprint Network, Hrsg., Oakland.
19. Barrett, J., et al. (2002): *A Material Flow Analysis and Ecological Footprint of York*,
<http://www.york.ac.uk/inst/sei/ecofootprint/york%20technical%20report.PDF>, Stockholm Environment Institute, Hrsg., Stockholm.
20. Krotscheck, C. (1995): *Prozessbewertung in der nachhaltigen Wirtschaft*. Technische Universität Graz, Graz.
21. König, F. and C. Krotscheck (1997): *Ökologischer Fußabdruck des Bausektors Graz*, Institut für Verfahrenstechnik, Technische Universität Graz, Hrsg., Graz.
22. Bastianoni, S., et al. (2007): *Environmental and Economic Evaluation of Natural Capital Appropriation through Building Construction: Practical Case Study in the Italian Context*. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 36(7): p. 559-565.
23. Barrett, J. and A. Scott (2003): *The Application of the Ecological Footprint: a case of passenger transport in Merseyside*. *Local Environment*, 8(2): p. 167-183.



24. Chester, M.V., A. Horvath, and S. Madanat (2010): *Comparison of life-cycle energy and emissions footprints of passenger transportation in metropolitan regions*. Atmospheric Environment, 44(8): p. 1071-1079.
25. Holden, E. and K.G. Høyer (2005): *The ecological footprints of fuels*. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 10(5): p. 395-403.
26. Chi, G. and B. Stone (2005): *Sustainable Transport Planning: Estimating the Ecological Footprint of Vehicle Travel in Future Years*. Journal of Urban Planning and Development, 131(3): p. 170-180.
27. Scotti, M., C. Bondavalli, and A. Bodini (2009): *Ecological Footprint as a tool for local sustainability: The municipality of Piacenza (Italy) as a case study*. Environmental Impact Assessment Review, 29(1): p. 39-50.
28. Lewan, L. and C. Simmons (2001): *The use of Ecological Footprint and Biocapacity Analyses as Sustainability Indicators for Subnational Geographical Areas: A Recommended Way Forward*, <http://old.bestfootforward.com/downloads/ECIP%20Final%20Report%20with%20Annexes.pdf>, Ambiente Italia (ECP), Hrsg.
29. Deußner, R. (2007): *Netzanalyse Wiener Linien 2007. Teil 2 Varianten und Gesamtnetz*, Österreichisches Institut für Raumplanung (OIR) / Wiener Linien GmbH & CO KG, Hrsg., Wien.
30. Deußner, R. and G. Kovacic (2010): *Persönliche Kommunikation (Persönliche Kommunikation)*,
31. Ossberger, M. (2010): *Persönliche Kommunikation (Persönliche Kommunikation)*, 14.06.2010, J. Lederer.
32. Struckl, W. (2007): *Green Line - Umweltgerechte Produktentwicklungsstrategien für Schienenfahrzeuge auf Basis der Lebenszyklusanalyse des Metrofahrzeuges Oslo* Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik (E 307), Technische Universität Wien.
33. Fanpage der Wiener Linien (2010): *Technische Daten V-Wagen*, <http://www.fpdwl.at/fahrzeuge/showtech.php?type=v>, 18.08.2010.
34. Kral, U. (2010): *Mündliche Auskunft bezüglich Stehplatzdichten in U-Bahnen (Persönliche Kommunikation)*, P. Steckler.
35. Wiener Linien (2010): *Persönliche Kommunikation (Persönliche Kommunikation)*,
36. Struckl, W. (2010): *Persönliche Kommunikation (Persönliche Kommunikation)*, J. Lederer.
37. Brunner, P.H. and H. Rechberger (2004): *Practical Handbook of Material Flow Analysis*, Boca Raton: Lewis Publishers.

38. Häusler, D., et al. (2008): *Masterplan Verkehr 2003 - Evaluierung und Fortschreibung 2008*, <http://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/studien/pdf/b008012.pdf>, Magistratsabteilung 18 – Stadtentwicklung und Stadtplanung (MA 18), Hrsg., Wien.
39. Gruden, D. (2008): *Umweltauswirkungen des Automobils*, in *Umweltschutz in der Automobilindustrie* Vieweg+Teubner. p. 329-358.
40. Gruden, D. (2008): *Umweltschutz in der Produktion*, in *Umweltschutz in der Automobilindustrie* Vieweg+Teubner. p. 89-124.
41. Teufel, D., et al. (1999): *Öko-Bilanzen von Fahrzeugen. UPI Bericht Nr. 25*, <http://www.eu-transport.org/Upi25.pdf>, UPI Umwelt- und Prognose- Institut e.V., Hrsg., Heidelberg.
42. Schmid, V., et al. (2001): *Systematischer Vergleich konkreter Fahrten im Personenverkehr im Hinblick auf umwelt- und klimarelevante Wirkungen verschiedener Verkehrsmittel*, http://www.icara.de/pdf/end_re.pdf, Universität Stuttgart, Hrsg., Stuttgart.
43. Österreichischer Verein für Kraftfahrzeugtechnik (2008): *Recycling (Diskussionsbeitrag)*, <http://www.övk.at/diskf/Recycling.pdf>, Hrsg., Wien.
44. Svensson, N. and M. Eklund (2007): *Screening of environmental pressure from products in the Swedish railway infrastructure: Implications for strategic environmental management*. Resources, Conservation and Recycling, 52.
45. Spielmann, M., et al. (2007): *Transport Services. e-coinvent report No. 14.*, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Hrsg., Dübendorf.
46. Maibach, M., D. Peter, and B. Seiler (1995): *Ökoinventar Transporte - Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Transportsystemen und den Einbezug von Transportsystemen in Ökobilanzen*. Technischer Schlussbericht. Zürich, INFRAS.
47. Kindler, A., et al. (2005): *Bericht 2005. Ein Unternehmen, das Menschen bewegt. Auf dem Weg zur Nachhaltigkeit.*, Wiener Linien GmbH & Co KG, Hrsg., Wien.
48. Kindler, A., et al. (2006): *Bericht 2005. Ein Unternehmen, das Menschen bewegt. Auf dem Weg zur Nachhaltigkeit.*, Wiener Linien GmbH & Co KG, Hrsg., Wien.
49. Brauner, G. (2009): *Energiebereitstellung für die Elektromobilität*. e&i Elektrotechnik und Informationstechnik, 126(10): p. 371-374.
50. Struckl, W. (2006): *Umweltgerechte Metrofahrzeugentwicklung auf Basis von Ökobilanz-Daten*, Institut für Konstruktionswissenschaften - Technische Universität Wien, Hrsg., Wien.



51. Struckl, W. and W. Wimmer (2007): *Green Line — strategies for environmentally improved railway vehicles*. in *14th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*. 2007. Tokyo: Springer.
52. Hong, W. and S. Kim (2004): *A study on the energy consumption unit of subway stations in Korea*. *Building and Environment*, 39(12): p. 1497-1503.
53. Krapfenbauer, R. and E. Sträussler (1988): *Bautabellen: Jugend und Volk*.
54. Ossberger, M. (2010): *Kupferbestände bei U-Bahnen (Persönliche Kommunikation)*, 12. August 2010, U. Kral.
55. Reinhardt, T. and U. Richers (2004): *Entsorgung von Shredderrückständen*, Wissenschaftliche Berichte FZKA 6940, Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft, Institut für Technische Chemie, Hrsg., Karlsruhe.
56. Gruden, D. (2008): *Über das Recycling von Altfahrzeugen*, in *Umweltschutz in der Automobilindustrie* Vieweg+Teubner. p. 289-327.
57. BMLFUW (2006): *Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2006*, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Hrsg., Wien.
58. Staudinger, J. and G. Keoleian (2001): *Management of End-of-Life Vehicles (ELVs) in the US*, http://css.snre.umich.edu/css_doc/CSS01-01.pdf, University of Michigan, Center for Sustainable System, Hrsg., Michigan.
59. Waste Online (2004): *End of life vehicle and tyre recycling information sheet*. Available from: <http://www.wasteonline.org.uk/resources/InformationSheets/vehicle.htm>.
60. Schmid, C. (2001): *Bewertung von Umweltwirkungen aus dem Energieverbrauch des ÖPNV—Entwicklung einer Methode für Variantenvergleiche unter Berücksichtigung der verkehrlichen Wirkungen* Diplomarbeit, Institut für Eisenbahn- und Verkehrswesen, Universität Stuttgart.
61. Öko-Institut_e.V. (2009): *Öko-Institut e.V.: Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS)*, Freiburg, Darmstadt, Berlin.
62. Öko-Institut e.V. (2008): *Öko-Institut e.V.: Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS)*, Freiburg, Darmstadt, Berlin.
63. Fritsche, U., L. Rausch, and K. Simon (1989): *Umweltwirkungsanalyse von Energiesystemen: Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS)*, Endbericht, Institut für angewandte Ökologie e.V., Hrsg.
64. Energie-Control GmbH (2009): *Gesamtaufbringung nach ENTSO - E (European Network of Transmission Systems Operators) Continental Europe - vormals UCTE*, http://www.e-control.at/portal/page/portal/medienbibliothek/oeko-energie/dokumente/pdfs/UCTE_2009_2010-04-09.pdf,

65. Pölz, W. (2007): *Emissionen der Fernwärme Wien 2005*, <http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0076.pdf>, Umweltbundesamt, Hrsg., Wien.
66. Buchal, C. (2007): *Energie*, Jülich: Forschungszentrum Jülich GmbH.
67. Anderl, M., S. Poupa, and M. Ritter (2004): *Bundesländer Luftschadstoff-Inventur 1990 - 2002*, Umweltbundesamt, Hrsg., Wien.
68. Umweltbundesamt (2010): *Erstellung einer Ökobilanz für den Schienen-Güter- und Personentransport der ÖBB im Jahr 2009* Hrsg., Wien.
69. Deußner, R. (2010): *Fahrgastzahlen an der U2 (Persönliche Kommunikation)*, 24.08.2010, U. Kral.
70. Stadt Wien (2008): *Energieflussbild der Stadt Wien*. Available from: <http://www.wien.gv.at/wirtschaft/eu-strategie/energie/pdf/energieflussbild-2009.pdf>.
71. Wiener Linien (2005): *Auf dem Weg zur Nachhaltigkeit (Bericht 2005)*, http://www.wienerlinien.at/media/files/2008/Nachhaltigkeit_2417.pdf, Hrsg., Wien.
72. Verein Deutscher Ingenieure VDI (1997): *Kumulierter Energieaufwand - Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden (VDI Richtlinie 4600)*, Hrsg., Düsseldorf.
73. Huijbregts, M.A.J., et al. (2005): *Is Cumulative Fossil Energy Demand a Useful Indicator for the Environmental Performance of Products?* *Environmental Science & Technology*, 40(3): p. 641-648.
74. Aaron, B., et al. (2008): *Potential of the Ecological Footprint for monitoring environmental impacts from natural resource use: Analysis of the potential of the Ecological Footprint and related assessment tools for use in the EU's Thematic Strategy on the Sustainable Use of Natural Resources*, DG Environment, Hrsg.
75. Wiener Linien (2010): *Umstieg auf öffentliche Verkehrsmittel spart 90 Prozent Energie*, <http://www.wienerlinien.at/wl/ep/contentView.do/contentTypeId/1001/channelId/-8615/programId/22534/pageTypeId/9320/contentId/23493>, 11.08.2010.



8 Anhang

8.1 System „U2 Verlängerung“

8.1.1 Kenndaten

Tabelle 21: Kenndaten zur Charakterisierung der Transportleistung der U2 Verlängerung

Fahrzeugkilometer	2.300.000	FZG-km/a		
Plätze	878	Plätze		
Sitzplätze	260	Stück		
Stehplätze	618	Stück	4 Pers./m2	
Platzkilometer	2.000.000.000	Platz-km/a	100% Auslastung	
Sitzplatzkilometer	598.000.000	Sitz-km/a		
Stehplatzkilometer	1.421.400.000	Steh-km/a		
Personenkilometer (2025)	190.000.000	P-km/a	9,5%	Auslastung
Personenkilometer (40% Modal-Split im Gesamtnetz)	218.500.000	P-km/a	10,9%	Auslastung

8.1.2 Inventar

Tabelle 22: Rohdaten der U2-Inventarisierung

0. Verkehr und System					
Nr.	Zuordnung	Eintrag	Rohdaten	Einheit	Rohdatenquelle
0.1.1	Strecke	Länge	14.821,0	m	Wiener Linien 2010
0.1.2		Länge	16,8	km	Deußner 2007
0.1.3		Länge	3,5	km	Deußner 2007
0.1.4		Länge	9,2	km	Deußner 2007
0.1.5		Länge	4,1	km	Deußner 2007
0.1.6		Länge	13,3	km	Deußner 2007
0.1.7		Anzahl Stationen gesamt	16,0	Stationen	Wiener Linien 2010
0.1.8		Anzahl Stationen unterirdisch	4,0	Stationen	Wiener Linien 2010
0.1.9		Anzahl Stationen oberirdisch	12,0	Stationen	Wiener Linien 2010
0.2.1	Passagiere	Anzahl Passagiere	54.400	Pers/d/Ri	Deußner 2007
0.2.2		Anzahl Passagiere	34.300	Pers/d/Ri	Deußner 2007
0.3.1	Züge	Anzahl Züge	19	Züge	Ossberger 2010
0.3.2		Zugkilometer	2.863.537	km/a	Ossberger 2010
1. Energieverbrauch Betrieb direkt					
Nr.	Zuordnung	Eintrag	Rohdaten	Einheit	Rohdatenquelle
1.1	Strom				
1.1.1	Strom	Traktionsstrom	6	kWh/km	Struckl 2010
1.1.6	Strom	Station unterirdisch	1.000.000	kWh/Station/a	Ossberger 2010
1.1.7	Strom	Station oberirdisch	670.000	kWh/Station/a	Ossberger 2010
1.2.	Wärme	Gebäude	64.000,00	kWh	Kindler 2005
2. Gebäude (Tunnel+Stationen)					
Nr.	Zuordnung	Eintrag	Rohdaten	Einheit	Rohdatenquelle
2.1.	Materialverbrauch Errichtung Gebäude				
2.1.1	Gebäude	Beton gesamt	1.718.294.337	kg	LV Wiener Linien 2010
2.1.2	Gebäude	Beton-Zement	216.591.723	kg	LV Wiener Linien 2010
2.1.3	Gebäude	Beton-Kies	1.371.747.580	kg	LV Wiener Linien 2010
2.1.4	Gebäude	Stahl gesamt	81.807.891	kg	LV Wiener Linien 2010
2.1.5	Gebäude	Aluminium	204.600	kg	LV Wiener Linien 2010
2.1.6	Stromschiene	Aluminium	444.630	kg	
2.1.7	Kabel	Kupfer	2.964.200	kg	Wiener Linien 2010
2.2.	Energieverbrauch Errichtung Gebäude				
2.2.1	Elektrizität	Baustrom	81.095.011	kWh	Wiener Linien 2010
2.2.2	Diesel	Baudiesel	5.194.771	l	Wiener Linien 2010
3. Wagen					
Nr.	Zuordnung	Eintrag	Rohdaten	Einheit	Rohdatenquelle
3.1	Eigenschaften Wagen				
3.1.1	Wagen	Masse Zug V-Wagen Wien	167.600	kg	Siemens ohne Datum
3.1.2	Wagen	Masse Zug Metro Oslo	94.000	kg	Siemens ohne Datum
3.1.3	Wagen	Lebensdauer Zug	30	a	Struckl 2007
3.2.	Materialverbrauch Produktion Wagen				
3.2.1	Wagen	Eisen & Stahl	51%	%	Struckl 2007
3.2.2	Wagen	Aluminium	30%	%	Struckl 2007
3.2.3	Wagen	Kupfer	3%	%	Struckl 2007
3.3	Energieverbrauch Produktion Wagen				
3.3.1	Wagen	Strom	170	MWh/Fzg	Struckl 2007
3.3.2	Wagen	Fernwärme	411	MWh/Fzg	Struckl 2007
3.3.3	Wagen	Gas	38	MWh/Fzg	Struckl 2007
4. Abfälle					
Nr.	Zuordnung	Eintrag	Größe	Einheit	Rohdatenquelle
4.1	Baubabfälle	Baubabfälle	2.537.516	to	Wiener Linien 2010
5. Flächenverbrauch direkt					
Nr.	Zuordnung	Eintrag	Größe	Einheit	Rohdatenquelle
5.1	Fahrweg oberirdisch	Fahrweg	71.000	m²	Wiener Linien 2010
5.2	Stationen	Stationen	105.000	m²	Wiener Linien 2010



8.1.3 Eingabedaten für GEMIS Berechnungen

8.1.3.1 Materialien, Energieträger

Die GEMIS Dateien heißen „Materialien“, und sind digital verfügbar. Folgende Prozesse sind enthalten:

- Metall\Aluminium-mix-DE-2010
- Metall\Kupfer-DE-mix-2010
- Metall\Stahl-DE-mix-2010
- Steine-Erden\Beton
- Ferwärme-mix-AT-2005
- Tankstelle-Diesel-DE-2010
- Tankstelle-Erdgas-DE-2010

8.1.3.2 Strommix

Die GEMIS Dateien heißen „Strommix“, und sind digital verfügbar. Folgende Prozesse sind enthalten:

Tabelle 23: Strom Mix Wien – Verbrauch, Anteil nach Daxbeck [6, S. 98] und GEMIS 4.5

Lieferant	Produkt	Anteil [%]
nuclear-ST-CZ-Temelín	electricity-CZ	11,8
Kohle-KW-DT-EU-Import-2010	Elektrizität	8,3
Braunkohle-KW-DT-AT-2000	Elektrizität	4,3
Öl-schwer-KW-DT-AT-2000	Elektrizität	11,4
Gas-KW-GuD-AT-2010	Elektrizität	33,6
Müll-KW-DT-AT-2000	Elektrizität	3,4
Wasser-KW-gross-AT	Elektrizität	27,2
Summe		100

Tabelle 24: Strom-Mix Österreich 2010 nach GEMIS 4.5 (El-KW-Park-AT-2010)

Lieferant	Produkt	Menge [%]
Kohle-KW-DT-EU-Import-2010	Elektrizität	4,5
Braunkohle-KW-DT-AT-2000	Elektrizität	1,5
Öl-schwer-KW-DT-AT-2000	Elektrizität	1,5
Gas-KW-GuD-AT-2010	Elektrizität	23,5
Müll-KW-DT-AT-2000	Elektrizität	2
Wasser-KW-gross-AT	Elektrizität	67
Summe		100

Tabelle 25: Strom-Mix EU 2010 nach GEMIS 4.5 (El-KW-Park-EU-17-2010)

Lieferant	Produkt	Menge [%]
El-KW-Park-AT-2010	Elektrizität	2,18
El-KW-Park-BE-2010	Elektrizität	2,89
El-KW-Park-CH-2010	Elektrizität	2,15
El-KW-Park-DE-2010 EWI/Prognos (REF)	Elektrizität	18,81
El-KW-Park-DK-2010	Elektrizität	1,19
El-KW-Park-ES-2010	Elektrizität	9,34
El-KW-Park-FI-2010	Elektrizität	2,65
El-KW-Park-FR-2010	Elektrizität	19,22
El-KW-Park-GB-2010	Elektrizität	13,48
El-KW-Park-GR-2010	Elektrizität	2,33
El-KW-Park-IE-2010	Elektrizität	1,02
El-KW-Park-IT-2010	Elektrizität	9,85
El-KW-Park-LU-2010	Elektrizität	1,10E-01
El-KW-Park-NL-2010	Elektrizität	3,51
El-KW-Park-NO-2010	Elektrizität	4,73
El-KW-Park-PT-2010	Elektrizität	1,75
El-KW-Park-SE-2010	Elektrizität	4,79
Summe		100



8.1.4 Ökologischer Fußabdruck

Tabelle 26: Kenndaten zur Ermittlung des ÖF der U2-Verlängerung (Bezugsjahr 2025)

Nr.	Zuordnung	Eintrag	Beschreibung	Einheit	Größe	CO2 Faktor	CO2 Emis- sionen	Land für Fossilenergie (CO2 Ab- druck)	Flächenfaktor	Beanspruchtes Land	ÖFgesamt	ÖFnormiert (9,5% Auslastung, Jahr 2025)
						kg CO2/Einheit	kg/a	ha/a	ha/Einheit	ha/a	ha/a	ha/Pkm.a
1,1	Betrieb	Strom	Traktionsstrom	kWh/a	13.800.000	0,1955	2.698.427	676	6,7E-07	9,31	685,6	3,61E-06
1,2	Betrieb	Strom	Strom Stationen	kWh/a	12.040.000	0,1955	2.354.279	590	6,7E-07	8,13	598,2	3,15E-06
1,3	Betrieb	Wärme	Wärme Stationen	kWh/a	9.600.000	0,1970	1.891.200	474	0,0E+00	-	474,0	2,49E-06
2.1.1	Gebäude	Beton	Beton (Bereitstellung)	kg/a	17.182.943	0,1744	2.996.705	751		0,6417	751,7	3,96E-06
2.1.2	Gebäude	Stahl	Stahl (Bereitstellung)	kg/a	818.079	1,3546	1.108.170	278		0,07095	277,8	1,46E-06
2.1.3	Gebäude	Aluminium	Aluminium (Bereitstellung)	kg/a	2.046	17,6014	36.012	9	4,0E-06	0,008	9,0	4,75E-08
2.1.4	Gebäude	Aluminium	Aluminium Stromschiene (Bereitstellung)	kg/a	4.446	17,6014	78.261	20	4,0E-06	0,02	19,6	1,03E-07
2.1.5	Gebäude	Kupfer	Kupfer (Bereitstellung)	kg/a	29.642	3,9766	117.874	30	1,0E-06	0,03	29,6	1,56E-07
2.2.1	Gebäude	Strom	Baustrom	kWh/a	810.950	0,1955	158.572	40	6,7E-07	0,55	40,3	2,12E-07
2.2.2	Gebäude	Diesel	Baudiesel	l/a	51.948	2,8178	146.377	37	4,6E-08	0,00	36,7	1,93E-07
3.1.1	Zug	Stahl	Stahl Zug (Bereitstellung)	kg/a	42.857	1,3546	58.054	15		0,00	14,6	7,66E-08
3.1.2	Zug	Aluminium	Aluminium Zug (Bereitstellung)	kg/a	25.210	17,6014	443.728	111	4,0E-06	0,10	111,3	5,86E-07
3.1.3	Zug	Kupfer	Kupfer Zug (Bereitstellung)	kg/a	2.521	3,9766	10.025	3	1,0E-06	0,00	2,5	1,32E-08
3.2.1	Zug	Strom	Strom Zug (Bereitstellung)	kWh/a	151.946	0,1955	29.711	7	6,7E-07	0,10	7,5	3,97E-08
3.2.2	Zug	Wärme	Wärme Zug Herstellung	kWh/a	367.349	0,1970	72.368	18	0,0E+00	-	18,1	9,55E-08
3.2.3	Zug	Erdgas	Erdgas Zug Herstellung	kWh/a	34.177	0,2464	8.420	2	2,0E-08	0,00	2,1	1,11E-08
4.1	Gebäude	Bauabfälle	Bauabfälle	kg/a	25.375.164	-	-	-	5,0E-09	0,13	0,1	6,68E-10
5.1	Fahrweg	Fahrweg	Direkt. Flächenbeanspruchung U-Bahn oberirdisch	ha/a	0,07	-	-	-	1,0E+00	0,07	0,1	3,74E-10
5.2	Stationen	Stationen	Direkt. Flächenbeanspruchung Station oberirdisch	ha/a	0,11	-	-	-	1,0E+00	0,11	0,1	5,53E-10
Gesamt							12.208.183	3.060		19	3.079	1,62E-05

Tabelle 27: ÖF zur Bereitstellung der Bauwerke und Fahrzeuge (ohne Abschreibung)

	ÖFgesamt, Bereitstellung [ha]	Ökolog. Fuß- abdruck [%]	Fußabdruck Wien 2001 [ha]
	U2-Verlängerung		
Bereitstellung der Bauwerke	116.472	96%	
Herstellung der Fahrzeuge	4.679	4%	
Direkte Flächenbeanspruchung	0,30	0%	
Gesamt	121.000	100%	6.236.000

8.2 Referenzsystem „Motorisierter Individualverkehr“

8.2.1 Inventar

Tabelle 28: Straßenbau

Emissionskategorie	Emissionen	CO2 Äquivalenz- faktor	CO2 Äquivalent	CO2 Äquivalent	Land für Fossil- energie	CO2 Äquivalent 2025	Land für Fossil- energie
	kg/m/d		kg CO2/m/d	kg/a	ha/a	kg/Pkw-km	m2/Pkw-km
CO2	0,049	1	0,049	266487	67	0,00143	4,E-03
CH4	0,000168	25	0,0042	22842	6	0,00012	3,E-04
Gesamt			0,0532	289328	73	0,00155	4,E-03



Tabelle 29: Strom und Wärme für PKW-Herstellung im Werk

1 MWh =	0,0036	TJ
CO2 Faktor Strom (Strommix Österreich)	195,5000	kg CO2/MWh
CO2 Faktor Wärme (Fernwärme Wien)	197,0000	kg CO2/MWh
Lebensdauer Pkw	10	a
Fahrleistung MIV-Lenker in Österreich 2005	61.600.000.000	Pers-km/a
Anzahl PKW, 2005	4.156.743	Pkw
Gefahrene Kilometer	14.819	km/Pkw.a
Sequestrationsrate	3.990,0	kg CO2/ha.a

	Konsum	CO2 Faktor	CO2 Emissionen je Pkw	CO2 Emissionen je Pkw-km.a	Land für Fossilenergie	Flächenfaktor	Flächenbedarf pro Pkw	Beanspruchtes Land
	MWh/Pkw	kg CO2/MWh	kg CO2/Pkw	kg CO2/Pkw-km.a	m2/Pkw-km.a	ha/MWh	m2/Pkw	m2/Pkw-km.a
Strom	2	195,5000	391	0,003	6,61E-03	7,E-04	13,50	9,E-05
Wärme	3	197,0000	591	0,004	1,00E-02	0,E+00	0,00	0,E+00
Gesamt			982	0,007	1,66E-02		13,50	9,E-05

Tabelle 30: Fahrweg und Parkplätze

Kennwert	Betrag	Einheit
Straßenlänge	14.900	m
Breite	12	m
Parkplatz	40	m ² /Pkw
Abschreibedauer	25	a
Anzahl Pkw-Stellplätze	19.934	Stellplätze
Fußabdruck	98	ha
Fußabdruck	3,90	ha/a
Fahrleistung (BG1)	186.769.510	Pkw-km/a
Fußabdruck, normiert (BG1)	2,09E-04	m²/Pkw-km.a

8.2.2 Eingabedaten für GEMIS Berechnungen

Die GEMIS Dateien heißen „ÖFRU_PKW“, und sind digital verfügbar.



Abbildung 12: Aggregationsbaum der GEMIS 4.5 Prozesse

8.2.3 Ökologischer Fußabdruck

Tabelle 31: Normierter Ökologischer Fußabdruck des PKW

Kategorie	CO2 Emis- sionen	Land für Fossilenergie	Beanspruchtes Land	ÖF	ÖF 2025
	kg/Pkw-km	m ² /Pkw-km	m ² /Pkw-km	m ² /Pkw-km	m ² /Pers-km
Energieaufwand PKW-Betrieb, Materialbereitstellung für Pkw Produktion	0,295	0,74	0,0002	0,74	0,53
Straßenbau (Fahrweg, Parkplatz)	1,5E-03	0,00	0,0001	4,E-03	0,01
Energieaufwand PKW-Produktion	6,6E-03	0,02	0,0001	2,E-02	0,01
Gesamt		0,76	0,0004	0,76	0,54



Tabelle 32: Gesamter Ökologischer Fußabdruck der PKW (Bezugsjahr 2025, Besetzungsgrad 1,4)

Kategorie	Land für Fossilenergie	Beanspruchtes Land	ÖF, gesamt	Rel. Anteil
	[ha/a]	[ha/a]	[ha/a]	[%]
Energieaufwand PKW-Betrieb, Materialbereitstellung für Pkw Produktion	9.853	2	9.856	97%
Straßenbau (Fahrweg, Parkplatz)	52	1	53	1%
Energieaufwand PKW-Produktion	222	1	223	2%
Gesamt	10.127	5	10.131	100%
Rel. Anteil	99,95%	0,05%	100%	

Tabelle 33: Normierter Ökologischer Fußabdruck in Abhängigkeit vom Besetzungsgrad

Kategorie	spez. Fußabdruck [m ² /Pers-km]					
	(BG1)	(BG1,4)	(BG2)	(BG3)	(BG4)	(BG5)
Energieaufwand PKW-Betrieb, Materialbereitstellung für Pkw Produktion	0,74	0,53	0,37	0,25	0,18	0,15
Straßenbau (Fahrweg, Parkplatz)	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Energieaufwand PKW-Produktion	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
Gesamt	0,76	0,54	0,39	0,26	0,20	0,17

Tabelle 34: ÖF des MIV in Abhängigkeit vom Besetzungsgrad und im Vergleich zum ÖF der Stadt Wien

ÖF des MIV 2025 [ha/a]	14.184	10.131	7.092	4.728	3.546	2.837
ÖF Wien [ha/a]	6.236.447	6.236.447	6.236.447	6.236.447	6.236.447	6.236.447
Gesamt [ha/a]	6.250.631	6.246.578	6.243.539	6.241.175	6.239.993	6.239.284
Änderungsrate [%]	0,23%	0,16%	0,11%	0,08%	0,06%	0,05%

8.3 Datenträger

Dem Zwischenbericht ist eine Compact Disc zugeordnet, auf der die wesentlichen Berechnungsblätter und Daten enthalten sind.