



Schlussbericht vom 10. Januar 2024

Integration des Energieverbrauchs und der Umweltbelastung in Konsumentenscheide

INTRALOG_ECO

(Integration of Transport and Logistics Energy-Consumption in Consumers Decisions)



Quelle: Shutterstock.



I N T E R F A C E

Schafft Wissen | Entre science et pratique

RAPP 

ETH zürich

Datum: 10. Januar 2024

Ort: Luzern/Zürich

Subventionsgeber:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger:

Interface Politikstudien Forschung Beratung AG, Seidenhofstrasse 12, 6003 Luzern
www.interface-pol.ch

Rapp AG, Max-Högger-Strasse 6, 8045 Zürich
www.rapp.ch

ETH Zürich, Institute of Environmental Engineering, John-von-Neumann-Weg 9, 8093 Zürich
<http://www.ifu.ethz.ch>

Autoren:

Prof. Dr. Ueli Haefeli, Interface Politikstudien Forschung Beratung AG, haefeli@interface-pol.ch
Dr. Tobias Arnold, Interface Politikstudien Forschung Beratung AG, arnold@interface-pol.ch
Jan Lordieck, Rapp AG, jan.lordieck@rapp.ch
Dr. Christopher Oberschelp, ETHZ, oberschelp@ifu.baug.ethz.ch

BFE-Projektbegleitung:

Dr. Luca Castiglioni, Bereichsleiter Mobilität, 3003 Bern,
luca.castiglioni@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/502346-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

In der vorliegenden Studie wurde mit einer interdisziplinären Herangehensweise nach praxistauglichen und effektiven Ansätzen gesucht, um valide und nützliche Informationen über den Anteil von Transport und Logistik an der Energiebilanz und CO₂-Emissionen wichtiger Güter des täglichen und nicht-alltäglichen Bedarfs zu liefern und aufzuzeigen, wie die Konsumenten/-innen ihr Verhalten entsprechend ändern könnten.

Die eingesetzte Methodik kombinierte ...

- eine Kundentypologisierung und ein Discrete-Choice-Experiment auf Basis einer repräsentativen Bevölkerungsbefragung,
- die Entwicklung eines Modells zur Schätzung von Klimagasemissionen, insbesondere CO₂, und weiteren Umweltbelastungen, die durch die Logistiktätigkeiten innerhalb der Produktion und Verteilung von Gütern entstehen.

Im Folgenden werden die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst:

- Der Fokus auf die Logistik- und Transportketten des Online-Handels hat sich bewährt; diese haben durch die Corona-Pandemie nochmals an Bedeutung gewonnen und sind mehr und mehr prägend für die gesamte Logistik. Online-Handel ist auch in der Bevölkerung mehrheitsfähig geworden.
- Die Cluster-Analyse ergab drei differenzierbare Typen von Konsumenten/-innen: 60 Prozent der Online-Konsumenten/-innen lassen sich den Traditionalisten/-innen zuordnen. Personen dieses Typs kaufen immer noch häufiger vor Ort als online ein, da sie, anders als die anderen beiden Typen, den Online-Handel hinsichtlich Ersparnis an Zeit und Kosten nicht positiver beurteilen als das Einkaufen vor Ort und da sie den Kontakt und die Vertrauensbasis in Zusammenhang mit dem Einkaufen vor Ort schätzen. Rund ein Drittel der Online-Konsumenten/-innen (34%) kann als Abwäger/-innen bezeichnet werden: Je nach Einschätzung von Kosten und Nutzen wird in einem Fall der Einkauf vor Ort, in einem anderen Fall der Online-Handel bevorzugt. Schliesslich lassen sich 6 Prozent der Online-Konsumenten/-innen als Online-Power-Einkäufer/-innen bezeichnen, die häufiger online als vor Ort einkaufen.
- Es lassen sich keine eindeutigen sozialen Milieus erkennen, entlang der sich die drei Typen von Konsumenten/-innen einteilen lassen. Viel eher sind alle drei Typen in sich hinsichtlich soziodemografischer und sozioökonomischer Variablen heterogen. Dies legt den Schluss nahe, dass Einstellungen und Verhalten im Bereich Online-Handel in erster Linie auf subjektive Werthaltungen zurückzuführen sind.
- Im Discrete-Choice-Experiment erwiesen sich Produktinformationen mit Bezug zur persönlichen Gesundheit als überdurchschnittlich relevant. So scheint es den Konsumenten/-innen besonders wichtig zu sein, dass Produkte frei von bestimmten Chemikalien oder Pestiziden sind.
- Produktinformationen zum Transport spielen bei den Befragten eine vergleichsweise geringe Rolle beim Kaufentscheid.
- Insgesamt scheinen spezifische, auf die Eigenschaften der jeweiligen Produkte (Herkunft, bei der Produktion verwendete, allenfalls gesundheitsschädigende Stoffe usw.) ausgerichtete Informationen einen grösseren Einfluss auf den Kaufentscheid zu haben als generelle, eher abstrakte Informationen.
- Das im Projekt entwickelte Schätzmodell für Logistikemissionen wurde in drei Fallstudien getestet, die zeigten, dass das Modell grundsätzliche plausible Ergebnisse liefert. Sowohl die wahrscheinlichen Transportwege als auch die geschätzten Emissionen der Fallstudien sind realistisch. Die Fallstudie zur Bratpfanne zeigt, dass auch die Emissionsintensität komplexer Lieferketten mit dem Modell geschätzt werden kann.



- Die Fallstudien dienen der Demonstration des Modells, dennoch können auch inhaltliche Schlussfolgerungen gezogen werden. Insbesondere fällt wie erwartet der starke Einfluss des Fliegens und des Strassengüterverkehr auf die CO₂-Emissionen auf.
- Auf Basis des Schätzmodells wird es künftig möglich sein, erstens produktspezifische Emissions- und Umweltbelastungswerte ausgeben zu können, ohne auf Daten zum Logistikprozess der Unternehmen zurückgreifen zu müssen, und zweitens Verbesserungspotenziale zur Reduktion von Klimagasausstößen und Umweltbelastungen bei verschiedenen Dienstleistungen der Logistik und an verschiedenen geografischen Orten produktspezifisch zu identifizieren.
- Die Fallstudien zeigen aber auch noch bestehende Unplausibilitäten in den Modellergebnissen, beispielsweise bezüglich der Transportrouten und dem ausgegebenen Modal-Split. Weitere Kalibrierungsschritte könnten diese Unplausibilitäten unseres Erachtens beheben, diese waren aber im Rahmen der vorliegenden Studie nicht möglich.

Die Projektergebnisse sind für die weiteren Arbeiten im Themenfeld aus den folgenden Gründen relevant:

- Es ist absehbar, dass die Thematik nachhaltiger Logistikketten für die Unternehmen und teilweise auch für die Konsumenten/-innen künftig noch an Bedeutung gewinnen wird.
- Weiter hat sich gezeigt, dass die produktbezogenen Emissionen je nach Logistikkette stark variieren und dass diese grundsätzlich durch politische und/oder unternehmensstrategische Interventionen beeinflusst werden könnten.
- Das Schätzmodell könnte deshalb auch für Industriepartner nützlich sein. Dies ist umso bedeutsamer, als dass für die weitere Kalibrierung Daten aus der Industrie notwendig sind.
- Das Schätzmodell könnte aber auch für die Bereitstellung von Daten zu Umweltbelastungspunkten ausgebaut und genutzt werden und damit für die Verwaltung interessant sein.
- Das Bewusstsein der Konsumenten/-innen für die Relevanz der Logistik für die Nachhaltigkeit eines Produkts ist noch gering – etwa im Vergleich zu den seit Jahrzehnten diskutierten Fragen zu Schadstoffen in Produkten. Die Logistik spielt bei den Kaufentscheidungen im Vergleich mit anderen Umweltkriterien deshalb heute kaum eine Rolle. Das Projekt liefert Ansatzpunkte für Verhaltensänderungen.

Insgesamt hat das Projekt damit relevante und zukunftssträchtige Bausteine für künftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in diesem Themenfeld geliefert.

Der Code zum Schätzmodell wird veröffentlicht (in Vorbereitung), die wichtigsten Ergebnisse werden in Fachzeitschriften publiziert.



Résumé

La présente étude s'est appuyée sur une approche interdisciplinaire pour trouver des solutions pratiques et efficaces afin de fournir des informations valables et utiles sur la part du transport et de la logistique dans le bilan énergétique et les émissions de CO₂ des principaux biens de consommation courante et non courante, et de montrer comment les consommateurs pourraient modifier leur comportement en conséquence.

La méthodologie utilisée a combiné

- une typologie des clients et une analyse Discrete Choice sur la base d'une enquête représentative auprès de la population,
- le développement d'un modèle pour l'estimation des émissions, en particulier de CO₂, et d'autres impacts environnementaux générés par les activités logistiques au sein de la production et de la distribution de biens.

Les principales conclusions sont résumées ci-dessous :

- L'accent mis sur les chaînes logistiques et de transport du commerce en ligne a fait ses preuves, celles-ci ont encore gagné en importance suite à la pandémie de Corona et sont de plus en plus déterminantes pour l'ensemble de la logistique. Le commerce en ligne est également devenu majoritaire au sein de la population.
- Dans la présente étude, une approche interdisciplinaire a été adoptée pour - L'analyse en clusters a permis de distinguer trois types de consommateurs. 60% des personnes interrogées se classent dans la catégorie des traditionalistes. Les personnes de ce type achètent toujours plus souvent sur place qu'en ligne, car contrairement aux deux autres types, elles ne jugent pas le commerce en ligne plus positivement que l'achat sur place en termes de gain de temps et de coûts et apprécient le contact et la base de confiance liés à l'achat sur place. Environ un tiers (34%) peuvent être considérés comme des personnes qui pèsent le pour et le contre : Selon l'évaluation des coûts et des avantages, la préférence va dans un cas à l'achat sur place, dans l'autre au commerce en ligne. Enfin, 6% des personnes interrogées sont des cyberacheteurs, qui achètent plus souvent en ligne que sur place.
- Il n'est pas possible d'identifier clairement des milieux sociaux permettant de classer les trois types de consommateurs. Les trois types sont plutôt hétérogènes en termes de variables sociodémographiques et socioéconomiques. Cela permet de conclure que les attitudes et les comportements dans le domaine du commerce en ligne sont en premier lieu dus à des valeurs subjectives.
- Dans l'analyse Discrete Choice, les informations sur les produits en rapport avec la santé personnelle se sont avérées plus pertinentes que la moyenne. Ainsi, les consommateurs semblent attacher une importance particulière au fait que les produits soient exempts de certains produits chimiques ou pesticides.
- Les informations sur le transport des produits jouent un rôle relativement faible dans la décision d'achat des personnes interrogées.
- Dans l'ensemble, les informations spécifiques axées sur les caractéristiques des produits (origine, substances utilisées lors de la production, éventuellement nocives pour la santé, etc.) semblent avoir une plus grande influence sur la décision d'achat que les informations générales, plutôt abstraites.
- Le modèle d'estimation des émissions logistiques développé dans le cadre du projet a été testé dans trois études de cas, qui ont montré que le modèle fournit des résultats fondamentalement plausibles. Tant les distances de transport réelles que les émissions estimées des études de cas sont réalistes. L'étude de cas sur la poêle à frire montre que l'intensité des émissions des chaînes d'approvisionnement complexes peut également être estimée à l'aide du modèle.



- Les études de cas servent à démontrer le modèle, mais il est également possible de tirer des conclusions sur le fond. Comme prévu, on remarque en particulier la forte influence des vols et le transport routier de marchandises sur les émissions de CO₂.
- Sur la base du modèle d'estimation, il sera possible à l'avenir, premièrement, de fournir des valeurs d'émissions et de pollution spécifiques aux produits sans devoir recourir à des données sur le processus logistique des entreprises et, deuxièmement, d'identifier les potentiels d'amélioration pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre et de la pollution de l'environnement pour différents services de logistique et à différents endroits géographiques en fonction des produits.
- Les études de cas montrent également que les résultats de la modélisation ne sont pas toujours plausibles, par exemple en ce qui concerne les itinéraires de transport et la répartition modale. D'autres étapes de calibrage pourraient, à notre avis, éliminer ces plausibilités, mais elles n'étaient pas possibles dans le contexte de la présente étude.

Les résultats du projet sont pertinents pour les travaux ultérieurs dans le domaine thématique pour les raisons suivantes :

- Il est prévisible que la thématique des chaînes logistiques durables gagnera encore en importance à l'avenir pour les entreprises et en partie aussi pour les consommateurs/trices.
- De plus, il s'est avéré que les émissions liées aux produits varient fortement en fonction de la chaîne logistique et qu'elles pourraient être influencées par des interventions politiques ou stratégiques des entreprises.
- Le modèle d'estimation pourrait donc également être utile aux partenaires industriels. Ceci est d'autant plus important que des données provenant de l'industrie sont nécessaires pour le calibrage ultérieur.
- Mais le modèle d'estimation pourrait également être développé et utilisé pour la mise à disposition de données sur les points de pollution et être ainsi intéressant pour l'administration.
- Les consommateurs sont encore peu conscients de l'importance de la logistique pour la durabilité d'un produit (en comparaison avec les questions relatives aux substances nocives dans les produits, dont on parle depuis des décennies). C'est pourquoi la logistique ne joue aujourd'hui pratiquement aucun rôle dans les décisions d'achat par rapport à d'autres critères environnementaux. Le projet fournit des points de départ pour des changements de comportement.

Dans l'ensemble, le projet a donc fourni des éléments pertinents et porteurs d'avenir pour les futurs travaux de recherche et de développement dans ce domaine thématique.

Le code du modèle d'estimation sera publié (en préparation), les principaux résultats seront publiés dans des revues spécialisées.



Summary

This study used an interdisciplinary approach to search for practical and effective approaches to provide valid and useful information on the share of transport and logistics in the energy balance and CO₂ emissions of important everyday and non-everyday goods and to show how consumers could change their behaviour accordingly.

The methodology used combined

- a customer typology and a Discrete-Choice-Experiment based on a representative population survey,
- the development of a model to estimate greenhouse gas emissions, in particular CO₂, and other environmental impacts caused by logistics activities within the production and distribution of goods.

The most important findings are summarised below:

- The focus on the logistics and transport chains of online retail has proven its worth; these have become even more important as a result of the coronavirus pandemic and are increasingly shaping logistics as a whole. Online retail has also become more popular among the population.
- In this study, an interdisciplinary approach was used to investigate the different types of consumers. 60 per cent can be classified as traditionalists. People of this type are still more likely to shop locally than online because, unlike the other two types, they do not rate online shopping more favourably than local shopping in terms of time and cost savings and value the contact and trust associated with local shopping. Around a third (34%) can be labelled as being in the balance: Depending on the assessment of costs and benefits, in one case local shopping is favoured, in another case online retailing. Finally, 6 per cent can be described as online power shoppers, who shop online more often than locally.
- No clear social milieus can be identified along which the three types of consumers can be categorised. Rather, all three types are heterogeneous in terms of socio-demographic and socio-economic variables. This suggests that attitudes and behaviour in the online retail sector are primarily attributable to subjective values.
- In the Discrete-Choice-Experiment, product information relating to personal health proved to be of above-average relevance. For example, it appears to be particularly important to consumers that products are free from certain chemicals or pesticides.
- Product information on transport plays a comparatively minor role in the purchasing decision of the respondents.
- Overall, specific information focussed on the characteristics of the respective products (origin, substances used in production that may be harmful to health, etc.) appears to have a greater influence on the purchase decision than general, more abstract information.
- The estimation model for logistics emissions developed in the project was tested in three case studies, which showed that the model delivers fundamentally plausible results. Both the probable transport routes and the estimated emissions of the case studies are realistic. The case study on the frying pan shows that the emissions intensity of complex supply chains can also be estimated using the model.
- The case studies serve to demonstrate the model, but substantive conclusions can also be drawn. In particular, as expected, the strong influence of flying and road freight transport on CO₂ emissions is striking.
- On the basis of the estimation model, it will be possible in future, firstly, to output product-specific emission and environmental impact values without having to resort to data on companies' logistics



processes and, secondly, to identify potential improvements for reducing greenhouse gas emissions and environmental impact for different logistics services and at different geographical locations on a product-specific basis.

- However, the case studies also reveal remaining implausibility in the model results, for example regarding the transport routes and the modal split. In our opinion, further calibration steps could eliminate this implausibility, but this was not possible within the scope of the present study.

The project results are relevant for further work in this field for the following reasons:

- It is foreseeable that the topic of sustainable logistics chains will become even more important for companies and to some extent also for consumers in the future.
- It has also been shown that product-related emissions vary greatly depending on the logistics chain and that these could be influenced in principle by political and/or corporate strategy interventions.
- The estimation model could therefore also be useful for industrial partners. This is all the more important as data from industry is required for further calibration.
- However, the estimation model could also be expanded and used for the provision of data on environmental impact points and thus be of interest to the administration.
- Consumers' awareness of the relevance of logistics for the sustainability of a product is still low (compared to the issues surrounding harmful substances in products, for example, which have been discussed for decades). Logistics therefore hardly plays a role in purchasing decisions compared to other environmental criteria. The project provides starting points for changes in behaviour.

Overall, the project has provided relevant and promising building blocks for future research and development work in this field.

The code for the estimation model will be published (in preparation) and the most important results will be published in specialist journals.



Take-home messages

Take-home Message 1: Typologie von Online-Konsumenten/-innen

- Drei Typen von Online-Konsumenten/-innen wurden auf Basis einer repräsentativen Befragung eruiert: 60 Prozent der Online-Konsumenten/-innen lassen sich den Traditionalisten/-innen zuordnen. Personen dieses Typs kaufen immer noch häufiger vor Ort ein als online; dieser Gruppe sind der Kontakt und die Vertrauensbasis beim Einkaufen vor Ort besonders wichtig. Rund ein Drittel der Online-Konsumenten/-innen (34%) kann als Abwäger/-innen bezeichnet werden: Je nach Einschätzung von Kosten und Nutzen wird in einem Fall der Einkauf vor Ort und in einem anderen Fall der Online-Handel bevorzugt. Schliesslich lassen sich 6 Prozent der Online-Konsumenten/-innen als Online-Power-Einkäufer/-innen bezeichnen, die häufiger online als vor Ort einkaufen. Diese drei Typen unterscheiden sich bezüglich soziodemografischer und -ökonomischer Kriterien wenig, wichtiger sind vielmehr unterschiedliche subjektive Werthaltungen.

Take-home Message 2: Die Rolle von Produktinformationen beim Kaufentscheid

- Ein Discrete-Choice-Experiment zeigt, dass Produktinformationen zum Transport bei den Befragten zurzeit eine eher geringe Bedeutung beim Kaufentscheid spielen. Dies gilt besonders im Vergleich zu Informationen, die für die persönliche Gesundheit unmittelbar relevant sind. Umweltargumente können aber auch losgelöst von Überlegungen zur persönlichen Gesundheit bei Kaufentscheiden bedeutsam sein, wie das Beispiel der Rezyklierbarkeit von Pfannen zeigt. Insgesamt scheinen spezifische, auf die Eigenschaften der jeweiligen Produkte ausgerichtete Informationen einen grösseren Einfluss auf den Kaufentscheid zu haben als generelle, eher abstrakte Informationen.

Take-home Message 3: Globales Schätzmodell zu Logistikemissionen

- Emissionen globaler Lieferketten lassen sich auch ohne die detaillierte Kenntnis von Unternehmensangaben plausibel auf aggregierter Ebene schätzen. Die Kenntnis von Quelle und Ziel sowie einfach klassifizierte Eigenschaften eines Produkts reichen aus, um über eine kostengewichtete Monte-Carlo-Simulation die Relevanz von globalen Transportwegen für Treibstoff- und Energieverbräuche zu bestimmen und Logistikemissionen zu berechnen. Somit können unabhängige Schätzungen vorgenommen werden und Unternehmensangaben besser nachvollzogen beziehungsweise plausibilisiert werden.

Take-home Message 4: Quelle-Ziel-Beziehungen eines Produkts weisen immer eine Wahlmöglichkeit zu geringeren Emissionen auf

- Die Fallstudien zeigen, dass für jede untersuchte Quelle-Ziel-Beziehung wirtschaftlich sinnvolle Alternativen mit vergleichsweise niedrigen und hohen Emissionen vorliegen. Es ist damit auf jeder Importbeziehung möglich, vergleichsweise wenig Emissionen auszustossen, wenn kurze Routen mit emissionsärmeren Verkehrsmitteln (Schiff und Bahn) gewählt werden. Das bedeutet auch, dass beispielsweise ein Import aus Europa nicht unbedingt emissionsärmer ist als ein Import aus Übersee, wenn der LKW-Anteil in Europa hoch ist und von Übersee aus nicht geflogen wird.



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	12
1.1	<i>Ausgangslage und Hintergrund</i>	12
1.1.1	Einkaufsverhalten	12
1.1.2	Literatur zu Ökobilanzen und zur Ökosystemmodellierung	15
1.1.3	Literatur zu Emissionen von Transport und Logistik sowie zu Tools und Standards	18
1.2	<i>Projektziele und Fragestellungen.....</i>	22
1.3	<i>Methodik</i>	23
2	Ergebnisse Survey	24
2.1	<i>Typen von Konsumenten/-innen.....</i>	24
2.1.1	Herleitung der Typen	24
2.1.2	Die drei Typen von Online-Einkäufern/-innen im Vergleich	25
2.1.3	Fazit zu den Typen	32
2.2	<i>Discrete-Choice-Experimente.....</i>	32
2.2.1	Ergebnisse Experiment 1: Birne.....	33
2.2.2	Ergebnisse Experiment 2: Kleiderschrank	34
2.2.3	Ergebnisse Experiment 3: Gusseisenpfanne.....	35
2.2.4	Zusammenfassung und Fazit	36
3	Ergebnisse Modellierung Schätzmodell	38
3.1	<i>Fallstudien</i>	38
3.1.1	Fallstudie Birne	39
3.1.2	Fallstudie Rasenmäher	47
3.1.3	Fallstudie Bratpfanne	55
3.2	<i>Diskussion des Schätzmodells für Logistikemissionen</i>	62
3.3	<i>Fazit und Empfehlung zum Schätzmodell für Logistikemissionen.....</i>	67



4	Literaturverzeichnis.....	69
5	Verzeichnis von Abbildungen, Tabellen und Formeln.....	76
5.1	<i>Verzeichnis Abbildungen.....</i>	76
5.2	<i>Verzeichnis Tabellen.....</i>	77
5.3	<i>Verzeichnis Formeln.....</i>	78
6	Anhang.....	79
6.1	<i>Methodik und Vorgehen Modellierung Schätzmodell.....</i>	79
6.1.1	Modellstruktur.....	80
6.1.2	Modul 1: Input.....	80
6.1.3	Modul 2: Logistikketten.....	88
6.1.4	Modul 3: Transportwege.....	92
6.1.5	Modul 4: Emissionsberechnung.....	93
6.1.6	Modul 5: Gewichtung.....	96
6.1.7	Modul 6: Output.....	97
6.2	<i>Methodik und Vorgehen Survey.....</i>	97
6.2.1	Gesamtschweizerischer Survey.....	97
6.2.2	Survey im Kanton Zürich.....	100
6.2.3	Survey bei Nutzenden der SmartBoxBasel.....	100
6.3	<i>Cluster-Analyse: einbezogene Variablen.....</i>	100
6.4	<i>Ergebnisse der DCE, unveränderte Regressionskoeffizienten.....</i>	101
6.5	<i>Modellinputs.....</i>	103



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Der Verkehr beanspruchte im Jahr 2019 37,7 Prozent des inländischen Energieverbrauchs (BFE 2020) und muss daher einen wesentlichen Beitrag zur Umsetzung der Schweizer Energiestrategie, der Klimastrategie des Bundes sowie des CO₂-Gesetzes leisten. 20 Prozent des Energieverbrauchs entfallen auf den Güterverkehr, der zudem auch einen überdurchschnittlichen Anteil an den CO₂-Emissionen aufweist. Stark gestiegen sind in den letzten Jahren insbesondere auch die Aufwände für Transport und Logistik zur Versorgung der privaten Haushalte. Hier setzt die vorliegende Studie an.

Mit ihrem Einkaufsverhalten beeinflussen Konsumenten/-innen die Ökobilanz der Haushalte, aber auch der Unternehmen, sehr stark, weshalb individuelle Kaufentscheidungen sehr relevant für die Energie-, Klima-, Umwelt- und Verkehrspolitik der Schweiz sind (BAFU/MeteoSchweiz 2020 und Känzig 2006). Die Sensibilisierung für nachhaltige Konsummuster ist erfreulicherweise in den letzten Jahren gestiegen (UBA 2017), was auch die Unternehmen beeinflusst, weil damit die Ökobilanz der Produktion vermehrt in den Blick gerät.

Bei ihren Kaufentscheidungen fehlen den Konsumenten/-innen jedoch oft Informationen, um die Energieeffizienz und die Ökobilanz von Produkten verlässlich zu beurteilen. Wichtiger Teil dieser Bilanzen sind der Energieverbrauch und die CO₂ Emissionen von Transport und Logistik. Die Wissenslücken sind gerade in diesem Bereich gross; in unserem interdisziplinären Projekt suchen wir deshalb nach praxistauglichen und effektiven Ansätzen, um valide und nützliche Informationen über den Anteil von Transport und Logistik an der Energiebilanz wichtiger Güter des täglichen und nicht-alltäglichen Bedarfs zu liefern und aufzuzeigen, wie Konsumenten/-innen ihr Verhalten entsprechend ändern könnten.

In dieser Einleitung gehen wir vom Forschungsstand in den verschiedenen für unser Projekt wichtigen Themenfeldern aus, und leiten daraus die Projektziele und die Fragestellungen ab.

1.1.1 Einkaufsverhalten

Im Folgenden umreißen wir den Stand der Forschung zu einigen für unsere Studie wichtigen Fragen zum Einkaufsverhalten. Dabei greifen wir vor allem auf sozialwissenschaftliche Forschungsarbeiten zurück – dies jedoch immer im Hinblick auf die inter- und transdisziplinäre Ausrichtung unserer Studie, ohne in disziplinäre Grundsatzdebatten einzutreten.

Wie fallen Konsumententscheidungen?

Die sozialpsychologische Literatur befasst sich seit langem intensiv mit dem Entscheidungsverhalten von Konsumenten/-innen. Als Grundlage wird häufig die Theorie des geplanten Verhaltens nach Ajzen (1991) herangezogen. Die Theorie geht davon aus, dass die Absicht, ein Verhalten auszuführen, von der *Einstellung*, der *subjektiven Norm* und der *Verhaltenskontrolle* bestimmt wird. Die Einstellung umfasst die subjektiven Erwartungen bezüglich verschiedener Konsequenzen unseres Handelns, die subjektive Norm wird gebildet, wenn wir einschätzen, wie stark andere relevante Personen im näheren sozialen Umfeld die spezifische Handlungsweise unterstützen oder ablehnen würden, und sie hängt ab von unserer Motivation, sich nach diesen Erwartungen zu richten. Die Verhaltenskontrolle ergibt sich aus unserer Einschätzung, wie externe Faktoren unser Verhalten behindern könnten (Artho et al. 2012).

Konkreten Bezug zum Energiesparverhalten nimmt vor dem Hintergrund der Theorie des geplanten Verhaltens die Studie von Ohnmacht et al. (2017), die ein Phasenmodell der Verhaltensänderung postuliert und darauf aufbauend Interventionsvorschläge formuliert. Das Modell unterscheidet zwischen



vier Phasen. In der ersten Phase («*Predecision*») zielen die Interventionen in erster Richtung darauf, bei der Zielgruppe eine Hinterfragung des habitualisierten Verhaltens zu bewirken. In der zweiten Phase «*Preaction*» sollen die Individuen zu einer Re-Formulierung ihrer Verhaltensstrategien und Intentionen motiviert werden. In diesen zwei Phasen spielen zielgruppengerecht aufbereitete Informationen («deklaratives Wissen») eine zentrale Rolle. Sie stehen beim vorliegenden Projekt deshalb im Vordergrund, während die weiteren Phasen das eigentliche Handeln umfassen (Phase 3 «*Action*»), das es in der vierten Phase («*Postaction*») zu festigen gilt, um zu vermeiden, dass zum ursprünglichen Handlungsmuster zurückgekehrt wird. Die Autoren/-innen dieser Studien haben ihr Modell unter anderem auf die Ernährung (Fleischkonsum) angewandt (Weibel et al. 2019).

Der Einfluss der Transport- und Logistik-Komponente auf Konsumentenscheide ist dagegen noch kaum untersucht worden, was sich nur schon daraus erklärt, dass die Datenlage dazu schmal ist – die vorliegende Untersuchung soll ja auch deshalb zu einer Verbesserung der Datenlage beitragen. Meyerding et al. (2019) haben immerhin zeigen können, dass sich innerhalb ihrer ernährungsbezogenen definierten Lebensstilgruppen Zielgruppen finden lassen, bei denen Aspekte von Transport und Logistik für die Konsumentenscheide potenziell wichtig sind (Lebensstil «Domestic-Ecological», der auf nahräumlich und ökologisch produzierte Lebensmittel setzt).

Wie lassen sich Konsumentenscheide beeinflussen?

Zur Beantwortung der Frage nach der Beeinflussung der Konsumentenscheide gibt bereits die vorgängig erwähnte Literatur erste Hinweise. Darüber hinaus handelt es sich dabei aber um eine Kernfrage jeden Marketings. Ein breiter Forschungsstrang innerhalb dieser Thematik befasst sich mit der Motivierung zu nachhaltigen Formen des Konsums (vgl. zur Übersicht: White et al. 2019, Lubowiecki-Vikuk et al. 2021, Sun et al. 2019). Weitgehend Konsens besteht gemäss diesen Überblicksstudien, dass die Konsumentenscheide von Haushalten durch Aspekte der Nachhaltigkeit zwar beeinflusst sind, dass gleichzeitig aber auch der Preis nach wie vor als wichtigster Faktor den Konsum prägt.

Die Literatur zeigt darüber hinaus auch deutlich, dass eine Segmentierung der Konsumenten/-innen für massgeschneiderte Interventionen notwendig ist. Dies, weil verschiedene denkbare Zielgruppen auf verschiedene Aspekte eines nachhaltigen Konsums unterschiedlich reagieren: Während den einen die Förderung lokaler Produktion wichtig ist, ziehen andere besonders ökologisch produzierte Güter vor. Darüber hinaus gibt es Zielgruppen, die ausschliesslich auf den Preis achten und deshalb schwer zu erreichen sind. Mehrere aktuelle Studien schlagen solche Segmentierungen vor, für Umweltentscheidungen im Allgemeinen (Froemelt et al. 2020 und Froemelt et al. 2018), für das Konsumverhalten (UBA 2020 und UBA 2021), Ernährung (Funk et al. 2021) oder für Mobilität (Haefeli et al. 2020a und Haefeli 2021), aber auch in Bezug auf den demografischen Wandel (Haefeli et al. 2020b). Methodisch werden diese verhaltenshomogenen Gruppen oft mittels statistischer Verfahren (Cluster-Analysen) gebildet. Dies hat den Vorteil, dass die Grösse der verschiedenen Gruppen relativ genau ermittelt werden kann (vgl. als Beispiel Haefeli et al. 2020a). Möglich ist aber auch eine deskriptive Umschreibung von entsprechenden Milieus nach soziodemografischen Merkmalen, Werten, Einstellungen und Präferenzen (vgl. als Beispiel UBA 2021.)

Welche Instrumente zur Verhaltensbeeinflussung scheinen besonders erfolgsversprechend?

In der Vergangenheit ist eine ganze Reihe von Instrumenten zum Einsatz gekommen, mit denen versucht wurde, die Umweltauswirkungen des privaten Konsums in die gewünschte Richtung zu beeinflussen. In erster Linie handelt es sich um sogenannte «weiche» Instrumente wie Information und Beratung. In diese Kategorie fallen verschiedenen Formen von Ökolabels (vgl. zu deren Wirkungsbeurteilung White et al. 2019, S. 30) oder auch die Energieetikette (Stadelmann/Schubert, 2018) sowie ökologische Fussabdrücke (Meyerding et al. 2019). Weiter werden in einigen kritischen Bereichen auch regulatorische Instrumente wie Ge- und Verbote sowie ökonomische Instrumente angewendet.

Aus heutiger Sicht lässt sich mit diesen klassischen Instrumenten einer ökologischen Verbraucherpolitik die notwendige Transformation des privaten Konsums in Richtung Nachhaltigkeit nicht initiieren,



beziehungsweise wurden diese Instrumente nicht stringent genug umgesetzt. Zu gering ist der Marktanteil nachhaltiger Produkte und Dienstleistungen trotz positiver Einstellungen der Konsumenten/-innen zu nachhaltigen Produkten (UBA 2015). Die Herausforderung besteht insbesondere darin, Konsumenten/-innen einen nachhaltigen Konsum so einfach wie möglich zu machen und Verhaltensroutinen zu verändern. Aus diesem Grund werden seit einiger Zeit grosse Hoffnungen auf verhaltensökonomische Ansätze gesetzt: Ausgehend von den klassischen Studien von Kahnemann und Tversky (1979) wird versucht, den physischen, sozialen und psychischen Entscheidungskontext durch sanfte «Stupser» – so genannte Nudges (Thaler/Sunstein 2008) – und durch eine zielorientierte «Architektur der Wahl» zu gestalten. Die Attraktivität der verhaltensbasierten Regulierung wird vor allem darin gesehen, dass sie die Freiheit des Einzelnen nicht einschränkt und keine Verhaltensvorschriften macht oder Verbote erteilt. Ziel ist es, dass Konsumenten/-innen die aus einer langfristigen gesamtgesellschaftlichen Sicht beste Alternative quasi automatisch wählen (Sunstein/Reisch 2014).

Der Einsatz von Nudges ist aber auch kritisiert worden als unzulässige Manipulation der Bürger/-innen den Staat. Vor diesem Hintergrund unterscheiden auch Hansen und Jespersen (2013) zwei Typen von Nudges: Typ-1-Nudges fokussieren auf das automatische Verhalten von Individuen. Typ-2-Nudges zielen hingegen auf reflektiertes und bewussteres Handeln, indem sie die Aufmerksamkeit erhöhen und die Entscheidungsvoraussetzungen verbessern (vgl. dazu auch UBA 2016). Weiter unterscheiden die Autoren Nudges nach ihrer Transparenz. Die folgende Tabelle 1 gibt einen Überblick über diese Kategorien und illustriert diese beispielhaft:

Tabelle 1: Klassifizierung von Typen von Nudges

Nudges	Transparent	Intransparent
Typ 1	Vereinfachung einer konsistenten Wahl z.B.: beidseitiges Drucken als Default, visuelle Illusionen im Strassenverkehr («falsche» Strassenlöcher zur Geschwindigkeitsreduktion)	Manipulation der Wahl z.B.: Anordnung auf Formularen, wie Platzierung der Unterschrift am Anfang; Vereinfachungen
Typ 2	Sicht- und erkennbare Versuche der Verhaltensbeeinflussung z.B.: grüne Fussspuren, die zu Mülltonnen führen; Stromrechnungen mit vergleichenden Verbrauchszahlen der Nachbarn	Intransparente Manipulation des Verhaltens z.B.: Hinzufügen von irrelevanten Optionen

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ, basierend auf Hansen/Jespersen (2012, S. 23), zitiert nach UBA 2015, S. 33.

In unserem Projekt werden wir uns – auch aufgrund der unseres Erachtens berechtigten Kritik an anderen Formen von Nudges – auf die transparenten Nudges gemäss Typ 2 konzentrieren.

Was heisst das für die Unternehmen?

Verändern die Konsumenten/-innen ihr Verhalten in Richtung Nachhaltigkeit, bleibt dies natürlich nicht ohne Wirkung auf die Unternehmen und ihr Marketing. Dieses Marketing kann für die Vergangenheit und weitgehend auch heute noch als Treiber einer steigenden Umweltbelastung bezeichnet werden, weil es vor allem auf zusätzlichen Konsum zielt (White et al. 2019, S. 23). Zunehmend lässt sich aber auch beobachten, dass die Unternehmen aufgrund sich verändernder Kundenpräferenzen dem Aspekt der Nachhaltigkeit ihrer Produktion mehr Beachtung schenken und damit auch Erfolg haben. So



kann zukünftig nachhaltigkeitsorientiertes Marketing zum strategischen Vorteil werden (auch als Motivationsfaktor für die Belegschaft). (Liu/Xu 2021).

Generell hat der Umsatz von nachhaltigen Produkten seit 2012, zumindest in Deutschland, deutlich zugelegt, wobei sich das Wachstum in den letzten Jahren abgeflacht und auf einem Niveau von knapp 10 Prozent verharrt (Steinemann et al. 2015, vgl. auch zusätzliche noch nicht publizierte Daten von Infrac, vgl. Abbildung 1). Es handelt sich also durchaus um einen relevanten Markt, der gleichzeitig sein Potenzial noch nicht ausgeschöpft haben dürfte (Demarque et al. 2015,). Dies dürfte insbesondere auch für das Online-Einkaufsverhalten gelten (Fechner/Herder 2021; Lembcke et al. 2020).

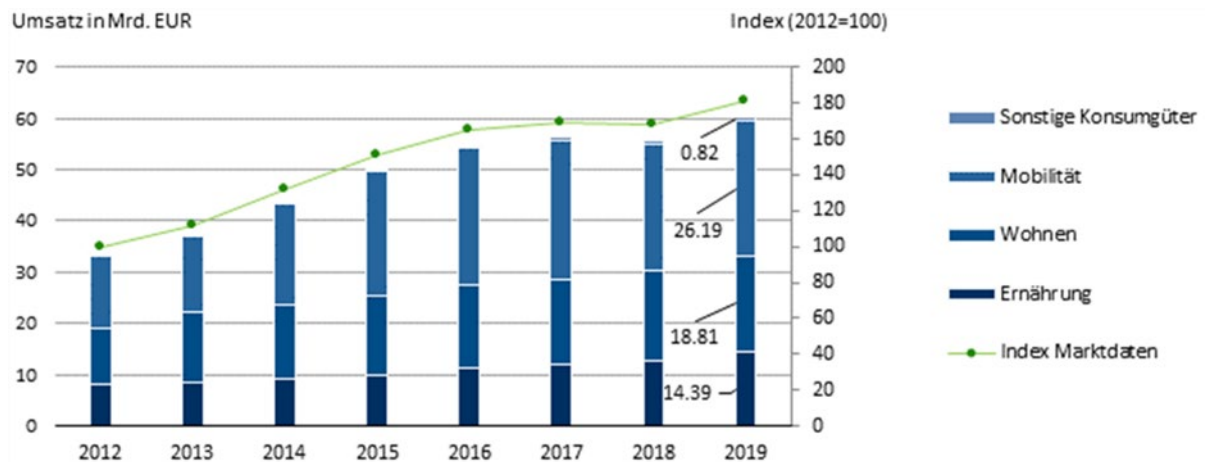


Abbildung 1: Umsatz ausgewählter «grüner» Produkt in Deutschland 2012–2019

Quelle: <https://www.infrac.ch/de/projekte/marktbeobachtung-misst-wie-sich-der-nachhaltige-konsum-entwickelt/>.

Die vorliegende Studie befasst sich in erster Linie mit dem wachsenden Online-Handel. Ein UBA-Bericht zur «Ökologisierung des Onlinehandels» zeigt, dass in den meisten Fällen die grössten Umweltwirkungen aus den Transportprozessen – hier insbesondere den Transporten auf der letzten Meile – sowie – mit grossen Schwankungen zwischen den spezifischen Fällen – aus den Versandverpackungen resultieren. Aus Sicht der Unternehmen macht es also Sinn, hier anzusetzen (UBA 2021).

1.1.2 Literatur zu Ökobilanzen und zur Ökosystemmodellierung

Was zeichnet die Ökobilanzierung von Transport- und Logistikprozessen aus?

Die Ökobilanzierung dient allgemein der Erhebung von Umweltauswirkungen von Gütern und Dienstleistungen entlang ihres gesamten Lebenszyklus und kann damit zum Vergleich von Handlungsalternativen oder zur Aufdeckung von ökologischen «Brennpunkten» in Versorgungsketten verwendet werden (Hellweg/Milà i Canals 2014). Dabei erfolgt die Ökobilanzierung nach ISO 14040/14044 (ISO 2006a; ISO 2006b) in vier grundlegenden Schritten:

1. Eine Festlegung von Ziel und Umfang der Ökobilanz entscheidet über die grundlegende Art der Ökobilanz und die Ausgestaltung der nachfolgenden Arbeitsschritte, indem sie über die zu beantwortende Fragestellung auf die anzuwendende Methodik und den Datenbedarf Einfluss nimmt.
2. Die Inventaranalyse besteht aus dem Zusammenführen von Inventardaten zu den betrachteten Produkten oder Prozessen mit ihren jeweiligen Inputs und Outputs. Dabei werden Inputs und Outputs in Technosphärenflüsse zu anderen Produkten und Prozessen sowie Biosphärenflüsse



(z.B. Emissionen in die Luft, das Wasser und den Boden, oder auch die Gewinnung von Rohstoffen) unterschieden.

3. Die Wirkungsabschätzung verknüpft dann die Technosphärenflüsse untereinander und quantifiziert anschliessend die Umweltauswirkungen der resultierenden kumulierten Biosphärenflüsse. Dabei können verschiedene Wirkkategorien, wie zum Beispiel Treibhauspotenzial, menschliche Gesundheit, Biodiversität, fossiler Rohstoffbedarf oder kumulierter Primärenergiebedarf, aufgeschlüsselt werden.
4. Die Interpretation schliesslich setzt die erhaltenen Resultate in Relation zum Ziel der Studie und liefert somit die Antworten auf die Eingangsfragestellung. Sollten sich die Resultate dafür als unzureichend erweisen, ist eine Iteration mit vorgehenden Schritten notwendig.

Transport und Logistik als unterstützende Aktivitäten in der Bereitstellung von Gütern und Dienstleistungen sind in der Ökobilanzierung üblicherweise Teil des Inventars für verschiedene Produkte und Produktgruppen. Damit tragen sie direkt zum Ressourcenbedarf dieser Produkte und auch zu den Emissionen bei. Eine gewisse Unschärfe in Bezug auf die zugehörigen Umweltauswirkungen stellt sich ein, wenn Annahmen für diese Aktivitäten nur teilweise explizit ausgewiesen werden, beispielsweise bei den Systemgrenzen und damit beim Endpunkt der betrachteten Lieferketten (z.B. Transport bis zum Werkstor, Warenlager, Verteilzentrum oder Konsumenten/-innen). Im Bereich der Güterlogistik liegt in der Ökobilanzierung in vielen Fällen der Fokus auf den Auswirkungen von Langstrecken- oder Mittelstreckentransport mit ihren potenziell hohen Treibhausgasemissionen, während Beiträge anderer Logistikprozesse bislang häufig vernachlässigt werden.

Wie werden die Umweltauswirkungen von Logistikprozessen in der Ökobilanzierung bisher modelliert?

Die Modellierung der Umweltauswirkungen von Transport- und Logistikprozessen im Rahmen von Umweltbilanzen ist grundsätzlich aus zwei Richtungen möglich: als Bottom-up- oder Top-down-Ansatz. Beim Bottom-up-Ansatz werden die entsprechenden Prozesse in der Regel direkt für das entsprechende Produkt modelliert und ihm so zugeordnet, beispielsweise über die Transportdistanzen zwischen verschiedenen Produktionsstandorten, die involvierten Transportmodi und ihre typischen Emissionen. Fallstudien, die diesen Ansatz mit spezifischen Produkten verknüpfen, sind zahlreich, verwenden für Transportmittel und Distanzen aber häufig theoretische Daten (zum Beispiel für Möbel (Wang et al. 2021), Lebensmittel (Qin/Horvath 2022) oder Kleidung (Sohn et al. 2021)). Beim Top-down-Ansatz hingegen wird über statistische Erhebungen für verschiedene Güter und Gütergruppen sowie über die kumulierten Treibstoffverbräuche im Logistiksektor eine Abschätzung für die jeweiligen Produkte hergeleitet (z.B. Borken-Kleefeld 2012 und Sacchi et al. 2022). Häufiger als im Gütertransport wird ein solcher Top-down-Ansatz jedoch im Personenverkehr verwendet (z.B. Baumgärtner et al. 2021 oder Cox et al. 2018).

Im Rahmen der am weitesten verbreiteten Ökobilanzdatenbanken wird in der Regel ein hybrider Weg beschritten: Durch eine Kombination aus Gütergruppenstatistiken mit Daten für einzelne Standorte und Transportmodi sowie mit Daten zu Emissionsintensitäten werden Datensätze bereitgestellt und mit den jeweiligen Produkten verknüpft. Ein Beispiel dafür ist die Ökobilanzdatenbank «Ecoinvent», die bislang am verbreitetsten genutzt wird (Wernet et al. 2016). In dieser Datenbank wurden Statistiken zu den Transportmengen und Distanzen für verschiedene Gütergruppen in den USA verwendet, verschiedene Lücken in Bezug auf Transportmodi gefüllt, und dann mit eigenen Daten zu den Emissionsintensitäten für den Transport von Gütern pro Tonnen-Kilometer für die verschiedenen Transportmodi sowie unterstützende Logistikaktivitäten (bspw. Kühlen oder Einfrieren) kombiniert (Borken-Kleefeld 2012; Lérová 2015). Hierbei wurde auch die Plausibilität der Rohdaten geprüft, um unplausible Transportwege und statistische Ungenauigkeiten zu reduzieren.

Im Rahmen detaillierter Studien für Konsumgüter wählt man in der Regel den Bottom-up-Ansatz für Vordergrunddaten direkter Transporte der Produkte mit Schätzung der jeweiligen Transportmittel



und -wege sowie für Emissionen und die Technosphärenflüsse Hintergrunddaten aus einer der bestehenden Ökobilanzdatenbanken (z.B. Hemmati et al. 2022). Hiervon zu unterscheiden sind detaillierte Studien speziell für Transport- und Logistikprozesse, die einen Schritt weiter gehen. Sie decken auch die Emissionen bottom-up mit hochaufgelösten und parametrisierten Modellen ab (Sacchi et al. 2021), gehen dafür aber in der Regel Kompromisse bei der Abbildung realistischer Logistikprozesse und bei der Anknüpfung an reale Produkte ein.

Welchen Datenbedarf gibt es und wie steht es um die Datenverfügbarkeit?

Grundsätzlich ist der Datenbedarf für Ökobilanzen hoch und auch Studien im Logistiksektor stellen dabei keine Ausnahme dar. Ein hoher Datenbedarf ergibt sich dabei beispielweise für «typische» Energieeffizienzen, Emissionsintensitäten, Beladungen, Flottenzusammensetzungen, Distanzen und Treibstoffverbräuche (Borken-Kleefeld 2012; Frischknecht et al. 2018). Ein Grossteil dieser Daten wird normalerweise nicht regelmässig, flächendeckend und vollständig sowie nicht direkt zur Ökobilanzierung erhoben, sodass das Füllen relevanter Lücken und der Transfer der Daten ein notwendiger Bestandteil entsprechender Studien ist. Das führt häufig dazu, dass nur stark räumlich, zeitlich und sachlich abgegrenzte Fallstudien untersucht werden (Cremer et al. 2021; Croci et al. 2021; Pani et al. 2021).

In der Folge der Anforderungen dieser Ökobilanzen ergeben sich zudem speziell Schwierigkeiten aus der fehlenden Datenverfügbarkeit in der passenden Auflösung zur Ökobilanzierung, insbesondere bei der Zuordnung von stark differenzierten und strukturierten Produkten zu spezifischen Transport- und Logistikprozessen, der Erhebung und Bereitstellung realistischer Emissionsdaten aus der Praxis, der fehlenden Rückverfolgbarkeit von Produktbestandteilen entlang der zunehmend globaleren Supply Chains insbesondere von kleinteiligen Produkten, und der globalen Abdeckung von solchen Daten. Besonders die langfristige Bereitstellung von Ökobilanzdaten erfordert zudem eine wiederkehrende Rohdatenbereitstellung mit gleichbleibender Methodik und einem leicht zugänglichen Datenformat. Die systematische Datenerhebung von umweltrelevanten Transport- und Logistikdaten, die diesen Anforderungen genügt, beschränkt sich vor allem auf die industrialisierten Regionen der Welt, während über die globale Vernetzung der Versorgungsketten ein erheblicher Anteil der Emissionen und Umweltauswirkungen auch ausserhalb dieser Regionen verursacht wird und sich nur indirekt, beispielsweise über das Konsumentenverhalten, beeinflussen lässt.

Welche Erkenntnisse lassen sich aus bestehenden Ökobilanz-Studien im Logistiksektor gewinnen?

Sektorweise ist die Abdeckung mit Ökobilanzdaten zu Transport und Logistik sehr unterschiedlich. Treibstoffe und alternative Antriebskonzepte haben insgesamt eine grosse Abdeckung (z.B. Elektromobilität), was durch die Schnittstelle zu anderen Sektoren, wie dem Rohstoffsektor oder dem Energiesektor, begünstigt wird. Besonders intensiv wurden beispielsweise verschiedene Biotreibstoffe auf tatsächlich reduzierte Umweltauswirkungen untersucht, wobei ein Vergleich aber durch unterschiedliche Grundannahmen sowie unterschiedliche Systemgrenzen erschwert wird (Menten et al. 2013; van der Voet et al. 2014). Ähnliche Erkenntnisse wurden zum Thema Elektromobilität gefunden, wo Annahmen zum Strommix und zur Betriebsweise der Fahrzeuge grossen Einfluss auf die Umweltauswirkungen haben (Faria et al. 2013). Auch eine Umstellung des Transportsektors auf Wasserstoff als Treibstoff ist mit grossen Unsicherheiten in Bezug auf verringerte Umweltauswirkungen verbunden (Ueckerdt et al. 2021). Wesentliche Basisdaten sind ausserdem nach wie vor teilweise nur sehr bedingt verfügbar (z.B. für Batteriematerialien oder projizierte Energiemixe) und schränken so die Aussagekraft bestehender Ökobilanzen im Transport- und Logistiksektor ein (Cox 2018).

Besondere Aufmerksamkeit hat in der Ökobilanzierung der Lebensmittelsektor aufgrund seiner Klimarelevanz und der Auswirkungen auf die globale Biodiversität erhalten, was sich auch in einer verbesserten Verfügbarkeit von zugehörigen Logistikdaten niederschlägt. Dieser Sektor ist geprägt durch eine hohe Produktdiversität, durch die Anforderungen an die Kontrolle der Produkteigenschaften während der Logistikprozesse, durch die allgemein sehr herausfordernden Logistikbedingungen und durch



die hohen globalen Transportvolumina dieses Sektors. Bedingt dadurch ist die Granularität der Studien im Lebensmittelsektor wesentlich höher als in anderen Sektoren, und die bestehenden Studien belegen deutlich die begrenzte Aussagekraft von sektorweiten Standardabschätzungen, denn je nach Produkt, Produktions- und Konsumstandort, Transportbedingungen und Saisonalität ergeben sich sehr unterschiedliche Umweltauswirkungen der zugehörigen Logistikprozesse (Walker et al. 2021).

Hier zeigt sich auch, in welcher Weise die Umweltrelevanz der Transportprozesse eine Frage der Perspektive ist. Eine relative Relevanz für Emissionen ergibt sich beispielweise aus hohen Emissionen der Logistikprozesse im Vergleich zu vor- und nachgelagerten Prozessketten, relativ beispielsweise pro Menge, während zu einer absoluten Relevanz auch eine Berücksichtigung der benötigten Produktmenge erforderlich ist.

Lufttransport, Lagerung, Kühlung, lange Distanzen usw. haben einen hohen Einfluss auf die Umweltauswirkungen von Nahrungsmitteln, aber es ergeben sich teilweise auch hohe relative Umweltauswirkungen trotz kurzer Strecken durch die vergleichsweise emissionsarme Produktion (z.B. in einigen Fällen bei Äpfeln). Spezielle Transportbedingungen, wie der gekühlte Transport von Orangen (Wu et al. 2019), wurden detailliert untersucht und Parameter wie die Lagerdichte haben einen relativ geringen Einfluss auf die Umweltauswirkungen gezeigt, insbesondere wo Emissionen ausserhalb des Transportsektors (wie etwa durch Kohlestrom) beteiligt sind. Hier wird jedoch geschlossen, dass der Logistiksektor im Zuge der Dekarbonisierung unter starken Zugzwang geraten wird, weil damit die Umweltrelevanz von sektor-externen Emissionen stark absinken wird, sodass eine solche Parametrisierung allgemein doch sinnvoll sein kann.

Auch abseits des Lebensmittelsektors ist der teilweise hohe Beitrag von Transport und Logistik zu den Umweltauswirkungen einzelner Produkte nachgewiesen worden. Ein Beispiel stellt der Textilsektor dar, wo eine geringe Nutzung von Textilien und hohe Emissionen des Transports zu einem insgesamt hohen Anteil der Logistikaktivitäten entlang des Produktlebenszyklus führen können (Roos et al. 2016). Noch extremer stellen sich die Ergebnisse der Ökobilanzierung im Rohstoffsektor und im Transport von Schüttgütern wie Eisenerz, Kohle, Düngemitteln oder Getreide dar. Diese werden vielfach global per Schiff transportiert, doch trotz der Effizienz des Schiffstransports handelt es sich dabei um grosse Mengen und lange Distanzen, sodass die absoluten Umweltauswirkungen global insgesamt hoch sind, sich dann aber auf eine Vielzahl unterschiedlichster Endprodukte aufteilen (Wernet et al. 2016; Tahara, 2019). Da die Umweltauswirkungen von Transport und Logistik in den Vorketten jeweils sehr schwer abzuschätzen sind, kommt es zu einer hohen Fragmentierung der Umweltauswirkungen pro Endprodukt, was die effektive Regulierung stark erschwert.

Auf Modellierungsebene ist es bereits teilweise gelungen, Umweltbilanzen auf Produktebene mit detaillierter Netzwerkmodellierung von Transport- und Logistikprozessen zu verknüpfen. Dies beschränkt sich aber bisher auf Fallstudien für einzelne Regionen (Ingrao et al. 2021) oder Produktgruppen (Walker et al. 2021; Oberschelp et al. 2019), sodass globale und gleichzeitig produkt-übergreifende Erkenntnisse bisher nur unzureichend vorliegen.

1.1.3 Literatur zu Emissionen von Transport und Logistik sowie zu Tools und Standards

Was versteht man unter Logistik und Transport?

Das Ziel von Logistiksystemen ist es, das richtige Gut in der richtigen Menge zur richtigen Zeit am richtigen Ort in der richtigen Qualität und zu den richtigen (möglichst geringen) Kosten zur Verfügung zu stellen (Pfohl 2010). Aus der Unternehmensperspektive wird nochmals zwischen Beschaffungs-, Produktions-, Distributions- und Entsorgungslogistik unterschieden (Pfohl 2010), womit die jeweiligen Beiträge in der Wertschöpfungskette betont werden. Eine weitere Gliederung der Logistik differenziert nach den Funktionen Transport, Umschlag, Lagerung und zusätzlicher Hilfsfunktionen, wie beispielsweise die Kommissionierung oder Verpackung von Gütern. Transport ist somit Teil verschiedener Logistikbereiche entlang von Wertschöpfungsnetzwerken zwischen Produzenten, Lieferanten, Händlern, Dienstleistern und Konsumenten.



Emissionen von Transport und Logistik

Mit knapp einem Drittel aller CO₂-Emissionen ist der Verkehrssektor mit seinen rund 15 Mio. t CO₂ pro Jahr (2015) der grösste inländische Emittent von Treibhausgasen (Anteil Verkehrssektor: 32%; zum Vergleich: Gebäude 26%, Industrie 22%, Übrige 19%; vgl. Bundesamt für Umwelt 2017). Drei Viertel der Verkehrsemissionen gehen von Personenwagen aus. Der Güterverkehr besitzt einen Anteil von 18 Prozent, wovon zwei Drittel vom Güterverkehr mit schweren Nutzfahrzeugen (> 3,5 t Gesamtgewicht) emittiert werden (Ickert et al. 2017). Insgesamt kann also von rund 3 Mio. t CO₂ ausgegangen werden, die durch den Güterverkehr verursacht werden.

Gemäss Logistikmarktstudie 2014 (GS1 2013) machen, gemessen an den gesamten CO₂-Emissionen der Schweiz, die auf Basis der transportierten Tonnage berechneten CO₂-Emissionen der Binnenverkehre rund 2 Prozent, jene der Transitverkehre weniger als 1 Prozent aus. In den gesamten CO₂-Emissionen der Schweiz sind jedoch nicht die durch Import- und Exportverkehre verursachten Emissionen enthalten, weil nach Territorialprinzip erfasst wird. Diese weiteren 5 Mio. t CO₂ müssten im Rahmen einer verursachungsgerechten Betrachtung zu den 46 Mio. t CO₂-Emissionen der Schweiz addiert werden.

Innerhalb der Logistik verursacht der Transport klar am meisten Emissionen. Andere logistische Tätigkeiten wie Umschlag, Lagerung, Kommissionierung und Verpackung sind dennoch nicht vernachlässigbar. Je nach Transportgut können auch hier relevante Mengen an CO₂-Emissionen entstehen. Dazu zählen insbesondere Kühlagerung oder Lagerung von Gefahrgütern, welche grosse Mengen an Energie verbrauchen. Dennoch sind die Prozesse bereits heute sehr effizient. Deshalb kommt das deutsche Umweltbundesamt z.B. zu dem Schluss, dass es in vielen Fällen ökologisch vorteilhaft ist (meist in Bezug auf entstehende Treibhausgasemissionen) den Einkauf im Online-Handel zu erledigen gegenüber einem Einkauf im stationären Handel (Zimmermann 2020).

Standards zur Ermittlung von Emissionen von Transport und Logistik

Verschiedene Standards helfen bei der Ermittlung von Energieverbrauch und Emissionen, die Vielfalt an möglichen Perspektiven ist jedoch gross und entsprechend unterscheiden sich auch die methodischen Ansätze.

Die ISO 14064 zur Treibhausgasbilanzierung und Verifizierung stellt für Industrie und Behörden ein geeignetes Instrument zur Entwicklung von Programmen zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen dar. Sie richtet sich an ein rapportierendes Unternehmen, das in Umweltberichten Transparenz über die eigenen und beeinflussten Emissionen schaffen möchte. Dabei unterscheidet die Norm wiederum zwischen verschiedenen Systemabgrenzungen (Scopes), die im GHG Protocol beschrieben werden. Wie konkret Emissionen zu Transport und Logistik zu ermitteln sind, wird in der ISO 14064 nicht weiter präzisiert.

Scope 1 repräsentiert die direkten Emissionen eines Unternehmens – entweder in den eigenen Einrichtungen oder in mobilen Anlagen wie Fahrzeugen. Der Grossteil der Scope-1-Emissionen wird durch die Nutzung fossiler Brennstoffe verursacht, also durch Kraftstoff und Kraftstoffverbrauch. Darüber hinaus fallen auch Gase, die bei Produktionsprozessen freigesetzt werden, unter Scope 1, wie beispielsweise CO₂ bei der Zementherstellung, Methan in der Landwirtschaft und Schwefelhexafluorid (SF₆) in der Elektroindustrie.

Scope 2 umfasst indirekte Emissionen, die andere Unternehmen erzeugt haben, um das berichtende Unternehmen mit Energie zu versorgen. Unter anderem ist darin die Erzeugung von Strom und Fernwärme enthalten.

Scope 3 geht weit über die in Scope 1 und 2 erfassten Emissionen hinaus und umfasst alle indirekten Emissionen eines Unternehmens. Die Idee hinter Scope 3 ist es, Transparenz über alle Emissionen zu schaffen, die durch Unternehmensentscheidungen beeinflusst werden. Zu diesem Zweck umfasst Scope 3 die gesamte Wertschöpfungskette eines Unternehmens. Erfasst werden neben allen einge-



kaufen Dienstleistungen und Waren auch der Pendlerverkehr und die Dienstreisen der Mitarbeiter/-innen. Bei Unternehmen, die Produkte herstellen, weiterverkaufen oder leasen, umfasst Scope 3 zudem den gesamten Produktlebenszyklus.

Die ISO 14040 Ökobilanz oder Lebenszyklusanalyse dient dazu, die potenziellen Umweltauswirkungen eines Produktsystems über den gesamten Lebensweg zu beurteilen. Wie konkret Emissionen zu Transport und Logistik zu ermitteln sind, wird in der ISO 14040 nicht weiter präzisiert.

In der EN 16258, einer Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen (Güter- und Personenverkehr) (erstmals erschienen 2012), werden die Methode und die Anforderungen an die Berechnung und Berichterstattung von Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen dargelegt. Die erste Ausgabe der Norm konzentrierte sich auf Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen, die mit (auf dem Land, im Wasser und in der Luft eingesetzten) Fahrzeugen während der Betriebsphase als Teil des Lebenszyklus verbunden sind. Für die Berechnung des Energieverbrauchs und der Emissionen von Fahr- und Flugzeugen werden auch Energieverbrauch und Emissionen berücksichtigt, die im Zusammenhang mit den Energieprozessen der bei Fahrzeugen eingesetzten Kraftstoffe und/oder der Stromversorgung verwendet werden (einschliesslich z.B. Produktion und Verteilung von Kraftstoffen). Dadurch ist sichergestellt, dass die Norm bei der Durchführung von Berechnungen und bei Deklarationen gegenüber den Nutzern von Transportdienstleistungen einen «Well-to-Wheel»-Ansatz verfolgt.

Durch die Grundidee (den Inhalt und die Struktur, die dieser Norm zugrunde liegen) wurde versucht, sie im gesamten Transportsektor (durch systematische Gleichbehandlung aller Verkehrsträger) anwendbar und für ganz unterschiedliche Benutzergruppen zugänglich zu machen. Innerhalb des Sektors unterscheiden sich die Transportvorgänge beträchtlich; von multinationalen Organisationen, die verschiedene Verkehrsträger verwenden, um weltweit Transportdienstleistungen zu erbringen, bis hin zu einem kleinen lokalen Frachtführer, der eine einfache Dienstleistung für einen Nutzer erbringt. Ausserdem ist die potenzielle Benutzergruppe dieser Norm in ähnlicher Weise mannigfaltig, und das Erfassen von Transportenergie und Emissionen innerhalb von Organisationen kann mit verschiedenen Detaillierungsgraden und auf unterschiedlichen Niveaustufen erfolgen. Infolgedessen versucht die erste Ausgabe der Norm für einen Ausgleich zwischen dem Wunsch nach grösstmöglicher Präzision und wissenschaftlicher Strenge und einem Mass an Pragmatismus zu sorgen, um Benutzerfreundlichkeit, Zugänglichkeit und eine möglichst breite Anwendung zu erreichen.

Das EU-finanzierte Projekt COFRET (Carbon footprint of freight transport) verfolgte 2012 und 2013 das Ziel, die Berechnungen von CO₂-Emissionen für Lieferketten zu verbessern. Während der Laufzeit des Projekts wurden zwei erste Ansätze für europäische und internationale Normen (EN 16258 und ISO 14067) zur Berechnung von CO₂-Emissionen veröffentlicht, mit welchem sich das Forschungsteam intensiv auseinandersetzte. Eine Kritik seitens COFRET an der EN16258 bezog sich auf die Lücke, die durch den Fokus auf den Transport entsteht, indem weitere Logistikfunktionen, wie beispielsweise die Umschlagsfunktion oder die Lagerung, unbehandelt bleiben. (Europäische Kommission 2013)

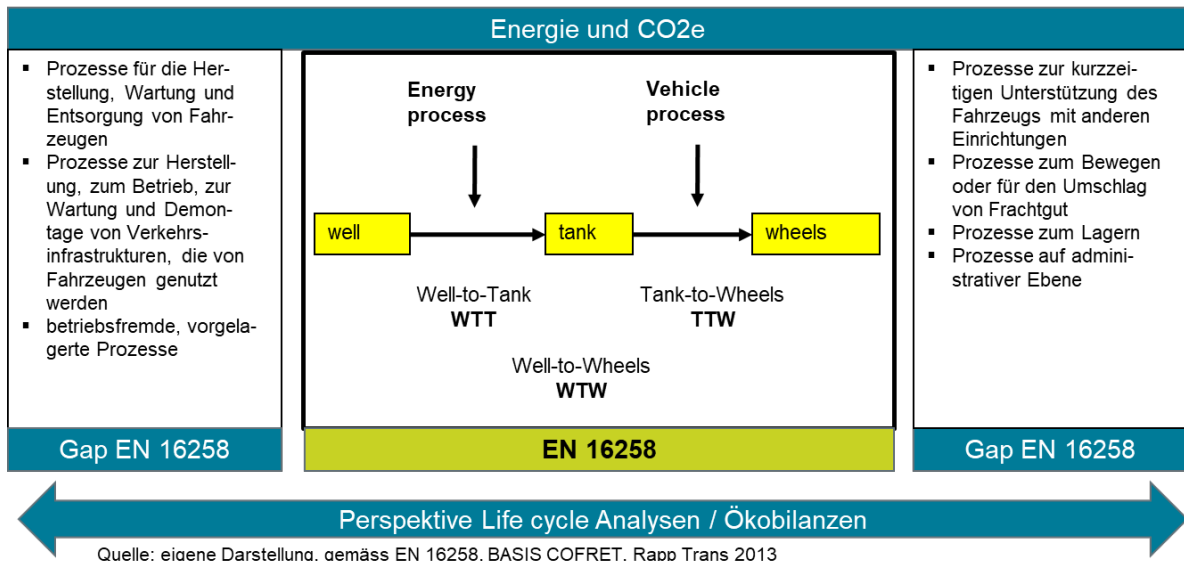


Abbildung 2: Life Cycle Analysen / Ökobilanzen

Die ISO 14083 – Normierung von Emissionsberechnungen als Basis der nachhaltigen Effizienzsteigerung von Transportketten – wird ab dem Jahr 2023 zusammen mit der ersten Überarbeitung der EN16258 als Standard dienen. Die ISO 14083 wird die bestehende europäische Norm EN 16258 ersetzen.

Tools zur Ermittlung von Emissionen von Transport und Logistik

Die grosse Herausforderung bei der Ermittlung von Emissionen von Transport und Logistik besteht darin, den Energieverbrauch von Anlagen und Fahrzeugen zu kennen. Entweder kann dabei auf gemessene Verbrauchswerte zurückgegriffen werden, oder es muss mit Vorgabewerten gearbeitet werden. Bei der Ermittlung von Emissionen im Strassenverkehr hat sich das Handbuch der Emissionsfaktoren (HBEFA) als nützliches und weit verbreitetes Instrument etabliert (Infras 2022). Es stellt Emissionsfaktoren für die gängigsten Fahrzeugtypen zur Verfügung (PKW, leichte und schwere Nutzfahrzeuge, Linien- und Reisebusse sowie Motorräder), differenziert nach Emissionskonzepten (Euro 0 bis Euro 6/VI) sowie nach verschiedenen Verkehrssituationen. HBEFA liefert auch Emissionsfaktoren für alle reglementierten und eine Reihe von nicht-reglementierten Schadstoffen, einschliesslich CO₂ und Kraftstoff-/Energieverbrauch. Es ist als Online-Version für die Länder Schweiz, Deutschland, Österreich, Frankreich, Schweden und Norwegen verfügbar.

Relationsbezogene Tools helfen, Energieverbrauch und CO₂-Emissionen von Transporten zu ermitteln. Derzeit gibt es verschiedene Anbieter, die Unterstützung bei der Ermittlung von Emissionen von Transporten anbieten, wie beispielsweise EcoTransIT (ifeu 2019), waves, bigmile oder carboncare. Die meisten Toolanbieter geben an, gemäss den aktuell gültigen Normen (EN16258) zu rechnen. Zwischenzeitlich ist im Bereich Carbon-Management und Carbon-Accounting auch ein Markt für Toolanbieter entstanden, wo kostenpflichtige Berechnungsdienstleistungen angeboten werden. Einzelne Anbieter versuchen, ihr Tool als Branchenstandard zu präsentieren, um sich im Markt um Berechnungsdienstleistungen gegenüber Wettbewerbern zu positionieren. Die Transparenz bezüglich der verwendeten Methoden, Verbrauchswerten und Emissionsfaktoren ist bei den Black-Box-Tools jedoch nicht mehr gewährleistet und es kann nicht überprüft werden, wie die Emissionen ermittelt werden.

Im Gegensatz dazu steht der Ansatz des in der Schweiz entwickelten Werkzeugs mobitool (mobitool, 2023). Dieses Tool ist Excel-basiert und steht aktuell (2023) in der dritten Version zur Verfügung. Es



ermöglicht die Berechnung von Umweltauswirkungen von Mobilität mit Fokus auf die Schweiz und Europa. Nicht nur direkte Schadstoffemissionen, sondern anteilig auch beispielsweise Infrastruktur (wie etwa Strassen) und die Verkehrsmittel selbst (z.B. Herstellung eines LKWs), sowie Vorketten (z.B. Kraftstoffherstellung oder Energieversorgung) werden berücksichtigt. Zum einen ist dieses Tool umfangreich dokumentiert, und zum anderen ist es stark parametrisiert, sodass zum Beispiel die Belastung von LKWs nach Bedarf der Fragestellung variiert werden kann. Weitere Parameter umfassen Grössenklasse, Transportdistanzklasse, Treibstoffstandards, Jahr der Herstellung des Transportmittels, jährliche Laufleistung, Batterietypen, Wasserstoffherstellungsverfahren oder Strommixe. Besonders detailliert ist das Tool für den Strassenverkehr (PKWs, LKWs, Busse usw.), während andere Verkehrsmittel eher rudimentär abgedeckt werden (z.B. Bahn, Schiffe, oder der Luftverkehr). Die Auswertung der Ergebnisse des Tools erfolgt anhand von Emissionen (PM2.5, PM10, NOx, NMVOC) sowie einigen typische LCIA-Indikatoren (GWP 100a, UBP 2021, Primärenergieverbrauch). Datengrundlage stellen parametrisierte Modelle, HBEFA-Daten, die UVEK-Datenbank für Lebenszyklusinventare, nationale Statistiken und weitere Datenquellen dar.

Aufgrund der Vielfalt an möglichen Standards und Tools und den steigenden Erwartungen zahlreicher Akteure in der Wirtschaft betreffend dem CO₂-Reporting sind Unternehmen aus Industrie, Handel und Logistik gefordert sich intensiv mit dem Thema auseinanderzusetzen. Grosse Unternehmen haben mittlerweile das CO₂-Reporting in ihren IT-Systemen für bestimmte Teilprozesse integriert und können automatisiert Reports pro Sendung ausgeben. Kleinere Unternehmen können den Initialaufwand nicht allein stemmen. Viele Informationen bezüglich CO₂-Reporting sind demnach auch heute noch nicht verfügbar.

1.2 Projektziele und Fragestellungen

Im Projekt sollen die folgenden Fragestellungen bearbeitet werden:

1. Welche Güter sind besonders kritisch in Bezug auf Energieverbrauch/CO₂-Emissionen und Umweltbelastungen durch Logistik- und Transportprozesse?
2. Welche Prozesse von der Beschaffung der Rohstoffe bis zur Entsorgung der Produkte sollten berücksichtigt werden (sinnvolle Systemgrenzen, Datenbedarf und Verfügbarkeit verlässlicher Daten usw.)
3. Welche Berechnungsmodelle/Verfahren sind angemessen und in der Praxis durchführbar?
4. Wie können die CO₂-Emissionen und der Energieverbrauch von Logistik- und Transportprozessen zielgerichtet in Beschaffungs- und Einkaufsentscheidungen integriert werden, die auch die kombinierten Umweltauswirkungen auf Basis einer Ökobilanz berücksichtigen? Welche Ansätze, Methoden und Instrumente stehen dabei im Vordergrund? Welche Formen der Verbraucherinformation sind erfolgversprechend und wie können sie in das Unternehmensmarketing integriert werden?
5. Wie wirkt es sich aus, wenn Informationen über die Energieeffizienz von Transport und Logistik in das Entscheidungs- und Konsumverhalten von Konsumenten/-innen und Verladern integriert werden? Welche Potenziale bestehen in Bezug auf die Reduzierung des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen von Logistik und Transport?
6. Welches sind die Erfolgsfaktoren für Verhaltensänderungen bei Konsumenten/-innen und Verladern in Bezug auf die Energieeffizienz der Güterlogistik?
7. Im Rahmen der kantonalen Kofinanzierung werden lokale Pilotprojekte im Sinne von «Real-Laboren» untersucht. In Basel handelt es sich dabei um die SmartBoxBasel: Wie lässt sich das Konsumentenverhalten in Bezug auf die Last-Mile-Delivery im Online-Handel beeinflussen? Und wie viel CO₂ wird durch den Einsatz der SmartBoxBasel auf der letzten Meile eingespart beziehungsweise könnte idealerweise eingespart werden? Im Raum Zürich steht im Zusammenhang mit



dem SBB-Stückgutterminal Hardfeld eine noch nicht genau definierte Fragestellung im Vordergrund.

1.3 Methodik

Zur Beantwortung der Fragestellungen wurden zwei voneinander unabhängige Methoden umgesetzt.

Erstens wurde ein Schätzmodell zur Modellierung der durch Transport und Logistik entstehenden Emissionen entwickelt. Das Modell ist in der Lage, ohne genaue unternehmensspezifische Daten zu kennen, die Logistikemissionen plausibel zu schätzen. Der gewählte Ansatz erlaubte die Untersuchung verschiedener Logistikketten und verschiedener Transportwege in spezifischen Fallstudien.

Zweitens wurde eine repräsentative Befragung der Konsumenten/-innen in der Schweiz durchgeführt. Auf Basis der Befragung wurden erstens mittels einer Cluster-Analyse Typen von Konsumenten/-innen ermittelt, um die Heterogenität hinsichtlich Einstellungen, Normen und Verhalten beim Online-Handel in der Schweizer Bevölkerung erfassen zu können. Zweitens ermöglichten Discrete-Choice-Experimente, den Effekt von Produktinformationen zu Umweltaspekten isoliert zu untersuchen.

Die methodischen Aspekte sind in den Abschnitten 6.1 und 6.2 im Anhang vertieft dargestellt.



2 Ergebnisse Survey

2.1 Typen von Konsumenten/-innen

Um die Heterogenität hinsichtlich Einstellungen, Normen und Verhalten beim Online-Handel in der Schweizer Bevölkerung erfassen zu können, wurden mittels einer Cluster-Analyse Typen von Konsumenten/-innen ermittelt. Wir zeigen in Abschnitt 2.1.1 die Herleitung der Typen auf, bevor wir in Abschnitt 2.1.2 die ermittelten Typen anhand von bestimmten Vergleichen charakterisieren und interpretieren.

2.1.1 Herleitung der Typen

Die Herleitung der Typen wurde in zwei Schritten angegangen: In einem ersten Schritt wurde eine *Faktorenanalyse* durchgeführt (vgl. für die methodischen Erläuterungen dazu in den Abschnitten 6.1 und 6.2 im Anhang). Das Ziel der Faktorenanalyse bestand darin, Items zu Einstellungen zum Online-Einkauf (im Vergleich zum Einkauf vor Ort) zu einer für die Cluster-Analyse handhabbaren Anzahl Faktoren zu reduzieren. Eine Übersicht über die in der Faktorenanalyse verwendeten Variablen befindet sich in Tabelle 2. Die Faktorenanalyse legt nahe, dass sich zwei Faktoren aus den Variablen extrahieren lassen. Der erste Faktor fasst Variablen zusammen, die den *zeit- und kostenoptimierenden Aspekt* des Einkaufens betonen. Der zweite Faktor summiert Variablen, die sich auf die Aspekte *Kontakt und Vertrauen* in Zusammenhang mit Einkaufem beziehen.

Tabelle 2: Faktorenladungen der Faktorenanalyse

Wie beurteilen Sie den Online-Handel im Vergleich zum Einkauf vor Ort hinsichtlich der folgenden Kriterien?	Faktor 1: Zeit- und Kosten- optimierung	Faktor 2 Kontakt und Vertrauen
Der Online-Handel ist günstiger.	.65	
Der Online-Handel bietet eine grössere Auswahl.	.72	
Die Zahlungsabwicklung beim Online-Handel ist weniger sicher als beim Handel vor Ort.		.53
Über den Online-Handel gelange ich schneller zu einem Produkt.	.62	
Über den Online-Handel erhalte ich mehr und bessere Informationen zu einem Produkt.	.59	
Der Online-Handel bietet mehr Privatsphäre.	.52	
Der Online-Handel bietet den besseren Kundendienst.	.41	-.58
Der Online-Handel ist weniger persönlich.		.78
Varianz (kumuliert)	27%	43%

Legende: Ergebnisse der mit R durchgeführten Hauptkomponentenanalyse. In der Tabelle werden nur Faktorenladungen von mehr als 0.4 angezeigt.

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.



Beide gemäss Faktorenanalyse in Tabelle 2 ermittelten Faktoren wurden in die Cluster-Analyse einbezogen. Zusätzlich wurden Variablen berücksichtigt, die sich auf das Online-Kaufverhalten beziehen. Tabelle 3 gibt einen Überblick über alle in die Cluster-Analyse einbezogenen Variablen.

Tabelle 3: Übersicht über die in die Cluster-Analyse einbezogenen Variablen

Variable	Ausprägungen	Skalenniveau
Ausgaben letzte 30 Tage (Vergleich online vs. vor Ort)	Von (1) «Ich gebe deutlich mehr Geld im Online-Handel aus.» bis (5) «Ich gebe deutlich weniger Geld im Online-Handel aus.»	ordinal (pseudometrisch)
Häufigkeit letzte 30 Tage	Wie oft haben Sie in den letzten 30 Tagen Waren online bestellt?	metrisch
Ausgaben (Total)	Wie viel Geld haben Sie in den letzten 30 Tagen für Waren ausgegeben, die Sie online bestellt haben?	metrisch
Nachhaltigkeit (Vergleich online vs. vor Ort)	Item: «Der Online-Handel ist ökologischer.» Bewertung auf Skala von (1) «Stimme überhaupt nicht zu» bis (5) «Stimme voll und ganz zu.»	ordinal (pseudometrisch)
Kosten und Angebote	Faktor aus Faktorenanalyse	metrisch
Interaktion und Vertrauen	Faktor aus Faktorenanalyse	metrisch

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.

Ausgehend von den in Tabelle 2 aufgeführten Variablen wurden mittels dem k-Means-Verfahren drei Cluster ermittelt. Cluster-Lösungen mit zwei respektive vier Cluster wurden ebenfalls gerechnet. Diese Cluster-Lösungen waren jedoch schwieriger interpretierbar und drängten sich auch hinsichtlich statistischer Kennwerte nicht als bessere Cluster-Lösungen auf. Der betreffende WSS-Plot, der die jeweiligen Werte der Cluster-Lösungen aufzeigt, findet sich in Abbildung 37 im Anhang. Werden die jeweiligen gruppeninternen Quadratsummen für alle Cluster-Lösungen (also 1 bis 8 Cluster) abgebildet, bestätigt sich, dass die 3-Cluster-Lösung die Geeignenste ist.

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der 3-Cluster-Lösung dargestellt, indem die drei Cluster sowohl hinsichtlich der für die Cluster-Analyse verwendeten als auch hinsichtlich weiterer Variablen verglichen werden. Darauf basierend werden die drei Cluster interpretiert.

2.1.2 Die drei Typen von Online-Einkäufern/-innen im Vergleich

Tabelle 4 zeigt das Ergebnis der Cluster-Analyse mit den drei Typen von Online-Einkäufern/-innen. Die Typen unterscheiden sich am klarsten darin, wie häufig sie vom Online-Handel Gebrauch machen und wie sie zu ihm stehen. Die Gruppen werden fortan ihrem Einkaufsverhalten nach wie folgt benannt:



- Die erste Gruppe umfasst Personen des Typs *Traditionalisten/-innen*. Sie beurteilen den Online-Handel negativer als den Handel vor Ort, wobei ihnen bei Ersterem vor allem der Kontakt mit anderen Leuten und die Sicherheit fehlen. Sie bestellen im Schnitt monatlich nur etwa zweimal etwas im Internet und geben dort deutlich weniger Geld aus als im Verkauf vor Ort. Die Traditionalisten/-innen machen die grösste Gruppe aus in der Schweizer Bevölkerung mit rund 60 Prozent.
- Die zweite Gruppe umfasst Personen des Typs *Abwäger/-innen*. Diese Gruppe wägt situativ ab, ob sie online oder vor Ort einkauft. Der Einkauf im Internet wird dann bevorzugt, wenn Kosten und Nutzen beim Einkaufen vor Ort in einem subjektiv wahrgenommen negativen Verhältnis stehen. Sie sind aber dem Online-Handel grundsätzlich gleich offen gegenübergestellt wie dem Handel vor Ort und geben online und beim Einkaufen vor Ort in etwa gleich viel aus. Pro Monat kaufen sie etwa fünfmal online ein. Die Abwäger/-innen sind mit 34 Prozent die zweitgrösste Gruppe.
- Die dritte Gruppe umfasst Personen des Typs *Online-Power-Einkäufer/-innen*. Sie kaufen im Schnitt monatlich 13-mal im Online-Handel ein und geben dort auch etwas mehr Geld aus als beim Einkaufen vor Ort. Sie machen anteilmässig die kleinste Gruppe innerhalb der Schweizer Bevölkerung aus mit 6 Prozent. Trotz dieses geringen Anteils legt die Cluster-Analyse nahe, diese Gruppe als separaten Typ zu betrachten, da sich dieser deutlich von den anderen beiden Typen abgrenzt.

Um vertieft zu analysieren, wie sich die Typen unterscheiden, können sie anhand der Antworten zu weiteren Fragen in der Befragung verglichen werden. In Tabelle 4 sind weitere Vergleiche zum Online-Einkaufsverhalten aufgeführt, konkret dazu, welche Zusatzleistungen im Online-Handel wie häufig verwendet werden. Es zeigt sich, dass die am häufigsten bestellte Warengruppe bei allen Käufertypen die Bekleidung ist. Zusatzleistungen werden sehr unterschiedlich genutzt. Während bei der Gruppe der Abwäger/-innen und Online-Power-Einkäufer/-innen viele Zusatzleistungen, wie das Bestimmen des Liefertermins, schon genutzt werden, verwendet etwa die Hälfte der Traditionalisten/-innen (45%) keine Zusatzleistungen.

Tabelle 4: Einkaufsverhalten und Einstellungen der drei Typen von Konsumenten/-innen (Variablen, die in die Cluster-Analyse einbezogen wurden)

	Abwäger/-innen (n = 233)	Traditionalisten/-innen (n = 403)	Online-Power-Einkäufer/-innen (n = 43)	Total
Ausgaben im Vergleich letzte 30 Tage				
Median	ungefähr gleich viel	deutlich weniger online	etwas mehr online	etwas weniger online
Häufigkeit letzte 30 Tage				
Mittelwert	5-mal	2-mal	13-mal	4-mal
Ausgaben (Total)				
bis 500 CHF	58%	95%	34%	78%
Faktor 1: Kostenoptimierung				
Mittelwert	0.4	-0.21	0.23	0.03



	Abwäger/-innen (n = 233)	Traditionalisten/-innen (n = 403)	Online-Power-Einkäufer/-innen (n = 43)	Total
Faktor 2: Kontakt und Vertrauen				
Mittelwert	-0.22	+0.14	-0.36	-0.01

Legende: Gewichtete Auszählungen und zentrale Messwerte zu Konsumententscheidungen nach Konsumtyp. Durch die Gewichtung können Rundungsdifferenzen erfolgen.

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.

Tabelle 5: Einkaufsverhalten der drei Typen von Konsumenten/-innen

	Abwäger/-innen (n = 233)	Traditionalisten/-innen (n = 403)	Online-Power-Einkäufer/-innen (n = 43)	Total
Meistbestellte Warengruppe				
Drei häufigste Nennung	Bekleidung (28%), Unterhaltungselektronik (11,8%) und Lebensmittel und Alkohol (11,5%)	Bekleidung (25,9%), Haushaltswaren und -geräte (10,9%) und Bücher (10,5%)	Bekleidung (33%), Unterhaltungselektronik (18,8%) und Lebensmittel und Alkohol (16,6%)	Bekleidung (29,2%), Unterhaltungselektronik (11,8%) und Haushaltswaren und -geräte (11,6%)
Zusatzleistungen gebraucht, Top 3 insgesamt (%), Mehrfachnennungen möglich				
(kostenlose) Rücksendemöglichkeit	43,4%	28,1%	66,3%	35,7%
Alternative Zustellform	23,4%	18,7%	15,6%	20,1%
Bestimmung Liefertermin	24%	11,2%	27,8%	16,6%
keine genutzt	24,6%	45,3%	19,2%	36,7%

Legende: Gewichtete Auszählungen und zentrale Messwerte zu Konsumententscheidungen nach Konsumtyp. * = gekennzeichnete Variablen wurden in die Cluster-Analyse miteinbezogen. Durch die Gewichtung können Rundungsdifferenzen erfolgen.

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.



Neben den bereits besprochenen Variablen zeigt die Tabelle 5 zudem, dass Bekleidung sowohl insgesamt als auch bei allen Typen die meistbestellte Warengruppe ist.

In Abbildung 3 ist ersichtlich, wie häufig Personen der unterschiedlichen Typen in den letzten 30 Tagen Produkte online bestellt haben.

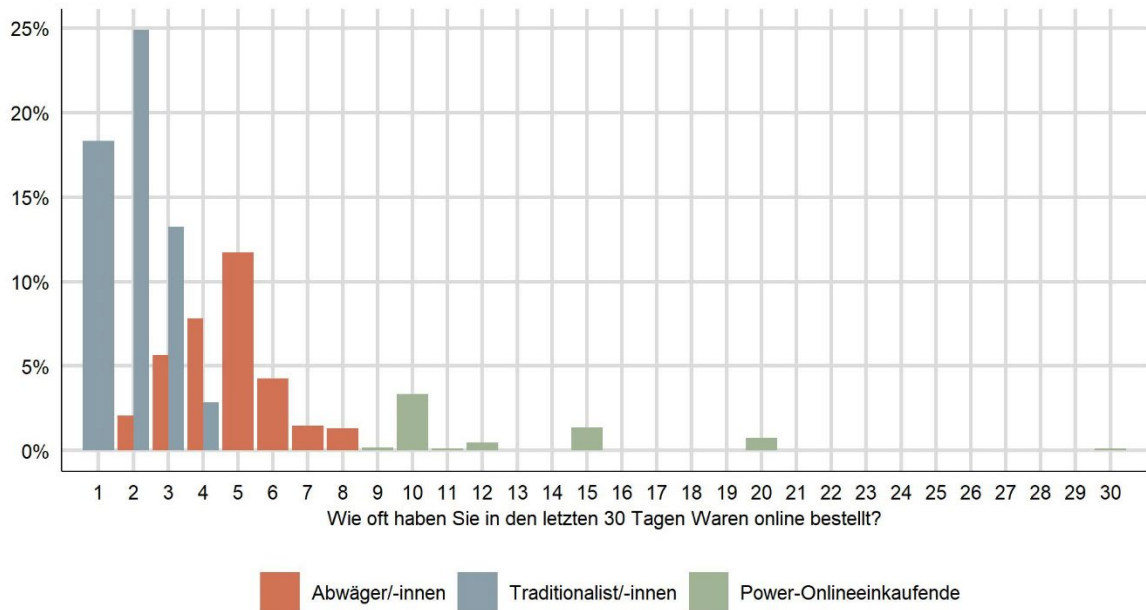


Abbildung 3: Häufigkeit von Online-Bestellungen

Legende: Häufigkeit Online-Bestellungen in den letzten 30 Tagen nach Konsumtyp (Abwäger/-innen: n = 233, Traditionalisten/-innen: n = 403, Online-Power-Einkäufer/-innen: n = 43).

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.

Die folgende Tabelle 6 gibt einen Überblick über verschiedene soziodemografische Charakteristika der drei Typen von Konsumenten/-innen. Es ist ersichtlich, dass der Anteil Männer bei den Online-Power-Einkäufer/-innen höher ist als in den anderen zwei Typen. Jedoch ist der Unterschied mit 5 Prozentpunkten nicht sehr gross. Des Weiteren zeigt die Tabelle, dass der Typ der Traditionalisten/-innen durchschnittlich am ältesten und jener der Online-Power-Einkäufer/-innen am jüngsten ist. Der Online-Handel wird also von jungen Personen häufiger genutzt. Online-Power-Einkäufer/-innen wohnen im Vergleich zu Personen der anderen Typen häufiger in einer Agglomeration ohne Kernstadt und nicht auf dem Land oder in der Stadt. Hinsichtlich der höchsten abgeschlossenen Bildung, dem Bruttohaushaltseinkommen und der Wohnsituation lassen sich im Durchschnitt keine Unterschiede zwischen den Typen erkennen.



Tabelle 6: Soziodemografische Merkmale der Konsumtypen

	Abwäger/ -innen (n = 233)	Traditionalis- ten/-innen (n = 403)	Online-Power- Einkäufer/ -innen (n = 43)	Total
Geschlecht				
weiblich	115 (50%)	211 (52,4%)	20 (46,3%)	346 (51%)
männlich	117 (49,5%)	191 (47,3%)	23 (53,7%)	331 (48,7%)
anderes	1 (0,5%)	1 (0,3%)		2 (0,3%)
Altersgruppe				
18–34 Jahre	80 (34,3%)	77 (19,2%)	17 (39,9%)	174 (25,7%)
35–54 Jahre	82 (35,1%)	140 (34,7%)	16 (36,7%)	237 (34,9%)
55+ Jahre	71 (30,6%)	186 (46,1%)	10 (23,4%)	267 (39,3%)
Wohnumgebung				
ländlich	38 (16,3%)	72 (17,8%)	7 (15,4%)	116 (17,1%)
Agglomeration ohne Kern- stadt	58 (24,9%)	86 (21,5%)	14 (33,1%)	159 (23,4%)
städtisch	137 (58,9%)	245 (60,8%)	22 (51,5%)	404 (59,5%)
Monatliches Brutto-Haus- haltseinkommen				
Anteil der Personen die über der Median-Einkom- menskategorien liegen (über 12'000 Franken)	55 (27%)	62 (18,3%)	13 (30,9%)	130 (22,2%)
Höchste abgeschlossene Ausbildung				
Anteil der Personen mit akademischem Abschluss	90 (39,1%)	169 (42,2%)	14 (31,6%)	273 (40,5%)
Haushaltsgrösse				
Median	2 Personen	2 Personen	2 Personen	2 Personen

Legende: Gewichtete Auszählungen und zentrale Messwerte nach Konsumtyp. Durch die Gewichtung können Rundungsdifferenzen erfolgen.

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.

Vergleicht man die Verfügbarkeit von Mobilitätswerkzeugen, so ist auffällig, dass die Online-Power-Einkäufer/-innen häufiger als Personen der beiden anderen Typen über ein GA (32,7%) oder ein anderes ÖV-Abo (54,2%) verfügen. Das am häufigsten verfügbare Mobilitätswerkzeug ist über alle Typen hinweg das Auto, das auch über alle drei Typen hinweg bei 87 Prozent der Haushalte verfügbar ist.



Tabelle 7: Mobilitätswerkzeuge nach Konsumtyp

	Abwäger/ -innen (n = 233)	Traditionalisten/ -innen (n = 403)	Online-Power- Einkäufer/-innen (n = 43)	Total
Mobilitätswerkzeuge/ Mobilitätsabos im Haushalt, Top 5 (%)				
Auto	89,4%	86,4%	80,2%	87%
Velo/E-Bike	62,2%	72,6%	60,7%	68,2%
Andere Abos ÖV	50,8%	51,1%	54,2%	51,1%
General-Abo (GA)	19,5%	18,1%	32,7%	19,5%
Motorrad	16,4%	20,7%	19,2%	19,1%

Legende: Gewichtete Auszählungen nach Konsumtyp.

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.

Tabelle 8 und Abbildung 4 zeigen die Unterschiede zwischen den Typen hinsichtlich des Umweltbewusstseins auf. Der Anteil Personen, denen umweltbewusstes Konsumverhalten oder der Kauf regionaler Produkte wichtig ist, ist bei den Typen der Abwäger/-innen und Traditionalisten/-innen etwas höher als bei den Online-Power-Einkäufer/-innen. 14 Prozent aller Online-Power-Einkäufer/-innen gaben an, oft Spontaneinkäufe zu tätigen, bei den Abwäger/-innen waren es nur rund 7 Prozent und bei den Traditionalisten/-innen 2 Prozent. Ob Online-Einkaufen mit einem geringeren Umweltbewusstsein zusammenhängt, kann mit dieser Tabelle noch nicht abschliessend geklärt werden, die Unterschiede sind dafür zu klein. Jedoch lassen sich gewisse Tendenzen erkennen.



Tabelle 8: Umweltbewusstsein nach Konsumtyp

	Abwäger/ -innen (n = 233)	Traditionalisten/ -innen (n = 403)	Online-Power- Einkäufer/ -innen (n = 43)	Total
Wie wichtig sind Ihnen folgende Aspekte? (wichtig und sehr wichtig zusammengefasst in %)				
Umweltbewusstes Konsumverhalten	91,4%	91,6%	87,7%	91,3%
Regionale Produkte	92,1%	92,2%	75,9%	91,1%
Umweltschutz generell	90,9%	92,2%	89,9%	91,6%
Verzicht auf nicht regionale Produkte				
Ja (in %)	82,6%	84,9%	78,9%	83,7%
Häufigkeit Spontankäufe				
Oft (in %)	6,9%	2%	14%	4,4%

Legende: Gewichtete Auszählungen nach Konsumtyp. Durch die Gewichtung können Rundungsdifferenzen erfolgen.

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.

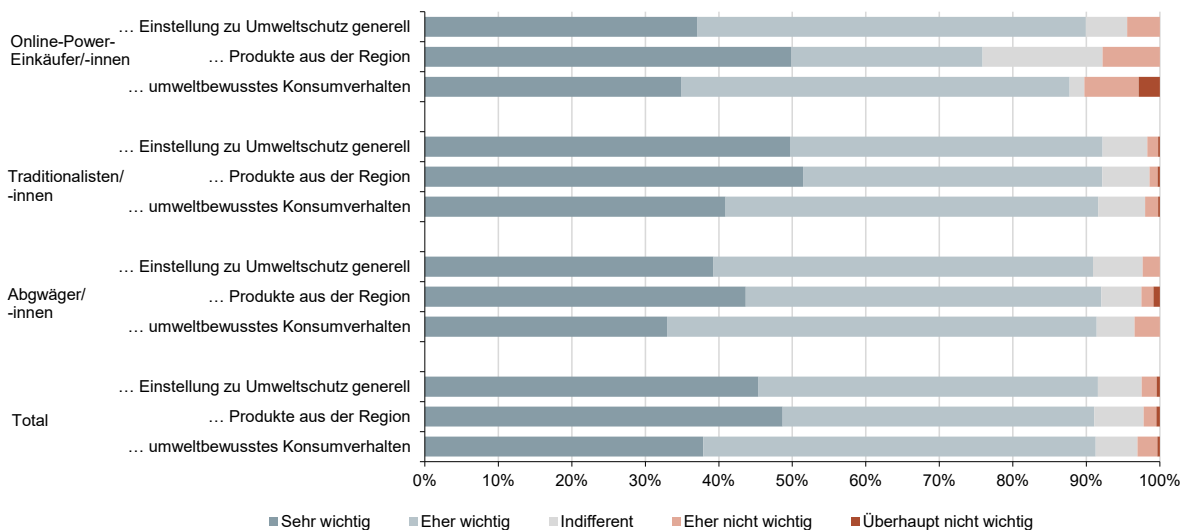


Abbildung 4: Umweltbewusstsein nach Konsumtyp

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.



2.1.3 Fazit zu den Typen

Die Cluster-Analyse legt eine Einteilung der Bevölkerung in drei Typen von Konsumenten/-innen nahe. Ein immer noch beträchtlicher Anteil von 60 Prozent lässt sich den Traditionalisten/-innen zuordnen. Personen dieses Typs kaufen immer noch häufiger vor Ort als online ein, da sie anders als die anderen beiden Typen den Online-Handel hinsichtlich Ersparnis an Zeit und Kosten nicht positiver beurteilen und den Kontakt und die Vertrauensbasis in Zusammenhang mit dem Einkaufen vor Ort schätzen. Rund ein Drittel (34%) kann als Abwäger/-innen bezeichnet werden: Je nach Einschätzung von Kosten und Nutzen wird in einem Fall der Einkauf vor Ort und in einem anderen Fall der Online-Handel bevorzugt. Schliesslich lassen sich 6 Prozent als Online-Power-Einkäufer/-innen bezeichnen, die häufiger online als vor Ort einkaufen.

In soziodemografischer Hinsicht lassen sich gewisse Tendenzen erkennen: Der Anteil Männer ist bei den Online-Power-Einkäufern/-innen etwas höher und jüngere Personen sind im Vergleich zu den anderen Typen bei den Traditionalisten/-innen weniger stark vertreten. Es lassen sich jedoch keine eindeutigen sozialen Milieus erkennen, entlang der sich die drei Typen von Konsumenten/-innen einteilen lassen. Viel eher sind alle drei Typen in sich hinsichtlich soziodemografischer und sozioökonomischer Variablen heterogen. Die Homogenität innerhalb der Typen (resp. die Heterogenität zwischen den Typen) ist auf Einstellungen und Verhalten im Bereich des Online-Handels zurückzuführen. Dies legt den Schluss nahe, dass Einstellungen und Verhalten im Bereich Online-Handel auf subjektive Werthaltungen zurückzuführen sind und weniger auf soziale oder ökonomische Rahmenbedingungen.

2.2 Discrete-Choice-Experimente

Wie in Abschnitt 6.2.1 im Anhang beschrieben, wurden drei Discrete-Choice-Experimente (DCE) durchgeführt zu den Produkten Birne, Kleiderschrank und Gusseisenpfanne. Die Produkte unterscheiden sich nicht nach Preis oder Aussehen, sondern anhand bestimmter Produktinformationen. Damit konnte der Effekt von Produktinformationen isoliert untersucht werden unter Ausschluss von möglichen Effekten der Drittvariablen Preis und Aussehen. Tabelle 9 zeigt auf, welche Produktinformationen pro Experiment gezeigt wurden. Die ersten drei Produktinformationen wurden bei allen Produkten angezeigt und jeweils mit zwei produktspezifischen Informationen ergänzt. Die Produkte erhielten jeweils die Wertung «B» oder «D» auf einer Skala von A bis E zu den Produktinformationen.

Tabelle 9: Zur Verfügung gestellte Produktinformationen pro Experiment

Produktinformationen	Experiment 1: Birne	Experiment 2: Gusseisenpfanne	Experiment 3: Kleiderschrank
Hohe Treibhausgasemissionen beim Transport	X	X	X
Weit zurückgelegte Distanz vom Herstellungsort bis zum Konsumenten/zur Konsumentin	X	X	X
Hoher Energieverbrauch beim Transport	X	X	X
Hohe Grundwasserbelastung aufgrund Einsatz von Düngemittel oder Pestiziden in der Herstellung	X		
Hoher Energieverbrauch durch Lagerung und Kühlung	X		



Produktinformationen	Experiment 1: Birne	Experiment 2: Gusseisenpfanne	Experiment 3: Kleiderschrank
Hohe Feinstaubemissionen in der Herstellung		X	
Keine umweltfreundliche Entsorgung (Rezyklierbarkeit)		X	
Verwendung exotischer (anstatt lokaler) Hölzer			X
Oberflächenbehandlung mit wasser-gefährdenden Chemikalien oder Farbstoffen			X

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.

2.2.1 Ergebnisse Experiment 1: Birne

Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse des DCE für das Produkt Birne. Aufgeführt ist die relative Wichtigkeit der Produktinformationen. Die Werte sind den jeweils fünf Regressionsanalysen entnommen (vgl. Abbildung 38 im Anhang). Wie ausführlicher in Abschnitt 6.2.1 im Anhang beschrieben, wurden jeweils die Mittelwerte der Regressionskoeffizienten pro Kategorie (Produktinformation) genommen. Danach wurde der tiefste Regressionskoeffizient bei den anderen Produktinformationen aufsummiert, sodass der tiefste Regressionskoeffizient neu dem Null-Punkt entspricht. Dies vereinfacht die Interpretation und das Erkennen der relativen Wichtigkeit einzelner Eigenschaften.

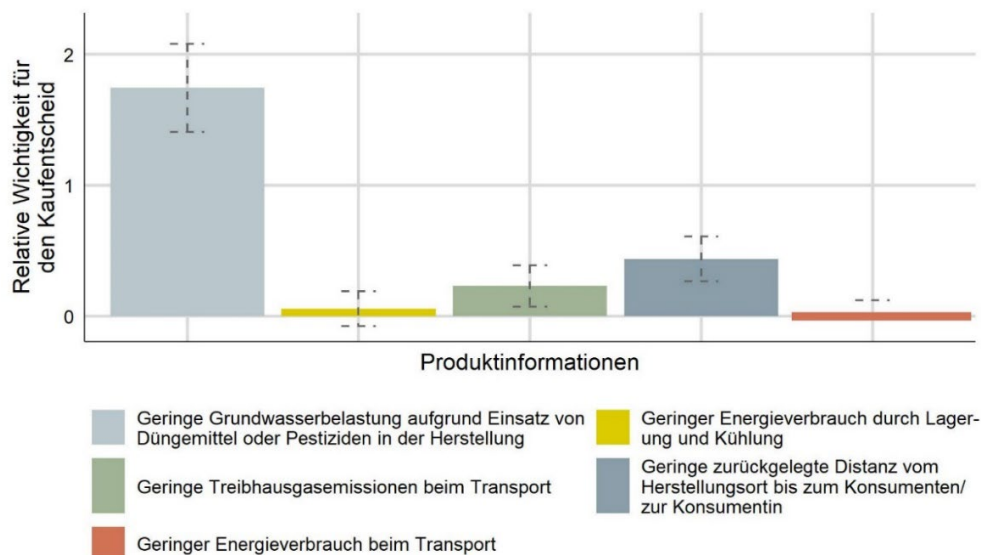


Abbildung 5: Discrete-Choice-Experiment Birne

Legende: Mittelwerte der Regressionskoeffizienten pro Produktinformation. Hinweis: Der tiefste Regressionskoeffizient wurde auf null gesetzt. Vgl. Erläuterungen in Abschnitt 6.2.1 für Herleitung der Abbildung.

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.



Der Abbildung 5 kann entnommen werden, dass die bedeutendste Produktinformation für den Kauf einer Birne, die Information über die Grundwasserbelastung aufgrund des Einsatzes von Düngemittel oder Pestiziden in der Herstellung ist. Die zweitbedeutendste Information ist die zurückgelegte Distanz vom Herstellungsort bis zum Konsumenten/ zur Konsumentin. Relativ gesehen weniger relevant sind die Informationen über den Energieverbrauch der Lagerung und Kühlung sowie die durch den Transport verursachten Treibhausgasemissionen. Im Vergleich zu den anderen Produktinformationen ist die Information über den Energieverbrauch beim Transport am wenigsten bedeutend.

2.2.2 Ergebnisse Experiment 2: Kleiderschrank

Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse des DCE für das Produkt Kleiderschrank.

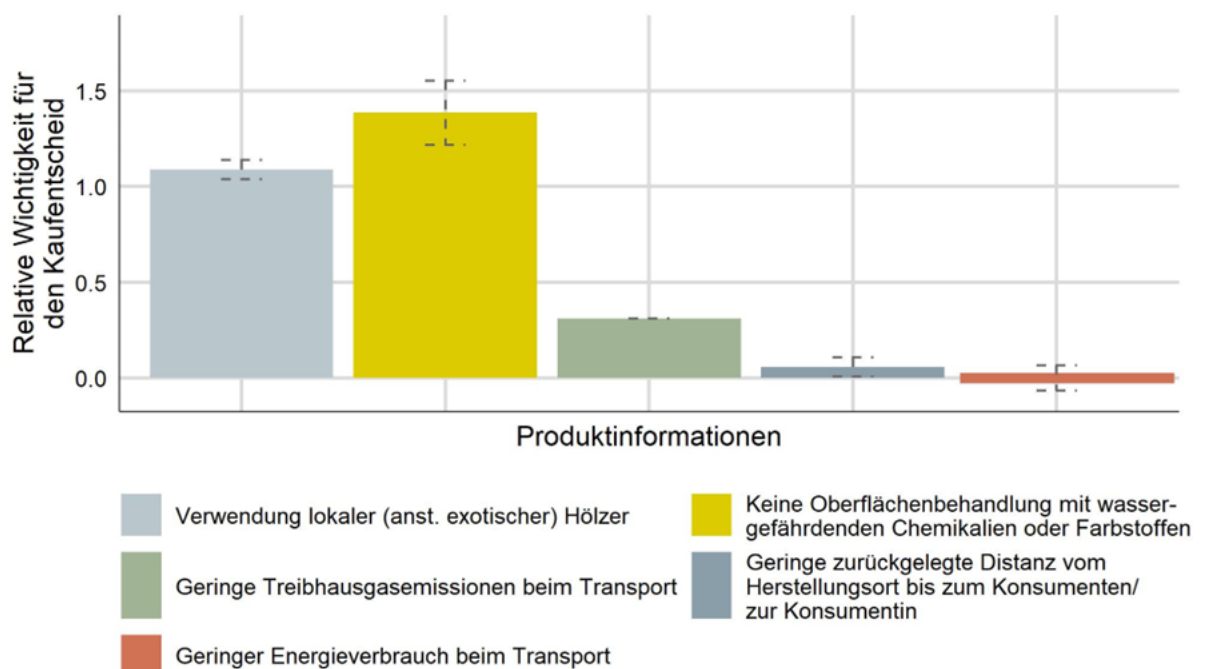


Abbildung 6: Discrete-Choice-Experiment Kleiderschrank

Legende: Mittelwerte der Regressionskoeffizienten pro Produktinformation. Hinweis: Der tiefste Regressionskoeffizient wurde auf null gesetzt. Vgl. Erläuterungen in Abschnitt 6.2.1 für Herleitung der Abbildung.

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.

Die Information, dass keine wassergefährdenden Chemikalien oder Farbstoffen zur Oberflächenbehandlung verwendet wurden, ist im Vergleich zu den anderen Produktinformationen am relevantesten, um sich für einen Kleiderschrank zu entscheiden. Relativ gesehen am zweitwichtigsten ist die Information, dass lokale anstatt exotischer Hölzer verwendet wurden. Im Vergleich weniger wichtig für die Kaufentscheidung sind die Informationen über die verursachten Treibhausgasemissionen beim Transport, die zurückgelegte Distanz vom Herstellungsort bis zum Konsumenten/zur Konsumentin und der Energieverbrauch beim Transport. Die letzte Information ist die am wenigsten wichtige Produktinformationen für den Kauf eines Kleiderschranks.



2.2.3 Ergebnisse Experiment 3: Gusseisenpfanne

Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse des DCE für das Produkt Gusseisenpfanne.

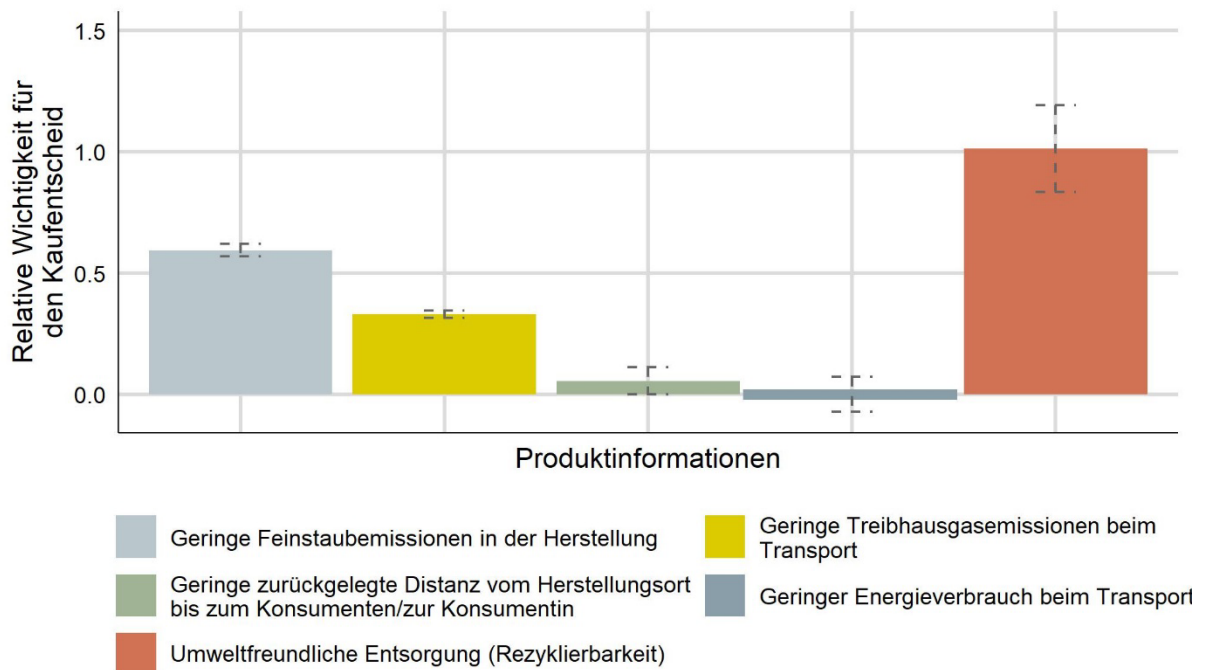


Abbildung 7: Discrete-Choice-Experiment Gusseisenpfanne

Legende: Mittelwerte der Regressionskoeffizienten pro Produktinformation. Hinweis: Der tiefste Regressionskoeffizient wurde auf null gesetzt. Vgl. Erläuterungen in Abschnitt 6.2.1 für Herleitung der Abbildung.

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.

Betrachtet man die Ergebnisse des DCE zur Gusseisenpfanne, wird ersichtlich, dass die Information zur umweltfreundlichen Entsorgung am kaufrelevantesten ist. Relativ gesehen ebenfalls bedeutend für den Kauf sind geringe Feinstaubemissionen in der Herstellung. Relativ unbedeutend sind die Informationen über die geringen Treibhausgasemissionen beim Transport, die zurückgelegte Distanz vom Herstellungsort bis zum Konsumenten/zur Konsumentin sowie ein geringer Energieverbrauch beim Transport. Hier ist auch wieder die Produktinformationen zum Energieverbrauch beim Transport die relativ gesehen unbedeutendste Produktinformation für den Kauf einer Gusseisenpfanne.



2.2.4 Zusammenfassung und Fazit

Abbildung 8 zeigt die Ergebnisse der DCE im Überblick. Es zeigt sich, dass es stark vom Produkt abhängt, welche Produktinformation wie wichtig ist. Über alle drei Produkte hinweg fallen jedoch die folgenden Punkte auf:

- Produktinformationen mit Bezug zur persönlichen Gesundheit sind überdurchschnittlich relevant. So scheint es den Konsumenten/-innen besonders wichtig zu sein, dass Produkte frei von bestimmten Chemikalien oder Pestiziden sind.
- Umweltargumente können aber auch losgelöst von Überlegungen zur persönlichen Gesundheit eine Rolle spielen, wie das Beispiel der Rezyklierbarkeit von Pfannen zeigt.
- Produktinformationen zum Transport spielen bei den Befragten eine vergleichsweise geringe Bedeutung beim Kaufentscheid. Interessant ist dabei jedoch, dass Informationen zu Treibhausgasmissionen beim Transport als sehr viel wichtiger beurteilt werden als die Informationen zum Energieverbrauch beim Transport, obwohl dieser Unterschied ja in erster Linie semantisch ist. Dies deutet darauf hin, dass der Zusammenhang zwischen Klimaschutz und Energieverbrauch noch wenig im Bewusstsein der Käuferschaft verankert ist. (Die Umfrage wurde im Frühjahr 2022 durchgeführt, als die Frage des Energieverbrauchs noch weniger weit oben auf der politischen Agenda stand, als dies heute der Fall ist.)
- Insgesamt scheinen spezifische, auf die Eigenschaften der jeweiligen Produkte ausgerichtete Informationen einen grösseren Einfluss auf den Kaufentscheid zu haben als generelle, eher abstrakte Informationen.

Wie lässt sich der Befund erklären, dass Produktinformationen in Zusammenhang mit Transport und Logistik heute eine vergleichsweise geringe Relevanz beim Kauf haben? Folgende Erklärungsansätze können vorgebracht werden:

Erstens bestätigen die Befunde eine dieser Forschungsarbeit zugrunde liegende Hypothese, wonach das Bewusstsein für die zumindest fallweise sehr grosse Bedeutung von Transport und Logistik für die Beurteilung der Nachhaltigkeit eines Produkts heute bei der Käuferschaft noch vergleichsweise gering ist, und deshalb dieser Aspekt als nicht besonders wichtig beurteilt wird. Dieses Bewusstsein könnte mit gezielten Information- und Kommunikationsmassnahmen beeinflusst werden. Das im Rahmen des Projekts entwickelte Emissionsmodell könnte dabei nützlich sein.

Es könnte jedoch zweitens auch die These aufgestellt werden, dass Transport und Logistik als gegebene Prozessschritte in der Historie eines Produkts betrachtet werden, bei denen wenig Handlungsspielraum gesehen wird, weil die lokale Produktion als preislich nicht konkurrenzfähig wahrgenommen wird. Dies dürfte jedoch nicht in jedem Fall den Tatsachen entsprechen – produktorientierte Informationen könnten hier ein differenzierteres Verständnis ermöglichen.

Drittens dürfte der eher hohe Abstraktionsgrad der Produktinformationen eine Rolle spielen. Interessant ist die Feststellung, dass die Produktinformation «Verwendung lokaler – anstatt exotischer, oft mit der Abholzung wertvoller Regenwälder verbundene – Hölzer» eine hohe Relevanz aufweist. Eine Information, die zwar spezifisch für ein Produkt (hier Kleiderschrank) aufgeführt wird, aber sich im Grundsatz auch auf den Transport bezieht.

Viertens handelt es sich bei den für die Käuferschaft relevantesten Kriterien um Themen, die seit Jahrzehnten im Umweltdiskurs eine wichtige Rolle spielen und daher inzwischen gut im Bewusstsein der Bevölkerung verankert sind. Demgegenüber schien die Energiefrage lange Zeit zweitrangig; die jüngste Vergangenheit könnte diese Wahrnehmung nachhaltig verändern.

In einer Gesamtschau und unter Berücksichtigung der Ergebnisse in den Fallstudien zum Emissionsmodell kommen wir zum Schluss, dass Informationen über die klima- und energiepolitische Relevanz



von Transportprozessen in geeigneter Form eine wichtige Ergänzung konsumentenbezogener Kommunikation bilden könnten. Und dies gilt unseres Erachtens nicht nur für den Online-Handel. Den Befragten wurde zwar vorgegeben, dass sie sich eine Situation vorstellen sollen, in der sie die Produkte online kaufen. Es gibt jedoch keinen offensichtlichen Grund, dass sich die hier vorliegenden Erkenntnisse nur auf den Online-Handel beschränken. Die Relevanz der Produktinformationen dürfte beim Einkaufen vor Ort dieselbe sein.

Für die Effekte auf reale Kaufentscheide gilt es jedoch abschliessend nochmals darauf hinzuweisen, dass die Preise im DCE bewusst konstant gehalten wurden, was selbstverständlich nicht der Realität entspricht. Mit Sicherheit gibt es Zielgruppen, die ausschliesslich auf den Preis achten und deshalb schwer zu erreichen sind. Die im Abschnitt 1.1.1 zitierte Literatur bestätigt, dass der Preis nach wie vor das wichtigste Kaufkriterium ist.

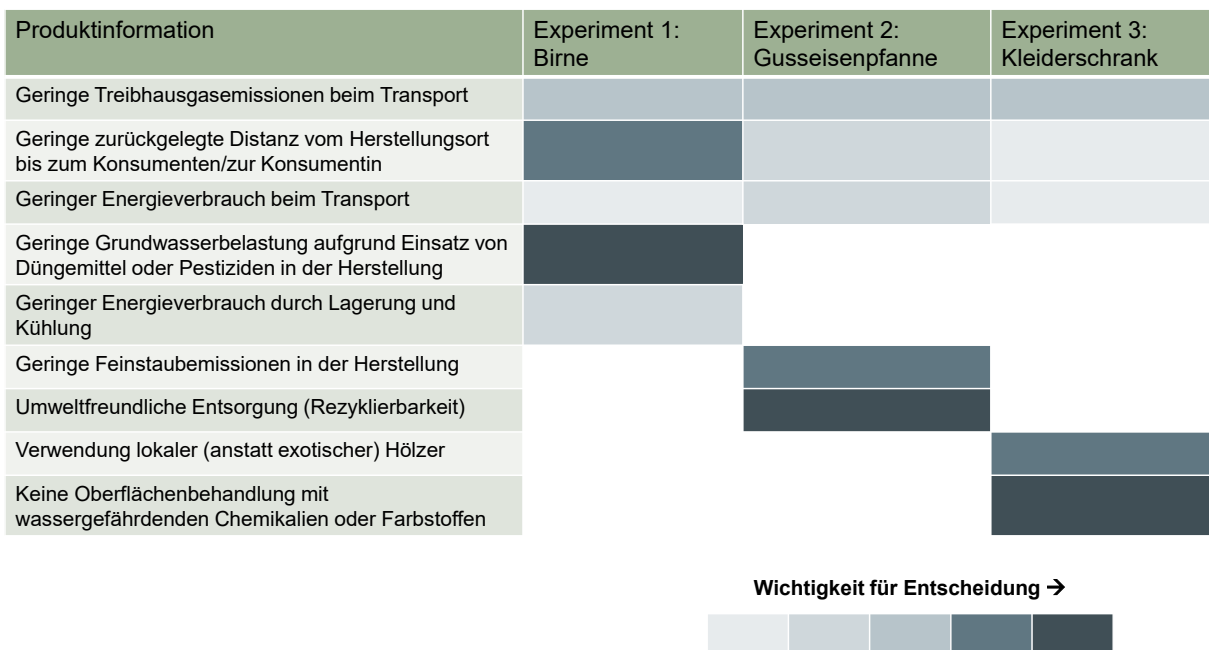


Abbildung 8: Übersicht über die Ergebnisse der Discrete-Choice-Experimente

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.



3 Ergebnisse Modellierung Schätzmodell

Dieses Kapitel präsentiert die Ergebnisse der Modellierung der Logistikemissionen, das methodisch in Abschnitt 6.1 im Anhang eingeführt wird. Dieses Modell wird mithilfe dreier Fallstudien im folgenden Abschnitt 3.1 nun umfangreich auf Praktikabilität getestet. Es sollen explizit auch Schwächen des Modells aufgezeigt werden, um Anhaltspunkte für eine spätere Verbesserung des Modells zu erhalten. Gleichzeitig dient die Auswertung der Fallstudien an dieser Stelle dazu, die Fähigkeiten des Modells zu demonstrieren und beispielhaft aufzuzeigen, welche Schlüsse sich daraus ziehen lassen. Daraufhin wird in Abschnitt 3.2 das Modell ausführlich mit seinen Stärken und Schwächen diskutiert. In Abschnitt 3.3 werden ein Fazit zur Modellierung gezogen und Empfehlungen für weitere Bearbeitungsschritte gegeben.

3.1 Fallstudien

In diesem Abschnitt werden die Resultate des Schätzmodells für drei Fallstudien dargelegt. Zuerst werden die Logistikemissionen der Beschaffung von Birnen (vgl. Abschnitt 3.1.1) und Rasenmähern (vgl. Abschnitt 3.1.2) in die Schweiz mithilfe des Modells geschätzt und anschliessend analysiert. Diese Produkte wurden aufgrund ihrer Repräsentativität ausgewählt. Die Birne ist als Obst gleichzeitig Agrar- und Konsumgut, zudem wird sie in der Schweiz selbst angebaut, jedoch auch aus Europa und Übersee importiert. Rasenmäher dienen als Beispiel für ein technisches Produkt, das zudem an verschiedenen Orten auf der Welt produziert wird und sich daher gut für den Vergleich verschiedener Transportwege von unterschiedlichen Kontinenten eignet.¹

Für beide Produkte werden vier Herkunftsorte definiert, die realen Produktionsorten der beiden Güter entsprechen. Aufgrund unserer reinen Schätzung von Emissionen mit einem Modell in frühem Stadium verzichten wir hier jedoch darauf, Emissionen einem Unternehmen zuzuordnen. Für die Birnen sind die untersuchten Ursprungsorte Südafrika (Wolseley), Italien (Reggio Emilia), Belgien (Limburg) und der Kanton Thurgau in der Schweiz (Mammern). Rasenmäher werden aus Deutschland (Gummersbach), den USA (Horicon, Wisconsin und Milwaukee, Oregon) und China (Shanghai) importiert. Als Zielort in der Schweiz dient Luzern als Beispiel. Für beide Produkte wird nur der Transport des fertigen Produkts betrachtet, für die Birne also nur der Transport der essreifen Frucht, nicht der Transport von beispielsweise Wasser oder Setzlingen. Für Rasenmäher wird nur der Transport des fertig montierten und funktionsfähigen Produkts, nicht der Transport von Einzelteilen wie Gummi, Metallen oder Schrauben betrachtet.

In einer dritten Fallstudie soll die gesamte, wenn auch leicht vereinfachte Liefer- und Produktionskette dargestellt werden. Dazu wird die Fertigung einer Bratpfanne untersucht, eine Lieferkette nachmodelliert und Logistikemissionen geschätzt (vgl. Abschnitt 3.1.3).

Zusätzlich gilt, dass in den Fallstudien nur Transportemissionen betrachtet werden. Zwar ist eine Berücksichtigung der Lagerung im Modell vorbereitet, wird jedoch hier noch nicht angewendet. Besonders im Fall der Birne kann die (saisonale) Lagerung für hohe zusätzliche Emissionen sorgen, die aber nicht im Kern des Transportmodells sind und deshalb für die zugehörige Fallstudie nicht im Detail berechnet worden sind. Auch bei der Herstellung von Rasenmähern und Bratpfannen entstehen bei der Fertigung der Komponenten aus den Ausgangsstoffen und der Montage des Produktes Emissionen, die im Folgenden nicht berücksichtigt werden. Auch eine Nutzung von recycelten Produkten wird nicht betrachtet, liesse sich aber leicht in das Transportmodell integrieren. Alle im Folgenden präsentierten Werte sind wie in Abschnitt 6.1.6 beschrieben gewichtet.

¹ Während der Entwicklung des Modells wurde auch das Fallbeispiel eines Smartphones zur Modellkalibrierung genutzt. Wir verzichten hier aus Platzgründen auf die Darstellung der Ergebnisse.



Bereits an dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, dass einzelne vom Modell generierte Logistikkarten und Transportwege eher unrealistisch sind. Die Ergebnisse des Modells sind daher besonders bei den dargestellten Routen im Detail nicht immer realitätsnah, aggregiert gehen die Autoren jedoch von einer hohen Güte der Ergebnisse aus.

3.1.1 Fallstudie Birne

Erläuterung und Inputdaten

Für die Fallstudie der Birne werden vier verschiedene Herkunftsländer betrachtet: Südafrika, Italien, Belgien und die Schweiz (Kt. Thurgau). Die Verkehrsmittelaffinität ist gutspezifisch festgelegt und damit für alle vier Fallstudien gleich (vgl. Tabelle 10). Ebenfalls gilt für die Birne, dass sie nicht besonders schnell als Expressgut transportiert wird und sie kein Massengut ist. Bei allen Fallstudien wird davon ausgegangen, dass Quelle (Plantage) und Ziele (Supermarkt) nur über einen Strassenanschluss verfügen.

Tabelle 10: Verkehrsmittelaffinität Birne

Verkehrsmittel	Affinität
Flugzeug	0.3
Bahn	0.5
Schiff	0.8
LKW	1

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.

Die Birnen aus Südafrika kommen aus der Gegend um Wolseley, Südafrika. Wolseley ist eine kleine Stadt in der Region Western Cape im Süden des Landes, nahe von Kapstadt. Die Birnen werden über einen Überseetransport von etwa 9'000 km Luftlinie nach ihrem Export zur Zieladresse in Luzern transportiert. Der erwartete Durchlauf von Hubs für diesen Transport beträgt neun.

Die Birnen aus Italien stammen aus Reggio Emilia in Italien, einer Stadt zwischen Parma und Bologna in der Region Emilia-Romagna. Die Entfernung nach Luzern beträgt ungefähr 320 km (Luftlinie). Die Birnen werden damit aus Europa importiert. Der erwartete Durchlauf von Hubs für diesen Transport beträgt drei.

Die Birnen aus Belgien kommen aus Limburg, einer Provinz im Nordosten in Flandern an der Grenze zu den Niederlanden. Zwischen Export- und Importort liegen ungefähr 480 km Luftlinie. Die Birnen werden über einen Europatransport importiert. Der erwartete Durchlauf von Hubs für diesen Transport beträgt drei.

Die Birnen aus dem Kanton Thurgau stammen aus Mammern im Bezirk Frauenfeld. Die Entfernung von dort nach Luzern beträgt etwa 80 km Luftlinie. Es handelt sich um eine Binnenproduktion. Der erwartete Durchlauf von Hubs für diesen Transport beträgt drei.



Transportrouten



Abbildung 9: Mögliche Transportrouten für die Birne aus Südafrika in die Schweiz

Legende: Routen mit einem Gewichtungsfaktor kleiner als 0.01 werden nicht dargestellt. Je dunkler eine Route dargestellt wird, desto wahrscheinlicher ist sie. Je dicker, desto emissionsreicher. Sich überlagernde Routen sind ebenfalls an diesen Abschnitten dunkler dargestellt.

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.

Abbildung 9 zeigt die wahrscheinlichen Transportrouten für einen Import von Birnen aus Südafrika in die Schweiz. Das Modell gibt vermutlich richtig Transportwege mit einem Hauptlauf per Schiff nach Europa als am wahrscheinlichsten aus. Dabei wird die Route westlich um Westafrika herum häufiger gewählt als die Route durch den Suezkanal am Horn von Afrika vorbei, was vermutlich der Realität entspricht. In Europa werden verschiedene Häfen an der Nordsee, aber auch im Mittelmeer, angesteuert. Weitere Routen sind erkennbar, die teils auch unrealistische Segmente enthalten, diese sind jedoch auch eher wenig wahrscheinlich, was die Robustheit des Modells unterstreicht. Der Transport in Europa erfolgt dann auf diversen Wegen über Land und Rhein in die Schweiz. Flugrouten tauchen nicht auf, sie haben aufgrund ihrer hohen Kosten eine sehr geringe Wahrscheinlichkeit und werden in der Abbildung nicht dargestellt.

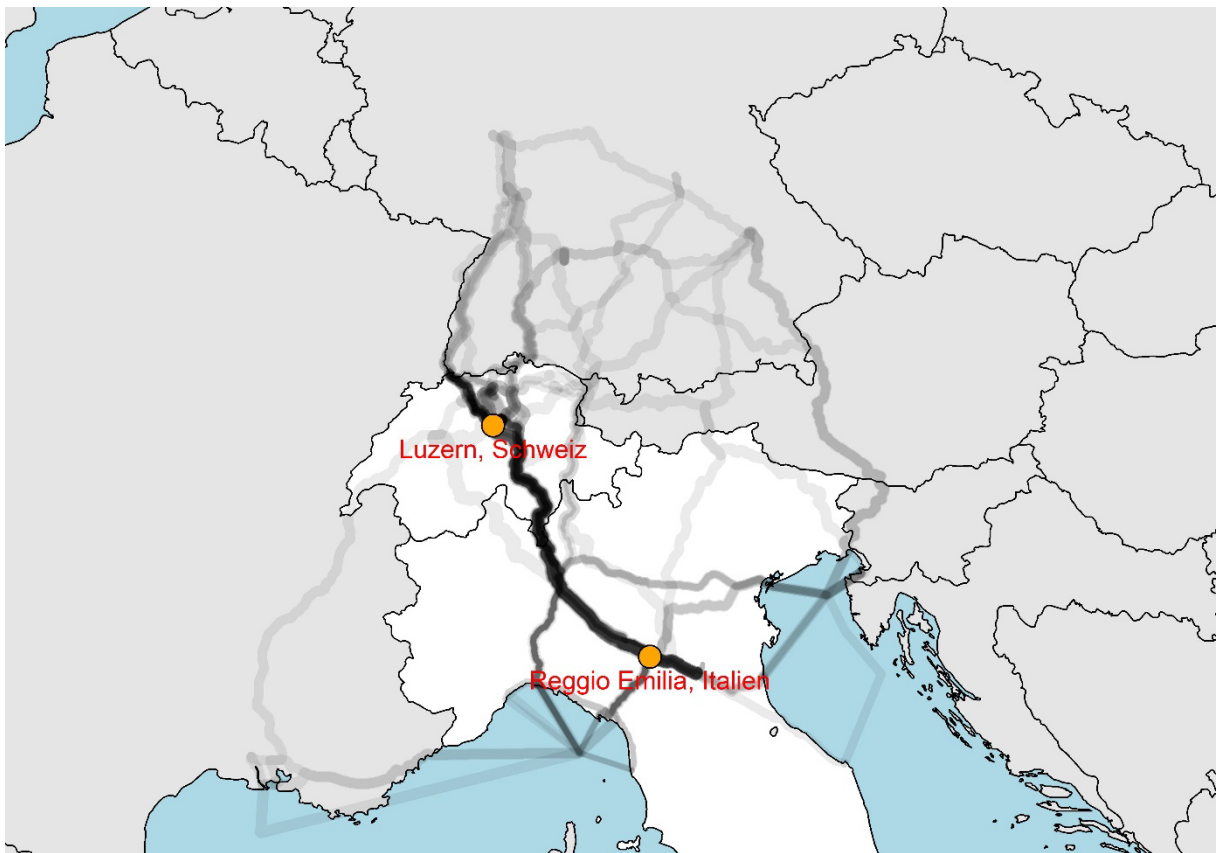


Abbildung 10: Mögliche Transportrouten für die Birne aus Italien in die Schweiz

Legende: Routen mit einem Gewichtungsfaktor kleiner als 0.01 werden nicht dargestellt. Je dunkler eine Route dargestellt wird, desto wahrscheinlicher ist sie. Je dicker, desto emissionsreicher. Sich überlagernde Routen sind ebenfalls an diesen Abschnitten dunkler dargestellt.

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.

Abbildung 10 zeigt die wahrscheinlichen Transportrouten für die Birnen aus Reggio Emilia nach Luzern. Die deutlich wahrscheinlichste Route in diesem Szenario führt auf dem Landweg über Mailand, das Tessin und den Gotthard nach Luzern. Unter Umständen werden die Birnen zuerst noch etwas weiter nach Südosten transportiert in die Region Bologna, bevor sie ihren Weg in die Schweiz antreten. Dies kann beispielsweise durch einen dort ansässigen Grosshändler ein realistisches Szenario sein. Zu beobachten ist zudem, dass diese Route auf der Strasse mehr Emissionen verursacht als andere Routen, die wesentlich weitere Umwege beinhalten. So finden sich beispielsweise emissionsärmere Routen mit dem Schiff über das Mittelmeer oder sogar über die Rhone, die jedoch eher unwahrscheinlich sind. Schliesslich gibt es einige Routen, die über Österreich und Deutschland ihren Weg in die Schweiz finden, manchmal wahrscheinlich auch verbunden mit einem Transport auf dem Rhein per Schiff. Diese Routen sind allerdings alle nicht sehr wahrscheinlich und auch eher emissionsintensiv. Dennoch haben auch solche Routen eine gewisse Wahrscheinlichkeit, falls Händler ihre Ware in Deutschland oder Österreich zwischenlagern oder kurzfristig Ware aus einem Lager von dort beziehen müssen, wenn andere Bezugsquellen nicht liefern können.



Abbildung 11: Mögliche Transportrouten für die Birne aus dem Kanton Thurgau in den Kanton Luzern

Legende: Routen mit einem Gewichtungsfaktor kleiner als 0.01 werden nicht dargestellt. Je dunkler eine Route dargestellt wird, desto wahrscheinlicher ist sie. Je dicker, desto emissionsreicher. Sich überlagernde Routen sind ebenfalls an diesen Abschnitten dunkler dargestellt.

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.

Abbildung 11 zeigt den Weg des Binnentransports von Birnen aus Mammern im Kanton Thurgau nach Luzern. Als wahrscheinlichste Route wird dabei vom Modell die direkte Route über Winterthur und Zürich per Lastwagen ausgegeben, die verhältnismässig emissionsreich ist. Als weniger emissionsreich und immer noch recht wahrscheinlich werden Routen über das Aargauer Mittelland ausgegeben. Dies, weil auf diesen Routen wahrscheinlich ein Teil der Strecke auf der Bahn zurückgelegt wird. Dies ist in Anbetracht der dort gelegenen Zentrallager einiger Detailhändler ebenfalls nicht unrealistisch. Wenige nicht sehr wahrscheinliche Routen sehen auch einen Zwischenstopp in Deutschland vor. Dies, weil wahrscheinlich ein bestimmter Umschlagplatz von der dem Modell zugrundeliegenden Logistikkette vorgegeben wird, die eingehalten werden muss.

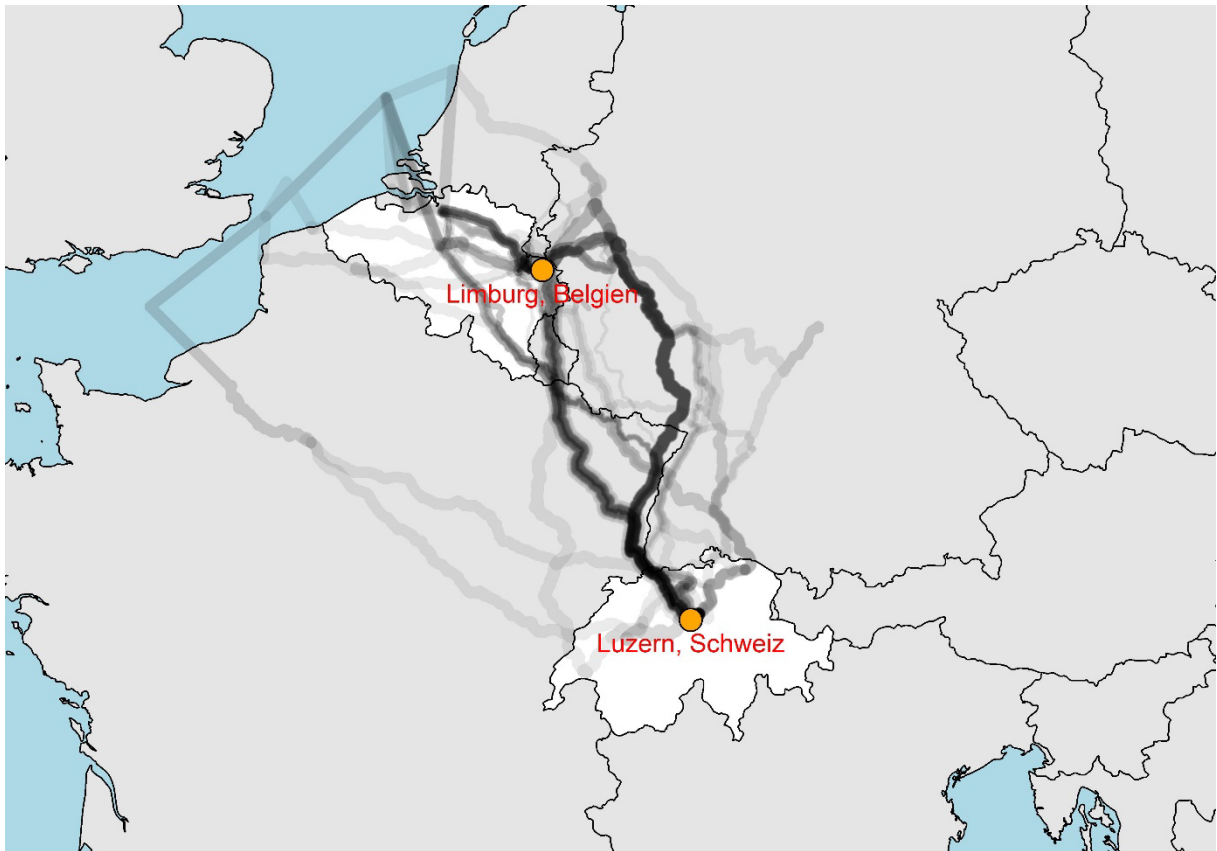


Abbildung 12: Mögliche Transportrouten für die Birne aus Belgien in die Schweiz

Legende: Routen mit einem Gewichtungsfaktor kleiner als 0.01 werden nicht dargestellt. Je dunkler eine Route dargestellt wird, desto wahrscheinlicher ist sie. Je dicker, desto emissionsreicher. Sich überlagernde Routen sind ebenfalls an diesen Abschnitten dunkler dargestellt.

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.

Abbildung 12 stellt die Transportrouten für Birnen aus Limburg in Belgien in die Schweiz dar. Die mit Abstand wahrscheinlichste Route sieht einen Transport per Lastwagen über Deutschland und Frankreich über Basel nach Luzern vor. Diese Route ist allerdings auch eher emissionsreich. Weitere Routen per Lastwagen und teilweise per Bahn nehmen verschiedene andere Wege durch Europa und unterscheiden sich in ihrer Emissionsintensität nur geringfügig. Wenige Routen führen per Schiff im Ärmelkanal über Umwege durch beispielsweise Frankreich in die Schweiz. Diese sind emissionsintensiv und auch in der Modellberechnung sehr unwahrscheinlich. In der Folge ist auch ihr Einfluss auf die gewichteten Emissionen des Transports gering.



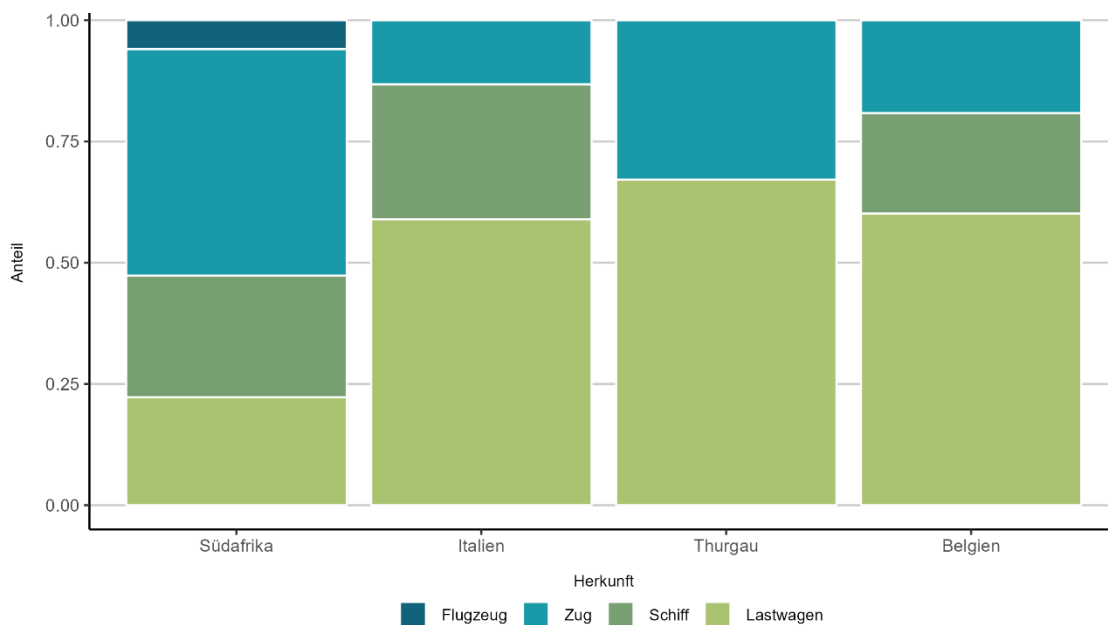
Emissionsberechnung

Tabelle 11: kg CO₂-eq-Emissionen pro Tonne transportierter Birnen und Standardabweichung für vier Herkunftsorte

Herkunft	kg CO ₂ -eq Emissionen pro t	Standardabweichung
Südafrika	2'231	5'529
Italien	115	107
Thurgau	21	15
Belgien	112	96

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.

In Tabelle 11 zeigt sich, dass die Emissionen insbesondere für Birnen aus Südafrika hoch sind. Sie sind rund um den Faktor 100 höher als für Birnen, die lokal im Kanton Thurgau geerntet und von dort nach Luzern transportiert werden. Auch im Vergleich mit Birnen aus Italien oder Belgien sind die Birnen aus dem Thurgau um den Faktor 5 bis 6 emissionsärmer. Allerdings sind für alle Herkunftsorte die Standardabweichungen gross. Dies deutet darauf hin, dass es grosse Unterschiede zwischen den Logistikketten und Transportwegen innerhalb eines Herkunftsortes gibt, die sich aus der Vielzahl an generierten Transportketten und -wegen des Modells mit stark unterschiedlichem Modal-Split ergibt.



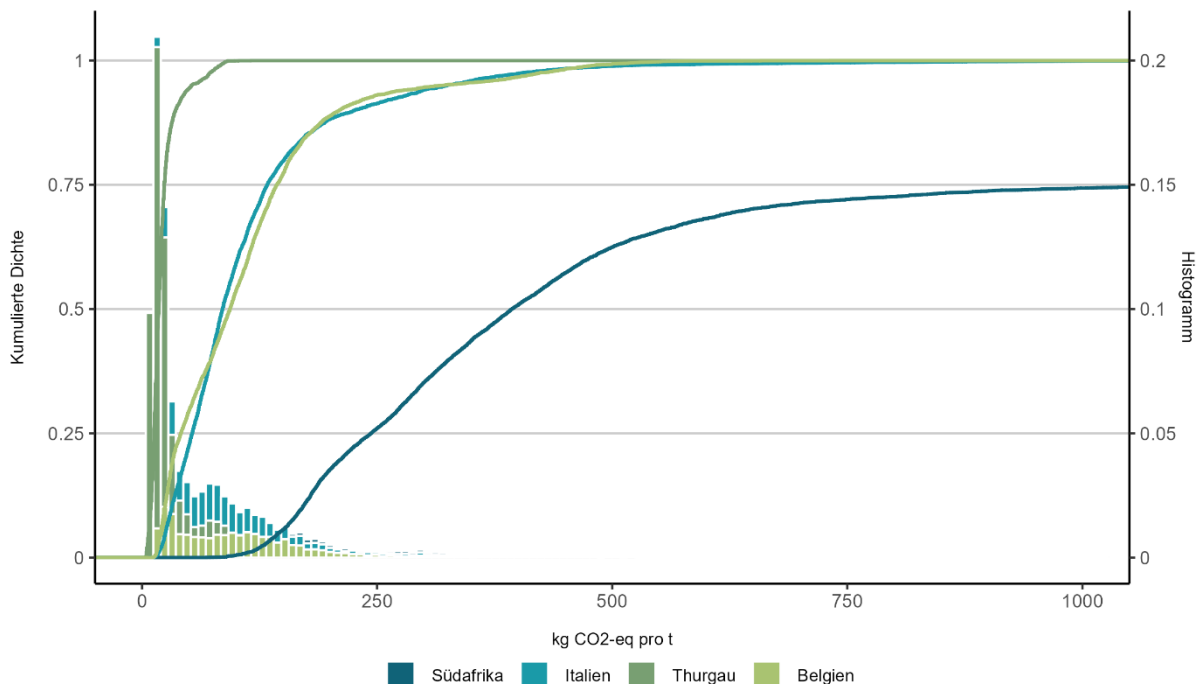
Rapp AG | Interface | ETH Zürich | Datenquelle: Intralog-Eco Modell

Abbildung 13: Modal-Split pro transportiertem Kilometer für Birnen aus vier Herkunftsorten

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.



In Abbildung 13 wird der Grund für diese hohe Standardabweichung ersichtlich. Die Abbildung zeigt den Modal-Split nach Distanz des Transports aus den vier Herkunftsorten über alle berechneten Logistikketten und Transportwege. Den diversesten Modal-Split weist die Birne aus Südafrika aus: Sie wird zu jeweils knapp einem Viertel der transportierten Kilometer per Lastwagen und Schiff transportiert. Der Anteil per Zug macht rund 45 Prozent aus. Der hohe Anteil von Zugkilometern überrascht, das liegt zum einen an der relativ hoch angesetzten Affinität für Zugtransporte, die zu Nachlauftransportketten per Zug in Europa führt, und zum anderen an Transportketten, die auch in Afrika den Zug nutzen, teilweise über den gesamten Kontinent. In knapp 5 Prozent aller zurückgelegten Kilometer wird die Birne im Modell per Flugzeug transportiert. Transportwege mit Flugsegmenten sind dabei deutlich emissionsintensiver als ohne Fluganteil. Im Beispiel Südafrika sind Transportwege mit Flügen um den Faktor 20 emissionsintensiver als andere Transportwege. Eine Birne aus Italien wird gemäss Modell zu über 50 Prozent der Kilometer mit dem Lastwagen transportiert. Der Transport per Schiff macht rund 35 Prozent und der Transport per Zug 15 Prozent aus. Hier wird der Anteil des Schiffsverkehrs somit als sehr hoch eingeschätzt. Birnen aus dem Thurgau werden in knapp 70 Prozent der zurückgelegten Kilometer mit dem Lastwagen transportiert. Den Rest der Kilometer werden die Birnen mit dem Zug transportiert. Die Birnen aus Belgien haben einen sehr ähnlichen Modal-Split aufzuweisen wie Birnen aus Italien. Der Anteil des Schiffs ist dabei noch etwas geringer als im Beispiel Italien, der des Zuges dafür etwas höher. Auch hier gilt, dass die hohe Standardabweichung über die Wahl des Verkehrsmittels in einzelnen Transportwegen entsteht. Transportwege mit einem höheren LKW-Anteil verursachen höhere Emissionen als solche mit höherem Schiffs- oder Zuganteil. Es ist möglich, dass der Anteil von Bahn- und Schifftransporten für die Birnen aus Europa überschätzt wird.



Rapp AG | Interface | ETH Zürich | Datenquelle: Intralog-Eco Modell

Abbildung 14: Histogramm und kumulierte Dichte der kg CO₂-eq-Emissionen für eine Tonne transportierter Birnen aus vier Herkunftsorten

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.



Abbildung 14 zeigt die Dichteverteilung der mit den verallgemeinerten Kosten gewichteten Emissionen pro transportierter Tonne Birnen aus vier Herkunftsländern. Es ist zu beachten, dass das Diagramm auf der rechten Seite abgeschnitten wurde. Insbesondere für das Fallbeispiel Südafrika sind nicht alle Transportketten dargestellt. Bei den nicht dargestellten Transportwegen handelt es sich häufig um solche mit Flugsegmenten. Es zeigt sich, dass die Routen für den Kanton Thurgau die geringste Streuung aufweisen. Praktisch alle Routen emittieren weniger als 200 kg CO₂-eq, viele sogar deutlich weniger. Die Transporte aus Italien und Belgien verursachen CO₂ im mittleren Bereich. Allerdings ist die Streuung innerhalb der Fallbeispiele Italien und Belgien grösser als im Fallbeispiel Thurgau: Sie reicht von nahezu 0 kg CO₂-eq bis über 500 kg CO₂-eq. Die um ein Vielfaches grössere Streuung zeigt schliesslich der Transport der Birne aus Südafrika. Die kleinsten Werte liegen bereits bei ca. 100 kg CO₂-eq. Die höchsten Werte liegen bei über 100'000 kg CO₂-eq (in der Abbildung nicht mehr dargestellt). Die Streuung ist so gross, dass die einzelnen Werte in der Abbildung oft nicht richtig dargestellt werden können. Etwas besser lesen lässt sich deshalb für Südafrika die Abbildung 15. Sie zeigt nur ein Histogramm für die Emissionen in der Fallstudie Südafrika. Hier wird ersichtlich, dass Werte bis 65'000 kg CO₂-eq zwar möglich, allerdings sehr unwahrscheinlich sind (auch hier wurden noch immer 22 Werte auf der rechten Seite von 65'000 abgeschnitten). Viel wahrscheinlicher sind Werte rund um den Mittelwert von 2'661 kg CO₂-eq. Im Vergleich zum Treibhauspotenzial der Birne selbst inklusive ihrer Herstellung im Bereich von etwa 150 bis 500 kg CO₂-eq (berechnet mit ecoinvent v3.9, cut-off-Version, GWP100a, ohne LUC) stellt dies dennoch einen sehr hohen Wert dar, was klar die hohe Bedeutung regionaler Lebensmittel illustriert.

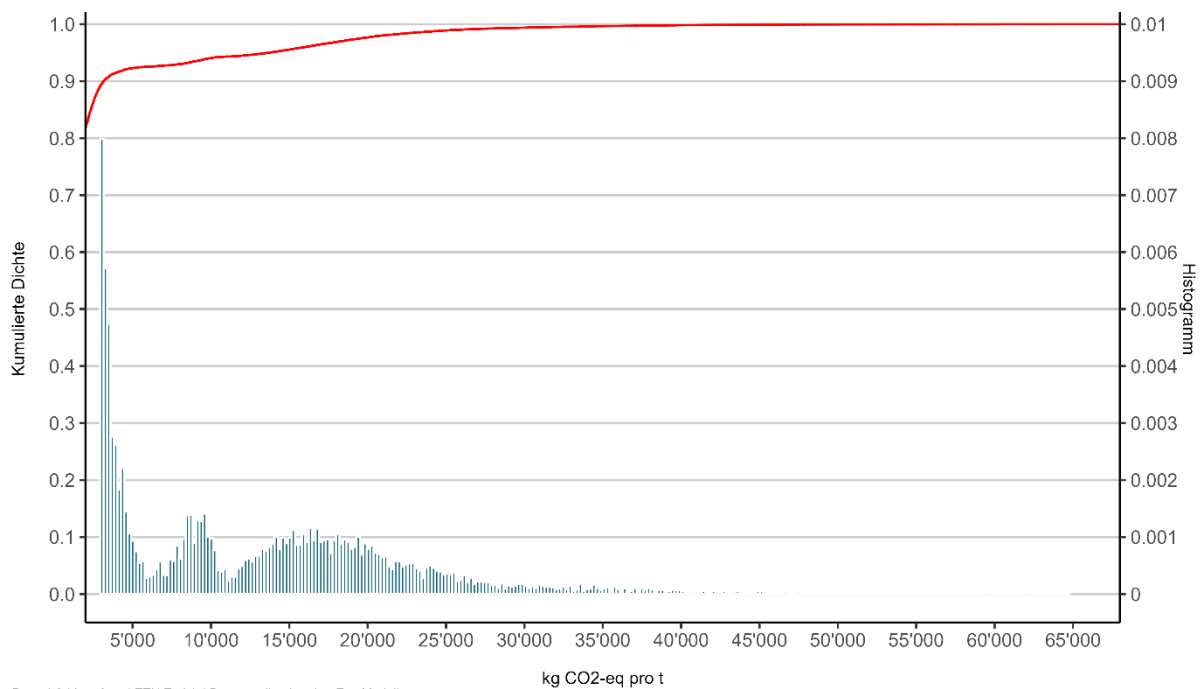


Abbildung 15: Histogramm (blau) und kumulierte Dichte (rot) der kg CO₂-eq-Emissionen für eine Tonne Birnen aus Südafrika (Wolseley)

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.



Schlussfolgerungen

Die Transportwege aus Südafrika erscheinen im Überblick grundsätzlich realistisch, die wahrscheinlichsten Transporte nutzen den Schifftransport bis Europa. Erstaunlich ist der hohe Anteil der Bahn am Modal-Split, der durch häufig genutzten Nachlauf in Europa und teilweise Transportwege mit der Bahn über den afrikanischen Kontinent begründet werden kann. Der Nachlauf wird möglicherweise deutlich überschätzt. Allgemein lässt sich klar beobachten, dass Flugrouten deutlich emissionsintensiver sind und trotz ihrer geringen Gewichtung den Durchschnitt sowie die Standardabweichung wesentlich erhöhen. Dennoch sind auch grosse Unterschiede zwischen Routen ohne Flugsegmente auszumachen. Birnen aus Südafrika können mit einer ähnlichen Menge Emissionen importiert werden wie mit dem Lastwagen aus Italien oder Belgien, da die Emissionen des Schiffstransports vergleichsweise gering ausfallen. Hier spielt auch der küstennahe Standort der Birnenproduktion in Südafrika eine grosse Rolle, da der landbasierte Transport, vor allem per LKW, ein grosser Anteil an den Gesamtemissionen hat. Die Streuung wird vor allem durch die Länge des Transportwegs und durch den Anteil des Lastwagens begründet.

Für die Beispiele mit Importen aus Europa kommt das Modell der Realität vermutlich bei den wahrscheinlichsten Routen nah. Am wahrscheinlichsten sind relativ direkte Lastwagentransporte über teilweise verschiedene Korridore. Teilweise sind Bahnsegmente enthalten, deren Anteil wird wahrscheinlich überschätzt. Ebenfalls überschätzt wird der Anteil von Schiffstransporten auf diesen Relationen. Es ist in der Realität vermutlich ein verschwindend geringer Anteil der Birnen in Transportketten mit Schiffen zu finden, das Modell erzeugt jedoch einen Anteil von ca. 25 Prozent für Italien und etwas weniger für Belgien über alle Routen hinweg.

Die Transportrouten des Modells vom Thurgau nach Luzern innerhalb der Schweiz entsprechen auch dem, was zu erwarten ist. Sowohl der Transport auf einer der direktesten Route per Lastwagen ist wahrscheinlich als auch der Transport mit der Bahn durch das Schweizer Mittelland. Ein solcher Transport könnte durch grosse Schweizer Detailhändler stattfinden, die mehrere regionale Verteilzentren in der Schweiz bedienen und den Warenaustausch zwischen diesen Zentren zumindest teilweise mit Bahntransporten sicherstellen. Diese Modellresultate sind insgesamt als sehr plausibel einzuschätzen.

3.1.2 Fallstudie Rasenmäher

Erläuterung und Inputdaten

Die Rasenmäher stammen aus insgesamt vier verschiedenen Herkunftsorten: Gummersbach in Nordrhein-Westfalen, Deutschland, Horicon in Wisconsin, USA, Suzhou in Shanghai, China, und Milwaukee in Oregon, USA. Die Verkehrsmittelaaffinitäten sind für alle Herkunftsorte die gleichen (vgl. Tabelle 12). Wie für die Birne gilt auch für die Fallstudie des Rasenmähers, dass er nicht als Expressgut versandt wird und bei allen Quellen (den Produktionsorten) und dem Ziel in Luzern (z.B. ein Gartenfachmarkt) nur ein Strassenanschluss besteht.

Tabelle 12: Verkehrsmittelaaffinität Rasenmäher

Verkehrsmittel	Affinität
Flugzeug	0
Bahn	0.6
Schiff	0.9
LKW	1

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.



Der Rasenmäher aus Deutschland wird in Gummersbach, im Bundesland Nordrhein-Westfalen nahe Köln, hergestellt und als Europaimport in die Schweiz eingeführt. Die Entfernung zwischen dem Export- und Importort beträgt etwa 440 km Luftlinie. Der erwartete Durchlauf von Hubs für diesen Transport beträgt drei.

Der erste Rasenmäher aus den USA stammt aus Horicon, Wisconsin, und wird als Überseeimport in die Schweiz eingeführt. Die Entfernung zwischen dem Start- und Zielort beträgt ungefähr 8'700 km Luftlinie. Der erwartete Durchlauf von Hubs für diesen Transport beträgt neun.

Der dritte Rasenmäher stammt aus Suzhou in Shanghai in China. Er ist ebenfalls ein Überseeimport. Die Entfernung zwischen von dort in die Schweiz sind etwa 9'000 km Luftlinie. Der erwartete Durchlauf von Hubs für diesen Transport beträgt neun.

Der vierte Rasenmäher kommt ebenfalls aus den Vereinigten Staaten. Diesmal aus Milwaukee, Oregon. Auch hier handelt es sich um einen Überseeimport, wobei die Entfernung etwa 7'000 km Luftlinie beträgt. Der erwartete Durchlauf von Hubs für diesen Transport beträgt neun.

Transportrouten



Abbildung 16: Mögliche Transportrouten für den Rasenmäher aus Deutschland in die Schweiz

Legende: Routen mit einem Gewichtungsfaktor kleiner als 0.01 werden nicht dargestellt. Je dunkler eine Route dargestellt wird, desto wahrscheinlicher ist sie. Je dicker, desto emissionsreicher. Sich überlagernde Routen sind ebenfalls an diesen Abschnitten dunkler dargestellt.

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.

In Abbildung 16 werden die vom Modell errechneten Transportrouten für den Import von Rasenmähern aus Gummersbach nach Luzern aufgezeigt. Als wahrscheinlichste Routen werden eine links- und



rechtsrheinische Route angezeigt. Der Transport findet dabei wahrscheinlich grösstenteils mittels Lastwagen statt, auch weitere Routen über andere Verkehrsachsen sind im Modell dargestellt. Weitere Routen sehen den Transport über eine gewisse Strecke mit dem Schiff vor, weshalb die Güter an die Nordseeküste oder gar Ostseeküste transportiert werden, um dort einige Kilometer mit dem Schiff zurückzulegen. Diese Routen sind unrealistisch, jedoch zumindest auch nicht sehr wahrscheinlich. Insgesamt ergibt sich ein ähnliches Bild wie beim Birnenimport aus Belgien: Auch hier werden zwar direkte Routen bevorzugt, doch bestimmte Zwischenstationen, die beispielsweise Lager repräsentieren können, werden miteinbezogen. Bis auf die Routen per Schiff handelt es sich um ein durchaus realistisches Bild. Die Emissionsintensität aller Routen ist in diesem Fall ähnlich, das liegt zum einen an ähnlichen Distanzen, zum anderen auch an offenbar ähnlichen LKW-Anteilen.

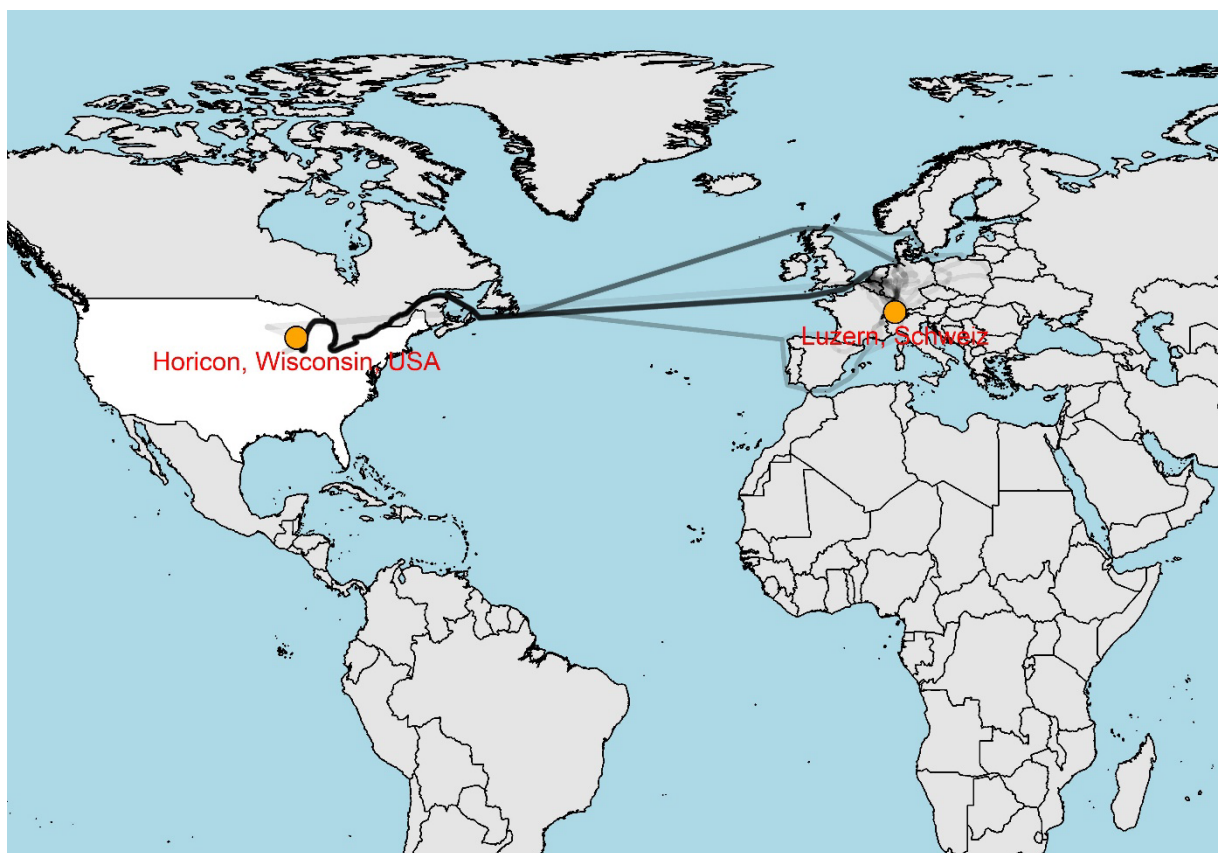


Abbildung 17: Mögliche Transportrouten für den Rasenmäher aus den USA in die Schweiz

Legende: Routen mit einem Gewichtungsfaktor kleiner als 0.01 werden nicht dargestellt. Je dunkler eine Route dargestellt wird, desto wahrscheinlicher ist sie. Je dicker, desto emissionsreicher. Sich überlagernde Routen sind ebenfalls an diesen Abschnitten dunkler dargestellt.

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.

Abbildung 17 stellt mögliche Transportrouten für einen Rasenmäher aus Horicon im Bundesstaat Wisconsin nach Europa und in die Schweiz dar. Als wahrscheinlichste Route wird ein Import per Schiff direkt über die grossen Seen dargestellt. Nach der Atlantiküberquerung landen die Schiffe gemäss Modell häufig in den grossen Nordseefrachthäfen in den Beneluxländern oder Deutschland und werden von dort via Schiff und den Rhein oder via Bahn und LKW in die Schweiz importiert. Allerdings ist die



Streuung für die Atlantiküberquerung gross. Einige Importe erreichen Europa auch über einen Mittelmeerhafen. Keine dieser Routen ist aber gemäss Modell wahrscheinlich. Auch in der Realität haben solche Routen eine gewisse Wahrscheinlichkeit, wenn zum Beispiel freie Frachtkapazitäten an einem Mittelmeerhafen verfügbar sind oder Europalager von Importeuren in diesen Ländern liegen. Am wahrscheinlichsten ist jedoch der Transport über die Nordseehäfen. Vorläufe und Nachläufe lassen sich aus dieser Karte nicht genauer betrachten, jedoch bilden auch diese einen realistischen Mix aus Binnenschifffahrt, Bahn- und LKW-Transport ab.

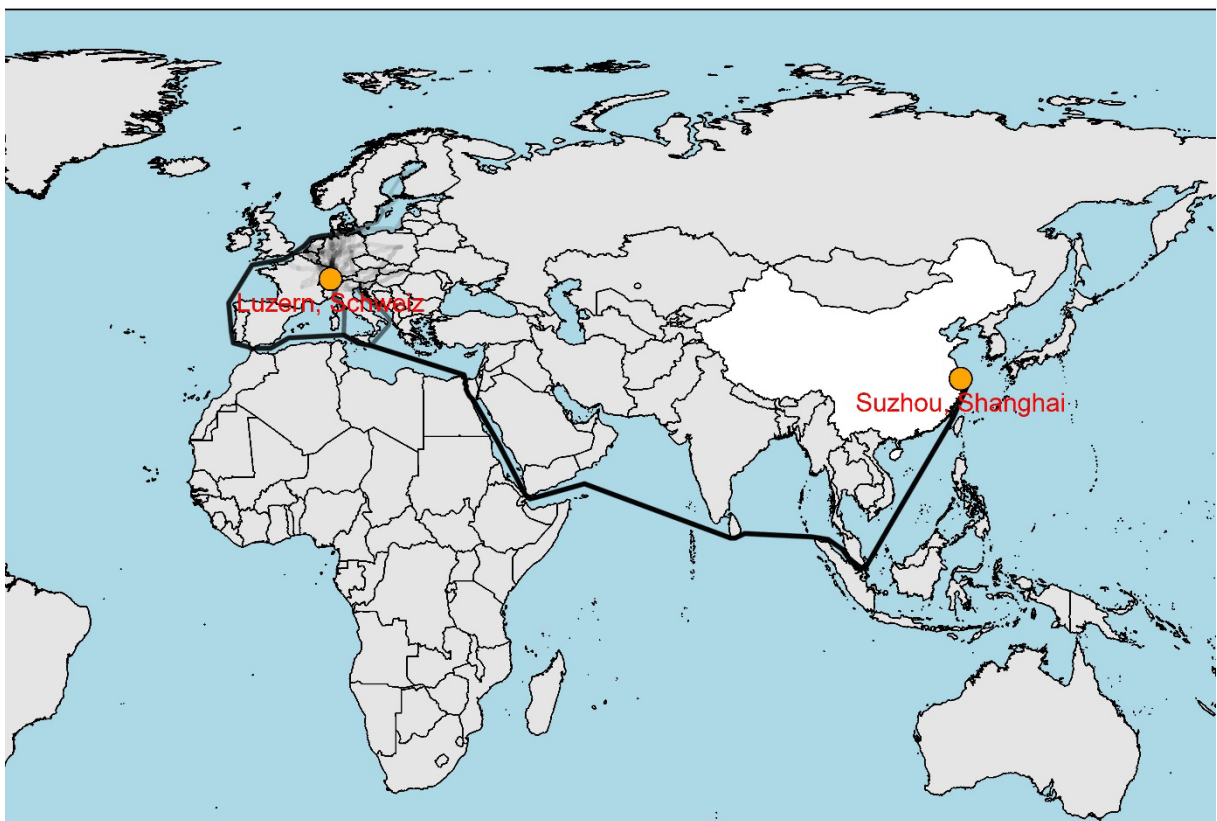


Abbildung 18: Mögliche Transportrouten für den Rasenmäher aus China in die Schweiz

Legende: Routen mit einem Gewichtungsfaktor kleiner als 0.01 werden nicht dargestellt. Je dunkler eine Route dargestellt wird, desto wahrscheinlicher ist sie. Je dicker, desto emissionsreicher. Sich überlagernde Routen sind ebenfalls an diesen Abschnitten dunkler dargestellt.

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.

In Abbildung 18 werden die Importrouten aus China aufgezeigt. Die wahrscheinliche Route mit mittlerem Emissionspotenzial ist die Route mit dem Schiff aus Städten entlang der chinesischen Ostküste (Shanghai, Peking, Hongkong, Hangzhou) über die Strasse von Malakka, den Suezkanal nach Europa. Das Modell sieht häufig einen Transport per Schiff rund um die iberische Halbinsel an die grossen Häfen an der Nordsee in Rotterdam, Antwerpen oder Hamburg vor. Von dort werden die Güter per Schiff auf dem Rhein oder per Zug und Lastwagen auf unterschiedlichsten Routen in die Schweiz importiert.

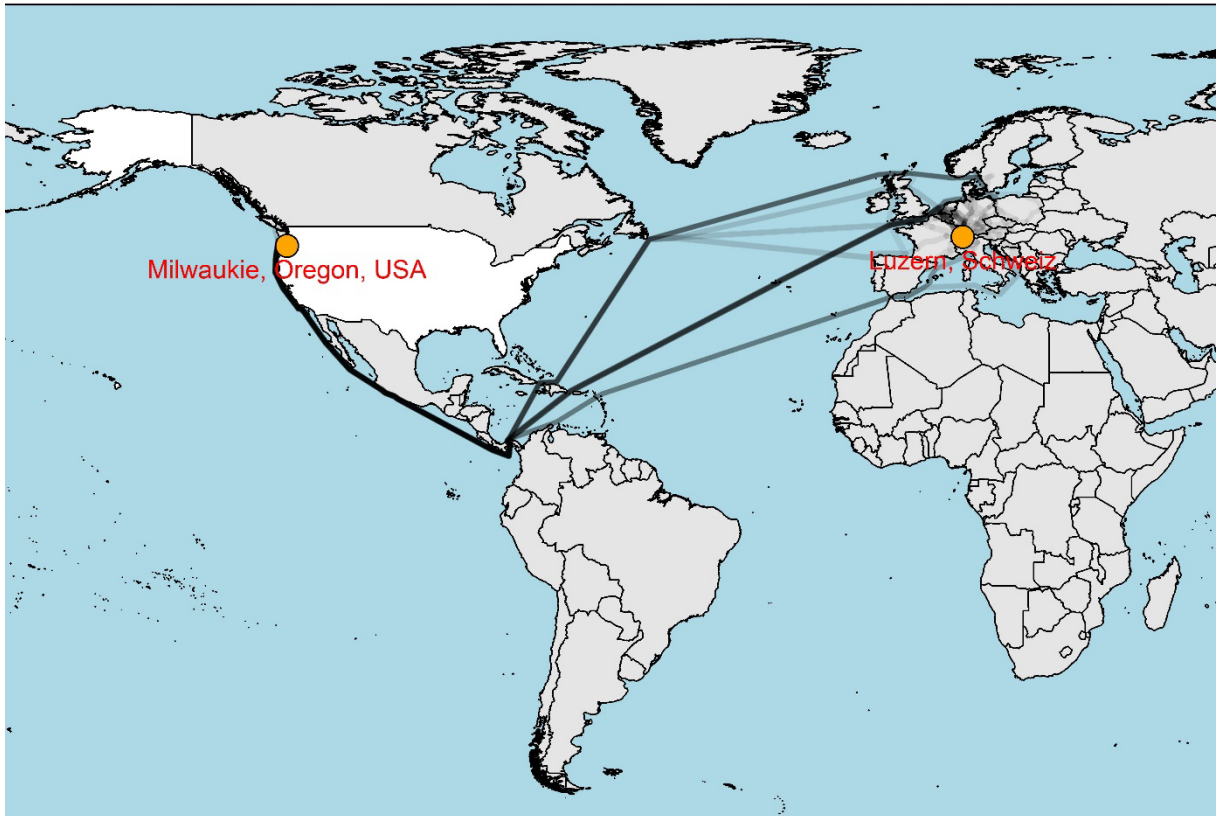


Abbildung 19: Mögliche Transportrouten für den Rasenmäher aus den USA in die Schweiz

Legende: Routen mit einem Gewichtungsfaktor kleiner als 0.01 werden nicht dargestellt. Je dunkler eine Route dargestellt wird, desto wahrscheinlicher ist sie. Je dicker, desto emissionsreicher. Sich überlagernde Routen sind ebenfalls an diesen Abschnitten dunkler dargestellt.

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.

Abbildung 19 zeigt den Import eines Rasenmähers aus dem Bundesstaat Oregon in den USA in die Schweiz. Im Vergleich mit dem anderen Herkunftsort aus den USA liegt dieser deutlich weiter westlich, was zu ebenfalls merklich unterschiedlichen Transportrouten führt. Die Rasenmäher werden dabei immer über einen Hafen an der Westküste der USA und den Panamakanal über verschiedene Atlantikquerungen nach Europa transportiert. Hier werden wie bereits bekannt verschiedene Häfen und kontinentale Nachläufe genutzt. Insgesamt erscheint auch diese Karte realistisch. Die Routen sind dabei ähnlich emissionsintensiv.



Emissionsberechnung

Tabelle 13: kg CO₂-eq-Emissionen pro Tonne transportierter Rasenmäher und Standardabweichung für vier Herkunftsorte

Herkunft	kg CO ₂ -eq Emissionen pro t	Standardabweichung
Deutschland	118	101
USA (Wisconsin)	384	337
China	323	228
USA (Oregon)	356	417

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.

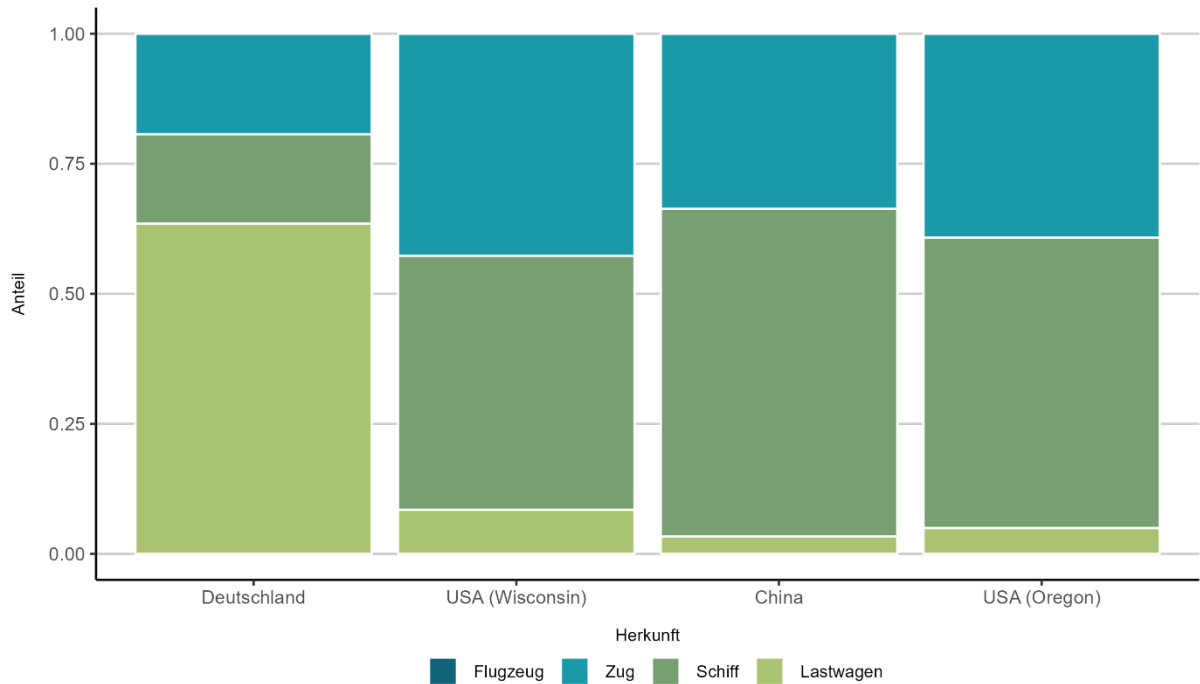
Die Emissionen für den Rasenmäher aus Deutschland, den USA oder China streuen nicht so stark wie die Emissionen für die Birnen. Dies zeigt Tabelle 13. Die Emissionen eines Rasenmähers aus Deutschland sind im Schnitt nur um den Faktor 3 kleiner als für einen Rasenmäher aus den USA (Oregon) oder China. Für einen Rasenmäher aus Wisconsin sind die durchschnittlichen Emissionen noch ein wenig höher, wahrscheinlich bedingt durch längere Transportwege an Land mit seinen höheren Emissionsintensitäten, auch wenn der Transport aus Oregon durch den Umweg durch den Panamakanal streckenmässig wesentlich länger ist. Die Standardabweichungen für die verschiedenen Herkunftsorte sind gross, was wiederum auf grosse Unterschiede in den unterschiedlichen Transportrouten und Logistikketten hinweist.

Das zeigt auch Abbildung 20 mit den Modal-Splits nach Distanz für den Transport. Dabei fällt auf, dass nur für den Transport von Deutschland in die Schweiz der Lastwagen ein substanzieller Anteil an den zurückgelegten Kilometern ausmacht, nämlich rund zwei Drittel. Zu jeweils etwas mehr als 10 Prozent werden die Rasenmäher aus Deutschland auch per Zug und Schiff transportiert. Die Rasenmäher aus Wisconsin in den USA legen einen viel grösseren Anteil der Kilometer per Schiff und Zug zurück: Rund 35 Prozent für den Transport per Schiff und 45 Prozent für den Transport per Zug. Der Anteil des Schiffs ist beim Rasenmäher aus Shenzhen, China, noch etwas grösser als für Wisconsin, während der Anteil der zurückgelegten Kilometer mit dem Lastwagen noch unbedeutender wird. Im Vergleich mit dem Transport aus dem Nordosten der USA nimmt der Anteil Zug auch leicht ab, von 45 Prozent auf rund 35 Prozent. Das erklärt auch die geringeren Unterschiede zwischen dem Europaimport und den Überseeimporten als bei der Birne. Aus Deutschland wird der Rasenmäher vornehmlich emissionsintensiv per Lastwagen importiert, wohingegen die Transportkette aus den weiter entfernten Quellen deutlich grössere Anteile relativ geringerer emissionsintensiver Transportmittel enthält. Die gegenüber der Birne nicht enthaltenen Flugtransporte senken den Mittelwert der Emissionen zusätzlich deutlich. Die wiederum grossen Anteile der Zugtransporte resultieren aus dem Nachlauf in Europa, der häufig per Zug stattfindet. Zudem gibt es auch Transportwege, die aufgrund ihrer geringen Wahrscheinlichkeit nicht in der Karte dargestellt werden, allerdings einen hohen Anteil Wegstrecke mit dem Zug haben und in der Summe deshalb den Modal-Split beeinflussen. Das betrifft zum Beispiel den Landimport von China mit dem Zug via Russland und Kasachstan oder in den USA den Transport vom Westen zu einem Hafen im Osten. Dennoch erscheint der Zuganteil eher hoch.

Innerhalb der USA enthält der Transport von der Westküste aus Oregon im Modell etwas mehr zurückgelegte Kilometer auf dem Schiff als auf dem Zug (Anteil Schiff rund 55%, Anteil Zug rund 30%). Dies ist darin begründet, dass Rasenmäher von der Westküste vermehrt über den Panamakanal transportiert werden, was zu absolut mehr Schiffskilometern und damit auch zu einem höheren Anteil im Modal-Split führt. Im Mittel liegen die Emissionen aus Oregon jedoch trotz der höheren Entfernung niedriger, was mit dem geringeren Lastwagenteil im Vorlauf zusammenhängt. Der Nachlauf gestaltet



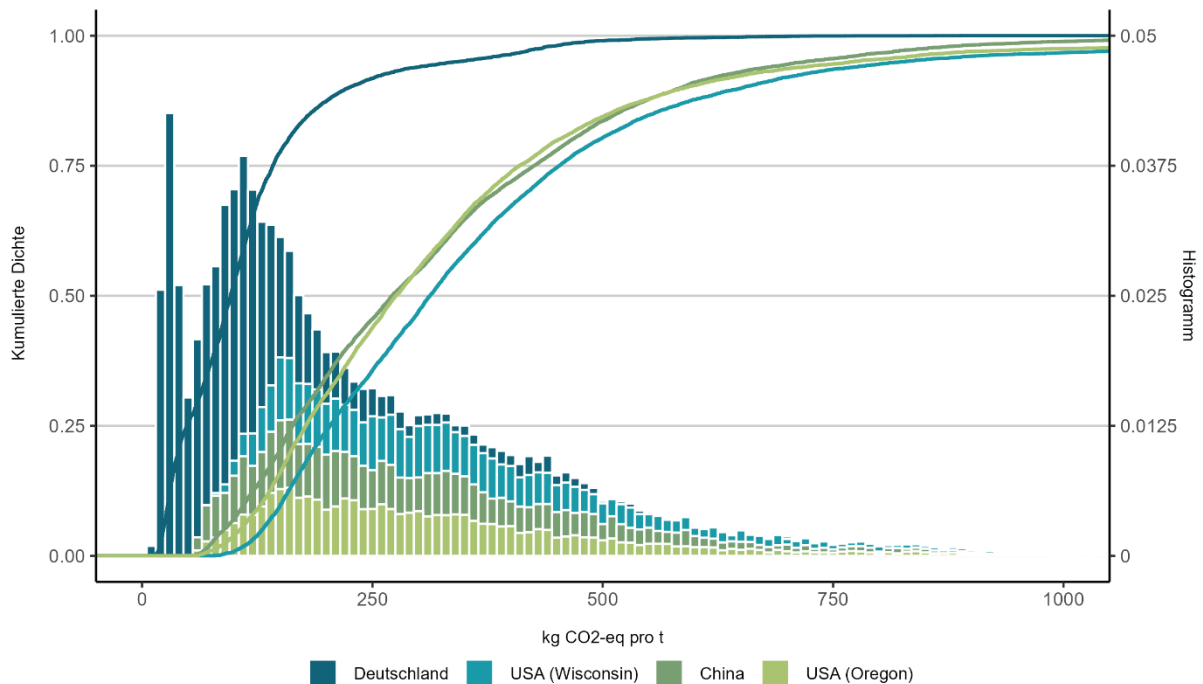
sich in Europa sehr ähnlich. Dies kann verschiedene Gründe haben, wie beispielsweise Infrastrukturverfügbarkeit oder auch Transportdistanz zum nächstgelegenen Hafen. Unter Umständen lohnt es sich von Wisconsin aus nicht, einen Seehafen mit der Bahn zu erreichen. Der Lastwagentransport ist ökonomisch gesehen sinnvoller, jedoch mit mehr Emissionen verbunden.



Rapp AG | Interface | ETH Zürich | Datenquelle: Intralog-Eco Modell

Abbildung 20: Modal-Split pro transportiertem Kilometer für Rasenmäher aus vier Herkunftsorten

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.



Rapp AG | Interface | ETH Zürich | Datenquelle: Intralog-Eco Modell

Abbildung 21: Histogramm und kumulierte Dichte der kg CO₂-eq-Emissionen für eine Tonne transportierter Rasenmäher aus vier Herkunftsorten

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.

In Abbildung 21 ist die Dichteverteilung für die CO₂-eq-Emissionen für einen Rasenmäher aus Deutschland, den USA und China dargestellt. Zur besseren Lesbarkeit werden nicht alle Routen dargestellt. Routen mit mehr als 1'000 kg CO₂-eq-Emissionen pro Tonne tauchen aufgrund der ausgeschlossenen Flugverbindungen nur selten auf, dennoch treten sie von allen vier Quellen aus auf. Rasenmäher aus Deutschland haben im Schnitt die Wahrscheinlichkeit, weniger CO₂-Emissionen zu verursachen als ein Rasenmäher aus einer anderen Fallstudie. Das Maximum in der Dichteverteilung der Routen aus Deutschland findet sich bei rund 150 kg CO₂-eq. Danach gibt es zwar noch sehr viele Routen, die mehr oder sehr viel mehr CO₂ ausstossen, allerdings werden diese immer unwahrscheinlicher. Für den Transport des Rasenmähers aus Wisconsin in den USA wird grundsätzlich mehr CO₂ ausgestossen als für einen Rasenmäher aus Deutschland. Allerdings zeigt sich kein klares Maximum der Emissionen – es zeigt sich eher ein Band, das zu Beginn bei rund 180 kg CO₂-eq bis 400 kg CO₂-eq in etwa gleich dick ist und danach mit steigenden Emissionen dünner wird (die Routen also unwahrscheinlicher werden). Ein ähnliches Bild wird auch für den Rasenmäher aus Oregon ersichtlich, allerdings beginnt dieses Band schon etwas früher bei rund 150 kg CO₂-eq. Für den Rasenmäher aus China ist in Ansätzen auch ein solches Band an hohen Emissionen zu erkennen, das mit steigenden Emissionen immer dünner wird. Insgesamt ist so ein Import aus Deutschland mit grosser Wahrscheinlichkeit weniger emissionsintensiv als aus China oder den USA, jedoch nicht zwingend. Gleichzeitig lässt sich erkennen, dass die Emissionen aus China und den USA eine ähnliche Verteilung und Streuung aufweisen. Es kann nicht klar ausgemacht werden, aus welchem Produktionsland die Emissionen überwiegend geringer sind. In jedem Fall ist es auffällig, dass sich die absoluten Emissionsmengen unabhängig vom Ursprungsland deutlich überschneiden, was bedeutet, dass eine pauschale Aussage



nur basierend auf der räumlichen Nähe von Start und Ziel nicht möglich ist, ohne geeignete Berechnungen durchzuführen. Die Bandbreite der Gesamtergebnisse dahinter wird dabei deutlich vom Monte-Carlo-Ansatz im Modell gezeigt.

Schlussfolgerungen

Beim Import des Rasenmähers aus Deutschland hat das Emissionsmodell den Import auf dem direktesten Weg per Bahn oder Lastwagen durch Deutschland und Frankreich über Basel nach Luzern als am wahrscheinlichsten taxiert. Dies entspricht wahrscheinlich auch der Realität. Weniger wahrscheinlich sind alle Routen, die einen Transport per Schiff in der Nordsee oder im Ärmelkanal vorsehen, da dieser kaum Distanzreduktion mit sich bringt.

Auch die beiden Beispiele aus den USA zeigen ein realistisches Bild der Transportwege auf. Beide nutzen nahegelegene Häfen für den Europaimport. Überraschend ist, dass Importe aus dem weiter entfernten Oregon, trotz der grösseren Entfernung und des Umwegs durch den Panama-Kanal, im Mittel (bei jedoch höherer Standardabweichung) weniger Emissionen verursachen als aus Wisconsin. Die längere Wegstrecke mit dem Schiff gibt hier nicht den Ausschlag, sondern der Vorlauf in den USA, da der Nachlauf in Europa sehr ähnlich ist. Hier entscheidet also ein räumlich kleiner Teil der Transportkette – die Länge des LKW-Transports zum Hafen – über die Emissionen im Vergleich zu anderen Quellen.

Für den Transport aus China hat das Modell klar den Transport per Schiff über den Suezkanal als wahrscheinlichste Option erkannt. Dies entspricht der Realität. In Europa werden unterschiedliche Häfen genutzt, der Nachlauf gestaltet sich sehr divers, wird hier jedoch nicht weiter untersucht.

Aufgrund der Ergebnisse des Modal-Splits kann sowohl für Importe aus China als auch aus den USA gefolgert werden, dass Zugverbindungen aus kosten- und emissionstechnischer Sicht für Importe nach Europa zumindest auf Teilstrecken interessant sein können. Das liegt vor allem an vermiedenen Umwegen beim Schifftransport, wodurch Zeit und Kosten gespart werden. Je höher der Zeitwert eines Guts, desto interessanter wird also auch der Transport per Bahn. Hier muss jedoch festgehalten werden, dass von einer guten Qualität der Bahnverbindungen ausgegangen wird. Dies mag mit den Entwicklungen der letzten Jahre für beide Quellen gelten, lässt sich jedoch nicht weltweit verallgemeinern. Insgesamt zeigt die Fallstudie, dass aufgrund der fehlenden Flugsegmente die Importe aus China und den USA absolut zwar ungefähr dreimal so viel CO₂ ausstossen wie jener aus Deutschland, damit ist der Unterschied jedoch auch relativ deutlich geringer als bei der Birne aus Südafrika. Die Untersuchung der Verteilung zeigt dazu jedoch auch, dass die Emissionen bei einem Import aus Deutschland auch deutlich geringer liegen können, wenn auf weniger emissionsintensive Transportmittel als den Lastwagen gesetzt wird. Dieser ist derzeit jedoch die kostentechnisch beste Wahl, zumindest dem hier präsentierten Modell nach.

3.1.3 Fallstudie Bratpfanne

Erläuterung und Inputdaten

In dieser Fallstudie werden die Transporte im Zusammenhang mit der gesamten, allerdings vereinfachten Produktions- und Lieferkette für die Fertigung einer Edelstahl-Bratpfanne nachmodelliert und ihre Emissionen geschätzt. Es handelt sich wiederum um einen hypothetischen, aber realistischen Fall. Die Pfanne wird in der Schweiz gefertigt und ebenso wie in den vorherigen Fallstudien ist das Ziel ein Detailhändler in Luzern. Die Herkünfte von Ausgangsstoffen und die Herstellungsorte von Zwischenprodukten werden in Abbildung 22 dargestellt. In dieser Abbildung ist ebenfalls dargestellt, wie viele Anteile der Komponenten tatsächlich in einer Pfanne verwendet werden. So ist beispielsweise zu erkennen, dass für ein Teil Pfanne 1,8 Teile Eisenerz benötigt werden, aber nur 0,7 Teile Kohle. Wichtig zu berücksichtigen ist, dass kein Ausschussmaterial berücksichtigt wird, was beispielsweise beim Stahl auftritt. Die Inputparameter für das Modell können der Tabelle 14 entnommen werden.

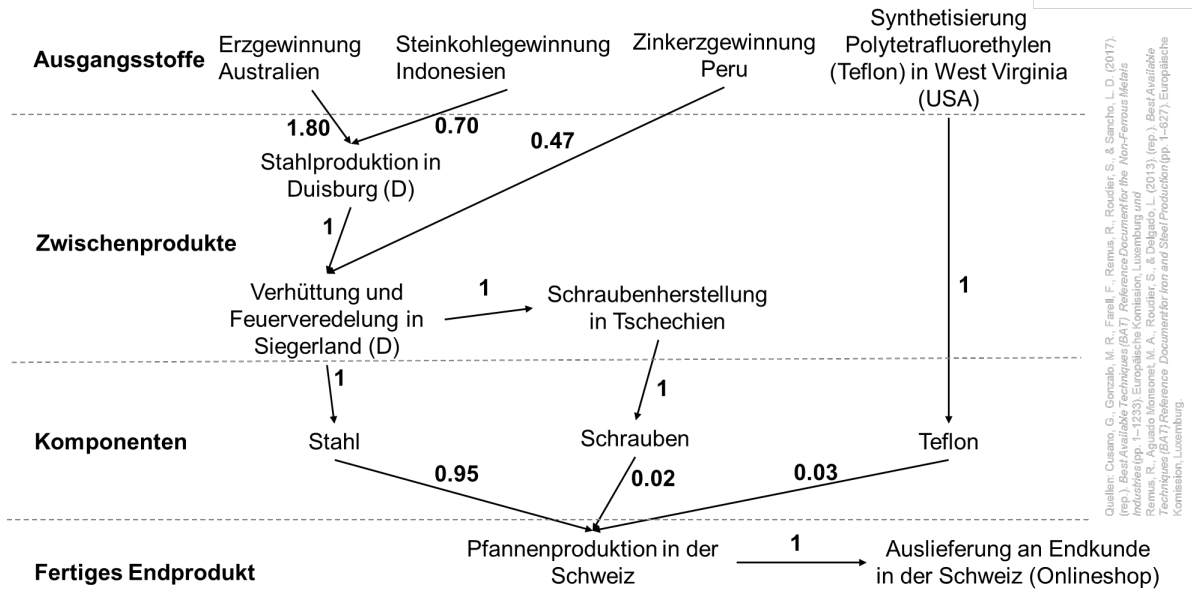


Abbildung 22: Baumdarstellung der Prozessschritte zur Pfannenherstellung mit den dazugehörigen Multiplikatoren

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.

Tabelle 14: Inputparameter Fallstudie Bratpfanne

	Eisen- erz	Stein- kohle	Zink	Teflon	Roh- stahl	Stahl	Schrau- ben	Pfanne
Luftdis- tanz (km)	13'500	11'500	10'500	7'000	100	700 (für Schrau- ben) 400 (für Pfanne)	600	60
Massen- gut	ja	ja	ja	ja	ja	ja	nein	nein
Verfü- gbarer An- schluss Quelle	Bahn	Bahn	Strasse	Strasse, Bahn	Strasse, Bahn	Strasse, Bahn	Strasse, Bahn	Strasse
Verfü- gbarer An- schluss Ziel	Strasse, Bahn, Wasser	Strasse, Bahn, Wasser	Strasse, Bahn	Strasse	Strasse, Bahn	Strasse, Bahn (nur Schrau- ben)	Strasse	Strasse



	Eisen- erz	Stein- kohle	Zink	Teflon	Roh- stahl	Stahl	Schrau- ben	Pfanne
Affinität Flugzeug	0	0	0	0	0	0	0	0
Affinität Bahn	1	1	0.9	1	0.9	0.9	0.6	0.4
Affinität Schiff	1	1	0.9	1	0.9	0.9	0.1	0
Affinität LKW	0.3	0.3	0.6	1	0.6	0.6	1	1

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.

Transportrouten

In der Abbildung 21 und der Abbildung 22 sind die vom Modell ausgegebenen Transportrouten für alle Ausgangsstoffe und Zwischenprodukte farblich differenziert dargestellt. Die Dicke der Linien bezieht hierbei auch die letzte Emissionsintensität pro Pfanne ein, das heisst der Emissionsanteil wird ebenso berücksichtigt wie die absoluten Emissionen eines Transportwegs. In Abbildung 23 sind die weltweiten Transportrouten dargestellt. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass die Kohle und beide Erze aus den Minen mit grösster Wahrscheinlichkeit per Schiff transportiert werden. Für Eisen von der australischen Westküste und Kohle aus Indonesien erfolgen diese Transporte über den indischen Ozean und den Suez-Kanal in einen europäischen Hafen, von Peru auf dem Landweg an die Ostküste oder durch den Panama-Kanal und dann über den Atlantik. Von dort wird das Rohmaterial zumeist per Binnenschiff weitertransportiert, weshalb Routen zu den Nordseehäfen mit Binnenwasserstrassenanschluss gegenüber den Häfen im Süden Europas wahrscheinlicher gewählt werden. Alle Routen innerhalb der einzelnen Ausgangsstoffe sind dabei ähnlich emissionsintensiv. Kohle ist dabei deutlich weniger emissionsintensiv als die beiden Erze. Dies vor allem, weil weniger Kohle als Eisenerz für den Stahl benötigt wird. Eisenerz ist im Transport sehr emissionsintensiv, da es in deutlich grösserer Menge zur Herstellung benötigt wird als Kohle und insbesondere Zink. Aufgrund der im Vergleich geringen Menge Zink, die zur Herstellung der Pfanne benötigt wird, erstaunt die hohe Emissionsintensität des Zinkimports aus Peru. Diese ist durch den sehr emissionsintensiven LKW-Transport bis zum Hafen zu begründen, der teilweise sogar bis zur Ostküste Südamerikas reicht. Auffällig sind für den Transport des Zinks die vielen sehr diversen Routen durch Südamerika, aber auch über die Ostküste der USA. Diese erscheinen insbesondere für das Massengut Zink wenig realistisch und verursachen die hohen Emissionen gegenüber den anderen Ausgangsstoffen. Grund für diese hohe Streuung ist die relativ geringe Dichte an Transportinfrastruktur in Südamerika, was über die generierten Transportketten und die zugehörigen Hubs grosse Umwege im Transport hervorruft, aber dann durch hohe Kosten im Modell vielfach als unwahrscheinlich eingestuft wird. Das Teflon hingegen wird sehr direkt aus den USA per Schiff importiert und ist aufgrund seines geringen Anteils an der Pfanne sehr dünn dargestellt.

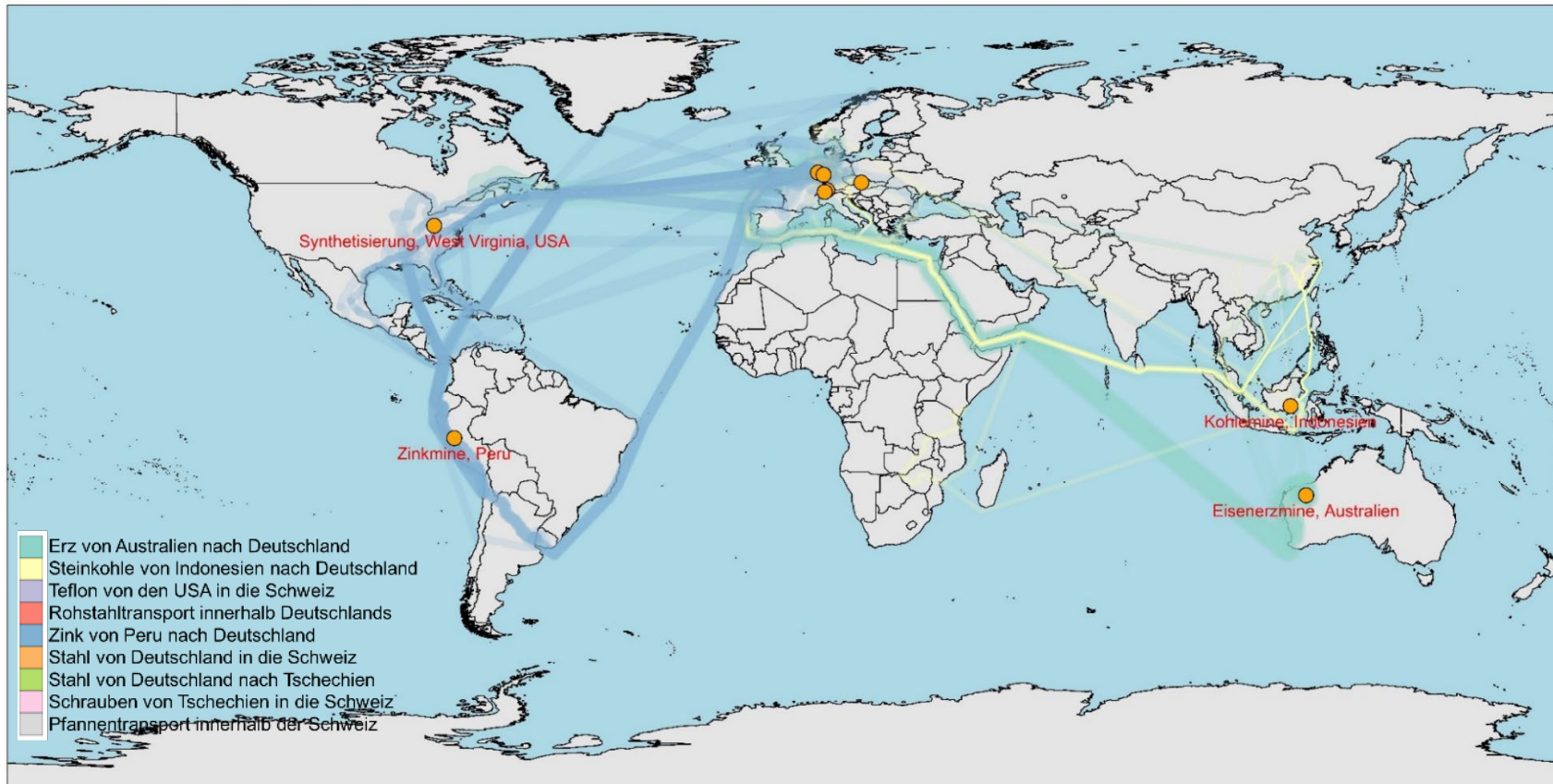


Abbildung 23: Mögliche Transportrouten für die Ausgangsstoffe und der Zwischenprodukte der Pfanne weltweit

Legende: Jede Farbe steht für den Transport eines Ausgangsstoffes oder Zwischenprodukts. Routen mit einem Gewichtungsfaktor kleiner als 0.01 werden nicht dargestellt. Je dunkler eine Route dargestellt wird, desto wahrscheinlicher ist sie. Je dicker, desto emissionsreicher. Sich überlagernde Routen sind ebenfalls an diesen Abschnitten dunkler dargestellt.

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.



In Abbildung 24 ist deutlich zu erkennen, dass die Transportwege der Lieferkette innerhalb Europas zum einen ein deutlich geringeres Gewicht haben und zum anderen deutlich diverser sind. Stahl und Schrauben werden auf diversen Routen per Bahn und LKW durch Europa transportiert, keine Route sticht als deutlich wahrscheinlicher als die anderen heraus. Auf eine detailliertere Betrachtung wird an dieser Stelle verzichtet.

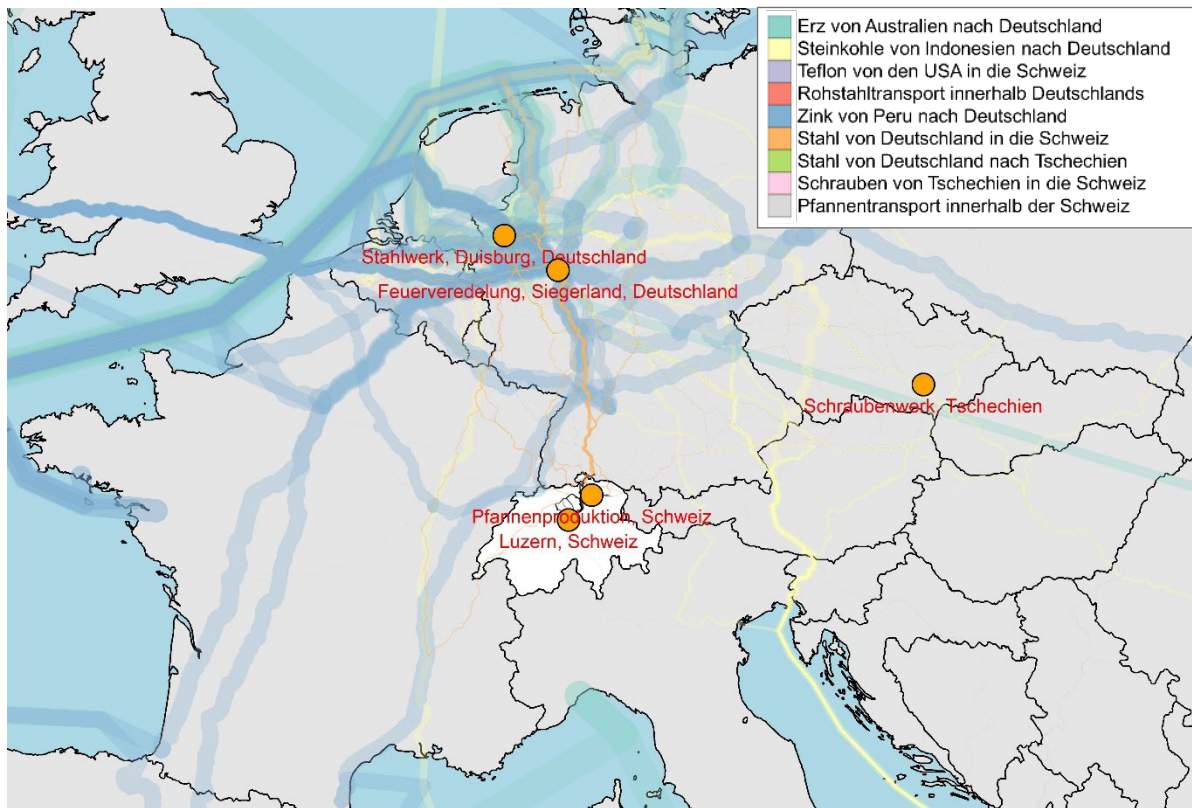


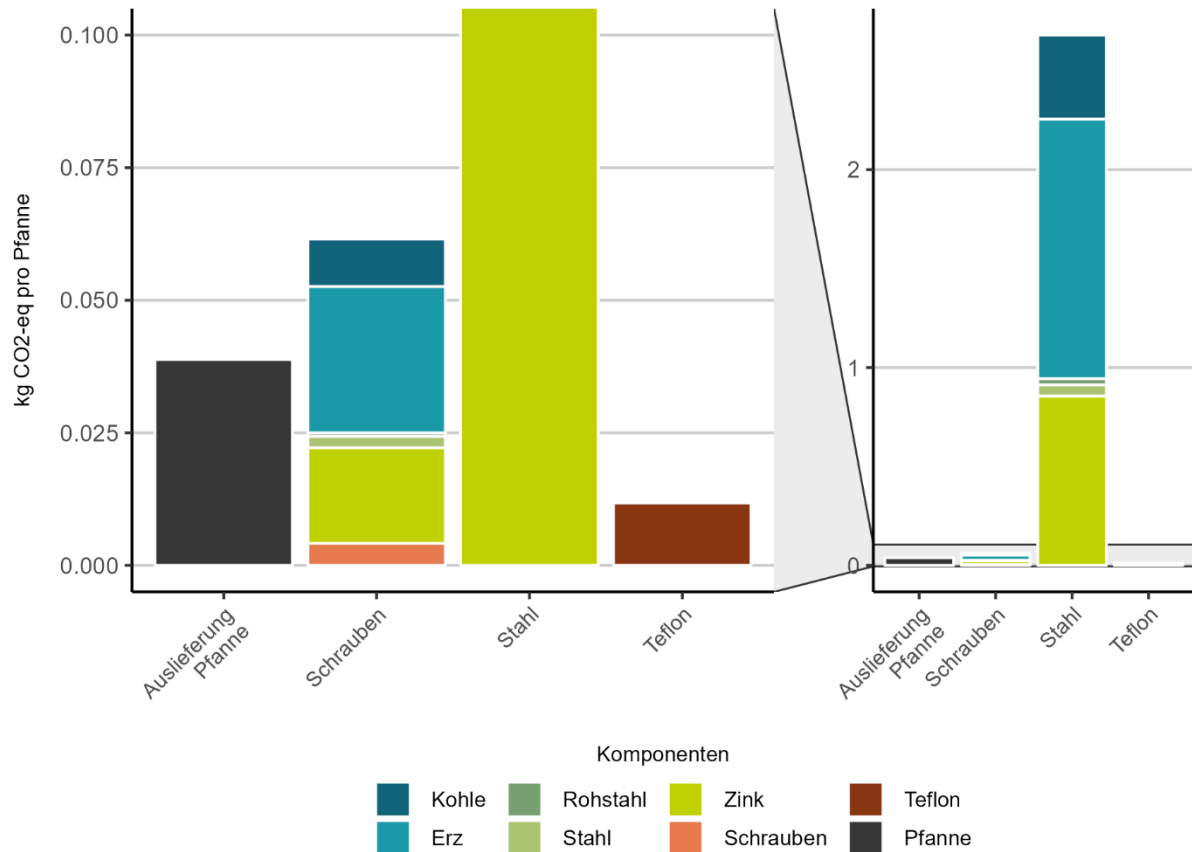
Abbildung 24: Mögliche Transportrouten für die Ausgangsstoffe und der Zwischenprodukte der Pfanne in Europa

Legende: Jede Farbe steht für den Transport eines Ausgangsstoffes oder Zwischenprodukts. Routen mit einem Gewichtungsfaktor kleiner als 0.01 werden nicht dargestellt. Je dunkler eine Route dargestellt wird, desto wahrscheinlicher ist sie. Je dicker, desto emissionsreicher. Sich überlagernde Routen sind ebenfalls an diesen Abschnitten dunkler dargestellt.

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.



Emissionsberechnung



Rapp AG | Interface | ETH Zürich | Datenquelle: Intralog-Eco Modell

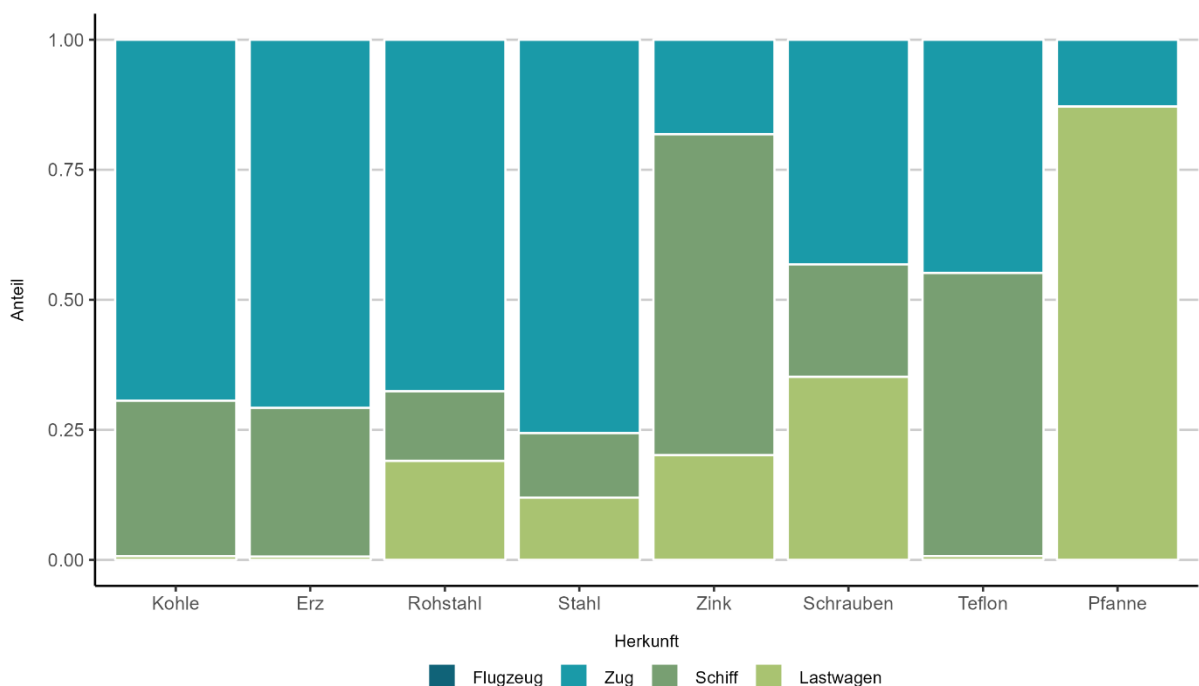
Abbildung 25: kg CO₂-eq-Emissionen pro Pfanne für unterschiedliche Komponenten der Pfanne, aufgeteilt nach Ausgangsstoffen

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.

In Abbildung 25 sind die kg CO₂-eq-Emissionen pro Pfanne für die unterschiedlichen Komponenten dargestellt. Eine Pfanne wiegt rund 2 kg, ihre durchschnittlichen CO₂-eq Emissionen liegen laut Modell bei 2,8 kg. Es zeigt sich, dass ein hoher Anteil der Emissionen aus dem Transport des Stahls und dessen Ausgangsstoffen resultiert. Das liegt zum einen daran, dass Stahl mit 95 Prozent den Hauptanteil der Pfanne ausmacht, zum anderen ist die Lieferkette aufwändig. Zu den Transportrouten für die Komponente Stahl gehören der Transport von Erz aus Australien und Steinkohle aus Indonesien nach Europa, der Transport des Rohstahls innerhalb Deutschlands zur Veredelung, der Transport von Zink aus Peru nach Deutschland zur Verzinkung sowie der Transport von feuerveredelten Stahlrollen von Deutschland in die Schweiz. Dementsprechend hat der Stahl auch relativ zu seinem Gewicht einen grösseren Anteil als Teflon an den Gesamttransportemissionen der Pfanne. Die zweitmeisten Emissionen werden durch die Schrauben verursacht, die 2 Prozent der fertigen Pfanne ausmachen. Sie bestehen aus Stahl und beinhalten deshalb implizit die Emissionen der Lieferkette zur Stahlherstellung, den Transport des Stahls nach Tschechien sowie den Transport der Schrauben in die Schweiz. Relativ zu ihrem Gewicht haben sie also eine höhere Emissionsintensität als der reine Stahl, absolut ist der Anteil gegenüber dem reinen Stahl jedoch nahezu vernachlässigbar. Dies gilt ebenso für die Ausliefe-



nung der Pfanne in der Schweiz und die Beschaffung des Teflons. Besonders Teflon hat einen vernachlässigbar kleinen Anteil, dies liegt vor allem an der einfachen Lieferkette sowie dem geringen Anteil von 3 Prozent an der gesamten Pfanne. Die ganze Abbildung bezieht sich nur auf die Emissionen, die beim Transport der einzelnen Komponenten der Bratpfanne oder deren Ausgangsstoffe entstehen, nicht aber die Emissionen, die durch die Gewinnung der Ausgangsstoffe oder die Fertigung der Komponenten entstehen. Wenn man die Emissionsintensitäten der Herstellung des Rohstahls vergleicht (etwa 5 kg CO₂-eq pro Pfanne laut Ecoinvent v3.9.1, cut-off-Version, GWP100a), dann scheinen die Emissionen aus dem Transport, bedingt durch vermutlich unrealistisch hohe Anteile am LKW-Transport, vergleichsweise hoch. Das Hinzufügen spezifischer Infrastruktur für die Rohstoffe (z.B. Häfen für Erze, die bislang nicht erfasst sind), können hier zu realistischeren Ergebnissen führen.



Rapp AG | Interface | ETH Zürich | Datenquelle: Intralog-Eco Modell

Abbildung 26: Modal-Split pro transportiertem Kilometer für verschiedene Ausgangsstoffe der Pfanne

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.

Abbildung 26 zeigt den Modal-Split für die unterschiedlichen Komponenten der Pfanne. Insgesamt sind die Anteile von Zug und Schiff für die meisten Güter sehr hoch, da es sich um Massengüter handelt. Der höhere Anteil vom Zug gegenüber dem Schiff, insbesondere bei Kohle und Erz, überrascht, ist jedoch vermutlich durch Vorlauf und Nachlauf sowie durch eher unrealistische kontinentale Routen durch Afrika oder Indien zu begründen. Auch Stahl und Rohstahl werden als Massengüter, die nicht zeitsensitiv sind, häufig per Zug transportiert. Die Schrauben weisen bereits einen höheren Anteil Lastwagen auf, dies liegt an der geringeren Verkehrsmittellaffinität für die Bahn und an der Deklaration, die Schrauben nicht als Massengut definiert. Bei der Auslieferung der Pfanne ist erwartungsgemäss der Anteil der Lastwagentransportdistanz höher als der Anteil des Transports mit der Bahn.



Schlussfolgerungen

Die Fallstudie der Pfanne zeigt, dass insbesondere der mengenmässig grosse und weite Transport von Massengütern die Gesamtemissionen der Pfanne bestimmt. Eisenerz und Zink verursachen deutlich den Grossteil der Emissionen, beim Erz liegt das hauptsächlich an der grossen Menge und der weiten Distanz, beim Zink wird dies durch die schlechte Infrastrukturanbindung und die dadurch umständlich generierten Transportwege hervorgerufen. Zwar ist dies vermutlich auch realistisch und die Infrastrukturverfügbarkeit ist in Peru schlechter als beispielsweise in den USA, wodurch emissionsärmere Verkehrsmittel schlechter verfügbar sind, jedoch erscheint das Ausmass im Vergleich zu Kohle und Eisenerz im Modell extrem. Wenig Einfluss haben die nachgelagerten Glieder der Lieferkette. Die Transporte innerhalb Europas haben sogar gemeinsam einen verschwindend geringen Einfluss auf die Gesamtemissionen im Transport. Eine Optimierung an dieser Stelle kann also zwar lokal durchaus bedeutende Emissionsmengen senken, wirkt sich jedoch in der Gesamtsicht der Lieferkette und damit global kaum aus.

3.2 Diskussion des Schätzmodells für Logistikemissionen

Die Ergebnisse der Fallstudien zeigen, dass das Modell grundsätzliche plausible Ergebnisse liefert. Sowohl die wahrscheinlichen Transportwege als auch die geschätzten Emissionen der Fallstudien sind realistisch. Die dritte Fallstudie zur Bratpfanne zeigt, dass auch die Emissionsintensität komplexer Lieferketten mit dem Modell geschätzt werden kann.

Die Fallstudien dienen der Demonstration des Modells, dennoch können auch inhaltliche Schlussfolgerungen gezogen werden. Insbesondere fällt wie erwartet der starke Einfluss des Fliegens auf die CO₂-Emissionen auf, demgegenüber zeigt jedoch die Fallstudie des Rasenmähers, dass Importe aus Übersee, egal ob aus den USA oder aus China, nicht deutlich emissionsintensiver sein müssen als ein Import aus Deutschland. Werden aufgrund der längeren Strecke eher weniger emissionsintensive Transportmittel gewählt, so kann die höhere Distanz mehr als ausgeglichen werden. Bei der Pfanne zeigt sich zudem deutlich, dass insbesondere der Import von Rohprodukten viele Emissionen verursacht, da diese einen weiten Weg zurücklegen und im Fall der Pfanne einen grossen Anteil am Gesamtprodukt haben. Da in Europa kaum noch Kohle abgebaut wird, sind Importe hier aus Übersee wohl unvermeidbar, für Eisenerz zum Beispiel gäbe es Alternativen. Werden diese Rohstoffe näher am Herstellungsort abgebaut oder müssen durch Recycling gar nicht abgebaut werden, senkt dies die Logistikemissionen massiv. Es handelt sich hier also eher um einen strategischen Entscheid für hohe Emissionen als Konsequenz von grosser Transportdistanz. Im Gesamtkontext spielt die Auslieferung der Pfanne eine untergeordnete Rolle.

Unabhängig von der Fallstudie fällt auf, dass der Anteil des LKW einen grossen Einfluss auf die Emissionsintensität hat. Auch dies ist nicht überraschend, bestätigt aber, dass die Nutzung anderer Verkehrsmittel emissionsenkend wirkt. So können wie oben beschrieben sogar von weit her importierte Güter ähnliche Emissionen haben wie ein Europaimport mit dem LKW, wenn sie grosse Teile der Strecke mit Schiff und Zug zurücklegen.

Aufgrund der zuvor genannten Aspekte ist deshalb auch die hohe Standardabweichung bei den Emissionen gerechtfertigt. Inhaltlich kann so gefolgert werden, dass theoretisch eine Wahlmöglichkeit zwischen hohen und niedrigen (innerhalb einer Quelle-Ziel-Beziehung) Transportemissionen besteht. Es ist dementsprechend meistens möglich, eine weniger emissionsintensive Logistikkette zu wählen.

Die Fallstudien zeigen im Detail aber auch noch Unplausibilitäten in den Modellergebnissen auf. So stimmen zwar die Relationen der einzelnen Emissionswerte der Birne der unterschiedlichen Herkunftsorte, einige der Transportrouten sind aber nur wenig plausibel. Gleiches gilt für die anderen Fallstudien. Als allgemeiner Grund dafür kann angeführt werden, dass sich das Modell in einem frühen Stadium befindet und noch nicht vollständig kalibriert werden konnte, zudem fehlen Vergleichswerte für die Emissionen und Kosten, mit denen eine solche Kalibrierung durchgeführt werden könnte. Eine



Verbesserung dieser Situation ist nur über eine Industriebeteiligung bei der Weiterentwicklung des Modells zu erreichen.

Auch die Modal-Splits sind nicht immer realistisch. Besonders bei den Rohstoffen der Pfanne überrascht der hohe Anteil der Bahn am Modal-Split, da subjektiv der grösste Teil des Weges durch einen Schiffstransport abgedeckt sein müsste. Dies ist zum einen den Umwegen in Europa geschuldet, die durch die Nutzung verschiedener Terminals und Rangierbahnhöfe verursacht werden. Zum anderen ist jedoch vermutlich auch die Modellierung der Infrastruktur mitverantwortlich. Da die Seerouten grösstenteils als gerade Linien (bzw. als Bögen auf einem Globus) modelliert werden, sind diese viel gerader und damit kürzer als teilweise sehr kurvige Bahnstrecken. Da in diesem Modell die tatsächlich zurückgelegte Distanz je Verkehrsmittel gezählt wird, kann dies den Modal-Split stark beeinflussen.

Infrastrukturmodellierung

Grundsätzlich ist die Infrastrukturmodellierung für ein globales Transportnetzwerk mit einem hohen Arbeitsaufwand verbunden. Zwar existieren mittlerweile brauchbare Daten zu öffentlich oder zumindest ausserhalb privater Netzwerke liegender Verlade- und Umschlaginfrastrukturen, wie beispielsweise Seehäfen, Flughäfen, Rangierbahnhöfe und intermodale Terminals, für Binnenhäfen beispielsweise fehlen diese jedoch. Noch prekärer ist die Situation bei privaten Anlagen, wie zum Beispiel Strassenlogistikzentren von Speditionen, Sortierzentren von Paketdiensten oder Distributionszentren von Detailhändlern. In dieser Machbarkeitsstudie wurden diese Infrastrukturen für die Schweiz mit kleinen Datensätzen (wie z.B. der Post) oder durch blosses Expertenwissen ergänzt. International werden im Modell grosse Teile dieser Infrastruktur vernachlässigt beziehungsweise für Binnenhäfen automatisiert bei grossen Städten generiert. Logistikzentren privater Unternehmen sind insbesondere im ersten und letzten Teil einer Transportkette relevant (im Vor- und Nachlauf), dementsprechend ist die Modellierung des Nachlaufs in der Schweiz infrastrukturell deutlich besser abgestützt als die Modellierung eines Vorlaufs ausserhalb der Schweiz. Die Auswirkungen auf das Modellergebnis sind schwierig abzuschätzen. Es ist aber davon auszugehen, dass Abweichungen entstehen können, besonders bei Importen aus dem europäischen Ausland, wo der Vorlauf ein grösseres Gewicht hat als bei Importen weiter entfernter Regionen. In den Fallstudien fällt dies insbesondere beim Birmentransport aus Südafrika oder beim Zinktransport aus Peru auf. Hier entstehen aufgrund geringer Infrastrukturverfügbarkeit zum Teil sehr unrealistische Routen. Das mag zum Teil einem tatsächlichen Fehlen von Infrastruktur geschuldet sein, ist aber vermutlich zu grossen Teilen auch eine Konsequenz der mangelnden Daten zu verfügbarer Infrastruktur. Dadurch werden auch in einigen Fallstudien gerade Routen erzeugt, die nicht mit dem Flugzeug absolviert werden. Das Modell findet in solchen Fällen keinen Transportweg zwischen zwei vorausgewählten Hubs. Da wir davon ausgehen, dass dies auch mangelnder Infrastrukturdaten geschuldet ist, behalten wir diese in den Ergebnissen trotzdem bei.

Trotz der vorhandenen Datensätze bleibt die Datenbeschaffung und Modellierung aufwändig. Die Bereinigung, Zusammenführung, Plausibilisierung und gegebenenfalls Ergänzung der Daten erfordert noch immer händische Arbeit durch Personen, die sich sowohl mit der Datenstruktur als auch mit Softwaretools zur Datenmanipulation auskennen. Das Modell auf dem aktuellen Stand zu halten, erfordert daher jährlich einen gewissen Aufwand, der sich jedoch nach dem Initialaufwand deutlich reduziert, solange die Datenbasis die Struktur nicht verändert. Zudem ist damit zu rechnen, dass sich die Datenbasis, zumindest für öffentlich zugängliche Infrastrukturen und für nicht ausschliesslich private Netzwerkinfrastrukturen, weiter verbessern wird – was die händische Arbeit verringern, aber wieder Initialaufwand verursachen wird. Insgesamt ist somit mit einem nicht unerheblichen Aufwand für die Unterhaltung der Infrastrukturdaten der Umschlaginfrastruktur für das Modell zu rechnen.

Ähnliches gilt für die Linieninfrastruktur des Transportnetzwerks, also für Strassen, Schienenwege, Binnenwasserstrassen, Seerouten und Flugrouten. Gegenüber der Umschlaginfrastruktur sind diese (fast) immer öffentlich zugänglich und Daten so einfacher zu finden. Dennoch tauchen besonders in Afrika, Lateinamerika und Asien noch Lücken auf. Insgesamt ist die Datengüte weltweit sehr unterschiedlich, die Auswirkungen auf die Ergebnisse des Modells können nicht quantifiziert werden, kön-



nen jedoch je nach Infrastruktur erheblich sein. Zudem sind die Routen, die nicht an physische Infrastruktur gebunden sind, also Flugrouten und Routen der Hochseeschifffahrt, vergleichsweise aufwändig in das Modell einbezogen. Beide werden über tatsächlich geflogene beziehungsweise gefahrene Routen integriert, was über moderne Websites, die Tracking beziehungsweise geplante Verbindungen anzeigen, möglich wird. Der Unterhalt des Modells ist deshalb auch an dieser Stelle eher aufwändig, da solche Quellen häufig ihre Struktur verändern und so die Datenextraktion angepasst werden müsste. Aber durch die im Rahmen dieses Projekts gesammelten Basisdaten steht eine gute Datenbasis zur Verfügung, die in Zukunft mit geringem Aufwand erweitert werden kann.

Für die gesamte Infrastruktur ist damit zwar ihre Topologie, im mathematischen Sinne also der Graph mit Knoten und Kanten, bekannt, jedoch fehlen weitgehend Informationen zur Qualität. Diese umfasst beispielsweise Kapazität und Zustand. In den Modellergebnissen kann zum Beispiel eine beträchtliche Nutzung einer Bahnverbindung durch Afrika für den Import von Birnen erkannt werden, da diese zumindest theoretisch eine direkte und preiswerte Alternative zum Schifftransport darstellt. In der Praxis wird diese Lösung vermutlich nicht einmal umsetzbar sein, da keine durchgehenden Güterzüge zwischen Süd- und Nordafrika verkehren können. Die Datenverfügbarkeit stösst bei solchen Qualitätsmerkmalen an ihre Grenzen, und damit auch das Modell bei der Auswahl der Routen. So ist die Bahnverbindung von China nach Europa durchaus eine Alternative zum Schifftransport, da die Infrastruktur in gutem Zustand ist und betrieblich durchgehende Transporte organisiert werden können. In dem zuvor beschriebenen Beispiel in Afrika ist sie das nicht, das Modell kennt diese Unterschiede jedoch bislang nicht und berücksichtigt in den jeweiligen Fallstudien daher beide Strecken gleichwertig. Auch technische und rechtliche Restriktionen (Spurweiten, Elektrifizierung, Zulassung von Zugtypen) sind bislang nicht integriert und können den Transport per Bahn weiter einschränken. Genauso ist dies für die Knoten, also die Umschlaginfrastrukturen, zu vermerken. Auch für diese ist keine Qualität erfasst. So wird zum Beispiel nicht berücksichtigt, dass die Kapazität und Zuverlässigkeit von Häfen in Europa differiert. Unterschiede in der Umschlagzeit können beispielsweise erhebliche Auswirkungen auf den Routenentscheid haben. Diese werden im Modell jedoch nur standardmässig für jeden Hub-Typ pauschal festgelegt. Auch die Kapazität der Punktinfrastrukturen verändert in der Realität die Verteilung über verschiedene Routen, kann jedoch im Modell nicht berücksichtigt werden. Darüber hinaus werden Grenzübertritte mit Einfuhrprozeduren nicht berücksichtigt, was teilweise Routen und Transportzeiten zu kurz erscheinen lässt.

Eine Aufnahme von Qualitätsmerkmalen der Infrastruktur wäre aufgrund der mangelnden Datenverfügbarkeit aufwändig, gleichzeitig sind die Auswirkungen auf das Modell, wie das Beispiel aus Afrika zeigt, jedoch regional von Bedeutung. Zudem ist eine umfangreiche Überprüfung der Netzwerktopologie angezeigt, um die sinnvollen Verknüpfungen der einzelnen Transportsysteme untereinander und mit den passenden Transportmitteln inklusive ihrer Emissionsintensitäten sicherzustellen.

Modellstruktur

Die gewählte Modellstruktur, die durch die sequenzielle Generierung von Logistikketten, die Auswahl von in den Logistikketten enthaltenen Hubs und die Suche nach Transportketten ausgezeichnet ist, kann die Grundherausforderung, dass Waren in Transportnetzwerken nicht dem kürzesten Pfad, sondern Pfaden bestimmter Unternehmensnetzwerke folgen, zufriedenstellend meistern. In allen Fallstudien ist deutlich sichtbar, dass Waren teilweise zuerst entgegen ihrer eigentlichen Bestimmungsrichtung in einen anderen Hub transportiert werden. Wie bereits in der Methodik erläutert, können so zwar nicht tatsächliche Unternehmensnetzwerke nachmodelliert werden, daraus resultierende Prozesse können im Grundsatz aber dargestellt werden. Somit ist die gewählte Modellstruktur also weitgehend in der Lage, realistische Prozesse im Modell abzubilden.

Gleichzeitig weist die gewählte Struktur jedoch auch Raum für Verbesserungen auf, der bei einer etwaigen Weiterentwicklung des Modells berücksichtigt werden sollte.

Die Logistikketten werden auf Teilketten generiert, die für verschiedene Transportfälle in zuvor spezifizierten Mustern zusammengesetzt werden. Die entscheidenden Parameter sind der Transportfall



(z.B. Europaimport, Überseeimport, Binnentransport usw.), die Luftdistanz zwischen Quelle und Ziel sowie die Verkehrsmittelaffinitäten. Dementsprechend werden beispielsweise für ein Gut, das von zwei verschiedenen Orten, die jedoch gänzlich unterschiedlich gelegen sind, aus Europa importiert wird, dieselben Logistikketten generiert, obwohl manche daraus entstehenden Transportrouten schlicht nicht machbar sind. Dies liegt auch daran, dass derzeit die Verkehrsmittelaffinität allein gut-spezifisch festgelegt wird, nicht relationsspezifisch. Das bedeutet, dass der Transport von Rasenmähern aus Deutschland dieselbe Affinität für einen Schiffstransport hat wie aus den USA. Insbesondere für Schiffstransporte führt zudem die Nicht-Unterscheidung von Binnen- und Hochseeschifffahrt zu einer Verstärkung des Problems mit gut- und nicht auch relationsspezifischen Verkehrsmittelaffinitäten. So zeigt sich beispielsweise beim Überseeimport aus Südafrika, dass das Modell den Zuganteil tendenziell überschätzt und den Schiffsanteil unterschätzt. Die Birnen werden über weite Strecken zu häufig mit der Bahn transportiert. Dies entspricht nicht der Realität. Ein grosser Teil der Birnen wird per Hochseeschiff nach Europa importiert. Das Beispiel Italien zeigt eine genau umgekehrte Problematik: Die Birnen werden zu häufig per Schiff transportiert und zu wenig mit Bahn und LKW. So sieht man häufig Routen, auf denen die Birnen nur wenige hundert Kilometer im Golf von Genua oder in der Adria transportiert werden.

Weiterhin hat diese Affinität nur Auswirkungen auf die Generierung der Logistikketten, nicht jedoch auf die Gewichtung der einzelnen Transportrouten. Hier wurde davon ausgegangen, dass durch die Berücksichtigung der Kosten bereits ein möglichst nah an der Realität liegendes Ergebnis erzielt werden kann. Nach Betrachtung der Fallstudien muss jedoch ergänzt werden, dass allein über die Betrachtung der Kosten eher unrealistische Transportwege nicht ausgeschlossen werden. Eine Berücksichtigung der Verkehrsmittelaffinität auf Ebene der Transportrouten erscheint deshalb notwendig.

Zudem ist zu berücksichtigen, dass es durch die sequenzielle Abfolge der einzelnen Modellschritte in einzelnen Fällen zu unmöglichen Transportrouten kommen kann. So kann das Modell zum Beispiel bei einem Bahnsegment in Marokko ein Hub in Italien auswählen, zu dem keine Bahnverbindung besteht. In solchen Fällen wird diese Route über die direkte Distanz angenähert. Eine Neugenerierung des Transportweges ist bisher nicht vorgesehen, weil diese Schritte aufgrund des unterschiedlichen Rechenaufwands auf unterschiedlichen Computern ausgeführt werden (lokaler Computer bzw. Server), was aber in Zukunft integriert werden könnte.

Bei der Gewichtung der einzelnen Transportwege wird der Kehrwert der generalisierten Kosten als Gewichtungsfaktor verwendet. So kann sichergestellt werden, dass sehr teure Routen weniger stark gewichtet werden als günstige Routen. Durch dieses generalisierte Verfahren werden jedoch keine Routen komplett ausgeschlossen, was bei niedrigen Wahrscheinlichkeiten vermutlich eher der Realität entsprechen würde. Weiterhin erfolgt so eine lineare Gewichtung der einzelnen Transportrouten. Eine Route, die doppelt so teuer ist wie eine andere Route, kommt dementsprechend halb so oft vor. Es ist jedoch durchaus möglich, dass die Preisgewichtung in der Realität stärker als proportional ist und die Gewichtung im Modell damit auch eher stärker ausfallen müsste. Dazu fehlen jedoch bisher die Grundlagen.

Berücksichtigte Parameter

Das Modell bietet eine generalisierte Betrachtung der Zusammenstellung von Logistikketten und Transportrouten an. Es ist damit universell einsetzbar und erfüllt damit den Zweck eines global anwendbaren Modells. Die wichtigsten Parameter Kosten und Zeit werden grundsätzlich berücksichtigt. Weitere Qualitätsparameter, die für viele Logistikentscheide jedoch von Bedeutung sind und damit auch die Modellergebnisse beeinflussen würden, werden bisher nicht einbezogen. Dazu gehört insbesondere die Losgrösse, die beeinflusst, welche Verkehrsmittel überhaupt in Frage kommen. Erst wenn die transportierte Menge auf einer Relation mindestens eine Wagenladung gross ist, lohnt sich zum Beispiel der Einsatz der Bahn. Dies wird im Modell zwar teilweise durch die Verkehrsmittelaffinität berücksichtigt, jedoch wird im Grundsatz davon ausgegangen, dass die Losgrösse so gross ist, dass der



Transport mit allen Verkehrsmitteln sinnvoll ist. Insbesondere für Güter, die nicht mit anderen kombiniert werden können (z.B. in Containern mit anderen Containern), also beispielsweise Schüttgüter wie Bergbauerzeugnisse oder Getreide, ist dies von Bedeutung.

Auch weitere Qualitätsparameter, die in die generalisierten Kosten mit einfließen würden, werden bisher nicht berücksichtigt. Dazu gehören die Frequenz von Transporten, die Zuverlässigkeit, die Flexibilität, die Sicherheit und zuletzt auch die Möglichkeit der Datenintegration sowie der Verwaltungsaufwand. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Einbezug dieser Parameter den eher hohen Anteil von Schiff und Schiene am Modal-Split merklich senken würde. Gleichzeitig muss an dieser Stelle jedoch betont werden, dass der Einbezug methodisch schwieriger ist als der bisher integrierte Parameter und auch die Datenverfügbarkeit deutliche Schwachstellen hat. So gibt es weder eine Datenbank, die darüber Auskunft gibt, welche Parameter für welches Gut wie wichtig sind, noch ist auf Seiten des Transportnetzwerks bekannt, wie diese zur Verfügung gestellt werden. Eine Abschätzung der Transportzeit ist auf Basis der bekannten Infrastrukturinformationen und einer Annahme der Umschlagzeiten reliabel möglich. Auch eine Schätzung der Kosten ist möglich. Dasselbe ist für die zuvor genannten Parameter praktisch nicht möglich, oder eine Datengrundlage wäre nur mit extremem Aufwand zusammenzustellen.

Ebenfalls nicht berücksichtigt wird die mögliche Packdichte der untersuchten Güter. Die meisten Konsumgüter sind für die Transportmittel nicht im Gewicht, sondern im Volumen limitiert. Dies kann im Modell bisher nicht berücksichtigt werden. Tendenziell ist davon auszugehen, dass eine Berücksichtigung zu eher höheren Emissionen führen würde. Diese Nicht-Berücksichtigung gleicht aber möglicherweise die teilweise sehr gering angenommene Auslastung nach Gewicht wieder aus, da diese tatsächlich aufgrund der Volumenlimitierung eher gering ausfällt.

Bisher nicht berücksichtigt werden Mautkosten als direkter Preisfaktor. Beim Import in die Schweiz aus Nordeuropa zeigt sich, dass auch Lastwagenrouten oftmals durch Frankreich verlaufen. In der Realität wäre dieser Anteil vermutlich geringer, da die Mautkosten in Frankreich deutlich höher sind als in Deutschland und die Distanzvorteile marginal sind.

Ebenfalls fällt in allen Fallstudien auf, besonders beim Blick auf die innereuropäischen Teile, dass Grenzübertritte im Modell nicht negativ gewichtet werden, was teilweise sinnvoll und teilweise auch problematisch sein kann. Beim Import aus Nordamerika werden zum Beispiel einige Transportrouten durch Grossbritannien erzeugt. In der Realität würde dies vermutlich nicht stattfinden, da so trotz schneller oder kostensparender Transportwege zusätzliche Zollkontrollen notwendig würden, was wiederum Zeit kostet und den Preis erhöht. Auch die generierten Transportketten im Binnentransport, die einen Hub in Deutschland beinhalten, würden aus demselben Grund wahrscheinlich sehr selten vorkommen. Diese Problematik kann durch eine Berücksichtigung von Grenzübertritten bei den Kosten vermindert werden.

Die Emissionsberechnung basiert auf den berechneten Transportwegen, das heisst auf der zurückgelegten Distanz je Transportmittel, und bezieht, soweit verfügbar, länderspezifische Daten zur Flottenzusammensetzung oder zum Anteil elektrifizierter Schienenwege mit ein. Liegen die Daten nicht vor, so werden Standardwerte angenommen, wobei besonders weitere Daten für Regionen in Afrika, Südamerika oder Teile von Asien die Qualität des Modells positiv beeinflussen würden. Um die Nutzung unterschiedlicher Transportmittel, insbesondere verschieden grosser Strassenfahrzeuge und verschieden langer Züge zu berücksichtigen, werden mithilfe der Monte-Carlo-Simulation verschiedene Kombinationen berechnet, die zusammen zu einem robusten Endresultat führen. Die Berechnung könnte weiter verfeinert werden, beispielsweise durch die Berücksichtigung infrastruktureller Gegebenheiten auf den tatsächlich verwendeten Strecken oder des typischen Verkehrsaufkommens, das die Emissionen der Strassenfahrzeuge massgeblich beeinflusst. Zudem sind die Verteilungen der Emissionsintensitäten stark vereinfacht abgebildet, indem zum Beispiel länderspezifische Unterschiede in den Flottenzusammensetzungen oder Häufigkeitsverteilungen unterschiedlicher Flugzeugtypen noch nicht berücksichtigt sind. Auch wenn die verwendeten Daten hier plausibel sind, sind sie doch bei Weitem



noch nicht umfangreich genug, um global repräsentativ zu sein. Zudem ist eine Kopplung von Emissionsintensität, Brennstoffverbrauch und Kosten zu erwarten, die im Modell bisher noch nicht richtig berücksichtigt wird, teure und hoch-emittierende Transportmittel und Transportwege aber weiter unwahrscheinlich werden lässt. Auch hier bietet sich weiteres Verbesserungspotenzial.

3.3 Fazit und Empfehlung zum Schätzmodell für Logistikemissionen

Das hier entwickelte Modell zur Schätzung von Emissionen in der Logistik erfüllt die gestellten Anforderungen. Ohne genaue unternehmensspezifische Daten zu kennen, ist es in der Lage, die Logistikemissionen plausibel zu schätzen. In den Fallstudien wurde dabei auf CO₂ aus Transportleistungen fokussiert, jedoch ist der Einsatz auch für speziell gekühlte Lagerung und gekühlten Transport vorbereitet. So können alle Logistikfunktionen, die massgeblich für CO₂-Emissionen verantwortlich sind, berechnet werden. Eine Erweiterung des Modells, zum Beispiel zur Schätzung von Feinstaubemissionen oder Umweltbelastungspunkten, ist mit der vorhandenen Struktur möglich.

Der gewählte Ansatz erlaubt die Untersuchung verschiedener Logistikketten und verschiedener Transportwege. In den Fallstudien wurde dazu eine gesamthafte Auswertung demonstriert, weiterhin möglich sind auch spezifischere Analysen, beispielsweise wenn zwei verschiedene Transportwege oder Korridore miteinander verglichen werden sollen. Das Beispiel der Pfanne beweist, dass auch komplexe Lieferketten mit dem Modell abgebildet und ausgewertet werden können. Werden dafür Daten bereitgestellt, können auch spezifische Unternehmensnetzwerke untersucht werden.

Der Ansatz, eine Monte-Carlo-Simulation und damit zufällige Komponenten in die Berechnung beziehungsweise Schätzung von CO₂-Emissionen einzubeziehen, ist nach bestem Wissen der Autoren ein Novum. Das Modell berücksichtigt hier demnach nicht nur einen idealen Fall oder einen spezifisch realisierten Fall, sondern bildet einen realistischen Mittelwert über mehrere Tage beziehungsweise Transportfälle ab. So können Fluktuationen in der Benutzung von Verkehrsmitteln einbezogen werden. In Zukunft könnten hier auch Staustunden oder Lagerzeiten mitberücksichtigt werden. Damit bietet das Modell eine realitätsnähere Schätzung der Emissionen an, als es ein deterministisches Berechnungstool leisten kann, da eben nicht nur die Idealsituation einbezogen wird.

Das Modell ist global einsetzbar, für die Fallstudien wurde die Infrastruktur der Schweiz etwas detaillierter modelliert. Die benötigten Inputparameter beschränken sich im Wesentlichen auf Quelle und Ziel, die Verkehrsmittelaffinitäten des Guts, die Luftdistanz zwischen den Orten (diese könnte jedoch auch mit einer Ergänzung automatisch berechnet werden) und darauf, ob es sich um ein Massengut oder um eine KEP-Sendung handelt. Die restlichen Parameter, wie beispielsweise der Zeitwert, sind optional und bei Nicht-Eingabe im Modell hinterlegt. Es ist also mit sehr einfachen Informationen möglich, die CO₂-Emissionen abzuschätzen. Dazu ist ein sehr generalisiertes Modell notwendig, was auch Nachteile mit sich bringt. Diese wurden im vorherigen Kapitel ausführlich diskutiert. Generell bietet das Modell pro Relation reliable Ergebnisse an. Sollen kleinere Analysen vorgenommen werden, stösst es an seine Grenzen, da die Generalisierungen die Fehleranfälligkeit erhöhen. Hierbei muss jedoch abgewogen werden, dass ein detaillierteres Modell mit zum Beispiel Infrastrukturgenauen Emissionsparametern oder Qualitätsmerkmalen auch einen deutlich höheren Datenbedarf und damit auch einen deutlich höheren Aufwand für die Datensammlung und -aufbereitung aufweist.

Auch die identifizierten Probleme in der Modellstruktur lassen sich auf eine teilweise zu starke Generalisierung zurückführen, gleichsam ist auch hier eine Detaillierung datenabhängig. Ein einfacher Ansatz, um beispielsweise eher unrealistische Schiffstransporte in Europa zu verringern, ist die vertiefte Anwendung der Verkehrsmittelaffinität. Diese wird derzeit nur für die Berechnung der Logistikketten verwendet. Ein Einbezug in die Gewichtung der berechneten Transportwege kann unrealistisch hohe Anteile von Schiff und Zug senken, ohne Qualitätsmerkmale genauer modellieren zu müssen. Dazu wird lediglich eine Definition der Verkehrsmittelaffinität pro Relation und Gut und nicht nur pro Gut benötigt. Sie lässt sich relativ einfach von Experten/-innen abschätzen und könnte, ähnlich wie der Zeitwert bei Ausbleiben einer manuellen Eingabe, auf Basis genereller Kriterien festgelegt werden.



Spezifischere Probleme, wie zum Beispiel die Gleichbehandlung von Hochsee- und Binnenschifffahrt oder die Selektion nicht fahrbarer Routen, lassen sich bei einer Weiterentwicklung des Modells ebenfalls lösen, ohne die Modellstruktur in Frage stellen zu müssen.

Zusammenfassend ist damit die Machbarkeit eines Modells zur Schätzung von Emissionen ohne Kenntnis von Unternehmensdaten in der Logistik gegeben. Eine Weiterentwicklung sollte aufgrund der hohen Datenanforderungen den Detailgrad des Modells nicht über zusätzliche Informationen, sondern über bessere Verwertung bereits verwendeter Informationen erhöhen. Es ist zu erwarten, dass sich dadurch noch einmal schwerwiegende Verbesserungen erzielen lassen. Einzig die Problematik der unterschiedlichen Infrastrukturqualität von Strecken beziehungsweise Routen und Knoten kann nicht modellseitig, sondern nur datenseitig gelöst werden. Ihre Auswirkungen auf das Modell sind in vielen Fällen jedoch vermutlich begrenzt und in spezifischen Fällen gut sichtbar (z.B. Schienentransport durch Afrika). Eine manuelle Anpassung ist in solchen Fällen zumindest vorerst eine praktikable Lösung.

Auch in zwei informellen Gesprächen mit Unternehmen wurde das Modell grundsätzlich positiv bewertet. Beide Unternehmen berechnen ihre Emissionen in der Logistik zwar bereits mit ihren eigenen Unternehmensdaten, signalisieren aber, dass ein solches Tool bei nicht bekannten Prozessschritten hilfreich sein kann und viele, vor allem kleinere Unternehmen, auf ein einfaches Tool angewiesen sind, um Emissionen schätzen und ausweisen zu können. Der Ansatz des Modells wird gutgeheissen, dabei werden besonders der globale Ansatz und die generelle Anwendbarkeit des Modells gelobt. An dieser Stelle soll noch darauf hingewiesen werden, dass das hinterlegte Transportnetzwerk in diesem Modell auf die Bedürfnisse einzelner Unternehmensnetzwerke angepasst werden kann. So können Unternehmensnetzwerke für Analysen für einzelne Unternehmen speziell berücksichtigt werden.

Eine einfach umsetzbare Verbesserung, die zu grösseren Sprüngen bei der Qualität führen können, ist die Trennung von Hochsee- und Binnenschifffahrt, die unrealistische kurze Binnenschifffahrtsrouten innerhalb Europas ausschliessen lässt. Ein weiterhin grosser Einfluss kann durch die bessere Implementierung der Packdichte der Güter auf die Qualität der Ergebnisse genommen werden. Um das Modell nun zur Anwendung zu bringen, sind insbesondere diese Punkte zu berücksichtigen. Des Weiteren sollte ein einfaches Interface zur Anwendung erstellt werden und auch die Auswertung der Ergebnisse weiter automatisiert werden.

Aus den Ergebnissen lassen sich auch Handlungsempfehlungen für Unternehmen ableiten, wie sie ihre Emissionen im Transport senken können. Es zeigt sich, dass emissionsarm aus Übersee importierte Produkte weniger emissionsintensiv sein können als Europaimporte, wenn diese auf LKW-Transporten basieren. Dementsprechend ist hier darauf zu achten, dass auch bei Europaimporten emissionsarme Transportmittel verstärkt in Betracht gezogen werden, da so zusätzlich Energie eingespart werden kann. Als weitere einfache Handlungsempfehlung lässt sich das Ansetzen an den emissionsstärksten Gliedern der Lieferkette formulieren. Bei der Pfanne ist es deutlich effektiver, Anstrengungen zu unternehmen, Erz und Kohle aus Europa zu importieren oder verstärkt auf europäischen Recyclingstahl zu setzen, anstatt viel Aufwand in eine emissionsarme Auslieferung zu stecken.



4 Literaturverzeichnis

- Agora (2022): Intermodal Terminals in Europe. <https://www.intermodal-terminals.eu/database/>
- Airline Route Maps (undatiert): <https://www.airlineroutemaps.com/maps/FedEx>
- Ajzen, I. (1991): The theory of planned behaviour, in: Organizational Behavior Human Decision Processes 50(2), 179–211. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/074959789190020T>
- APM Terminals (2022): Inland Services South Africa - Locations. <https://www.apmterminals.com/en/south-africa/about/locations>
- Artho, J.; Jenny, A.; Karlegger, A. (2012): Wissenschaftsbeitrag. Energieforschung Stadt Zürich, Bericht Nr. 6, Forschungsprojekt FP-1.4, Zürich.
- BAFU – Bundesamt für Umwelt. (2017): Emissionen von Treibhausgasen nach revidiertem CO₂-Gesetz und Kyoto-Protokoll, 2. Verpflichtungsperiode (2013–2020).
- BAFU – Bundesamt für Umwelt; MeteoSchweiz – Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (2020): Klimawandel in der Schweiz. Indikatoren zu Ursachen, Auswirkungen, Massnahmen. Umwelt-Zustand Nr. 2013, Bern.
- Baumgärtner, N.; Deutz, S.; Reinert, C.; Nolzen, N.; Kuepper, L.; Hennen, M.; Hollermann, D.; Bardow, A. (2021): Life-Cycle Assessment of Sector-Coupled National Energy Systems: Environmental Impacts of Electricity, Heat, and Transportation in Germany Till 2050, in: Frontiers in Energy Research, 9. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.621502>.
- BFE – Bundesamt für Energie (2020): Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000–2019 nach Verwendungszwecken, Bern.
- Borken-Kleefeld, J. (2012): Default transport data per commodity group for the US and EU27 – Methodology and notes on data for ecoinvent. ecoinvent Centre, Zürich, Switzerland.
- Bowen, J. T. (2012): A spatial analysis of FedEx and UPS: hubs, spokes, and network structure, in: Journal of Transport Geography 24 (2012), 419–431. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0966692312001299>.
- CN (2022): Maps and network. <https://www.cn.ca/en/our-services/maps-and-network/intermodal-terminals/>.
- coop (2022): Adressen der Coop-Verwaltung. <https://www.coop.ch/de/unternehmen/ueber-uns/adressen.html>.
- Cox, B. (2018): Mobility and the Energy Transition: A Life Cycle Assessment of Swiss Passenger Transport Technologies including Developments until 2050. Dissertation, ETH Zürich, Switzerland. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000276298>.
- Cox, B.; Mutel, C.; Bauer, C.; Mendoza Beltran, A.; van Vuuren, D. (2018): Uncertain Environmental Footprint of Current and Future Battery Electric Vehicles, in: Environ. Sci. Technol. 52, 8, 4989–4995. <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.est.8b00261>.
- Cremer, A.; Berger, M.; Müller, K.; Finkbeiner, M. (2021): The First City Organizational LCA Case Study: Feasibility and Lessons Learned from Vienna, in: Sustainability 2021, 13(9). <https://doi.org/10.3390/su13095062>.
- Croci, E.; Donelli, M.; Colelli, F. (2021): An LCA comparison of last-mile distribution logistics scenarios in Milan and Turin municipalities, in: Case Studies on Transport Policy, Volume 9 Issue 1, 181–190. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2020.12.001>.



- Cronje, E.; Matthee, M.; Krugell, W. (2009): The role of dry ports in South Africa, in: Transport and Communications Bulletin for Asia and the Pacific, No. 78, 112–120. https://www.unescap.org/sites/default/d8files/bulletin78_Article-7.pdf.
- CSX (2022): Intermodal maps. <http://www.intermodal.com/index.cfm/intermodal-maps/>.
- de Jong, G., Vierth, I., Tavasszy, L., & Ben-Akiva, M. (2013): Recent developments in national and international freight transport models within Europe. *Transportation*, 40(2), 347–371. <https://doi.org/10.1007/s11116-012-9422-9>.
- Demarque, C.; Charalambides, L.; Hilton, D.; Waroquier, L. (2015): Nudging sustainable consumption: The use of descriptive norms to promote a minority behavior in a realistic online shopping environment, in: *Journal of Environmental Psychology*, 43 (2015), 166–174.
- Department for Environment Food and Rural Affairs UK (2009): Greenhouse Gas Impacts of Food Retailing.
- DHL (undatiert): DHL Express in the U.S. https://dhlpro.com/media/37004/dhl-express-usa-overview_en.pdf.
- Die Post (2022): Open Data Portal of Swiss Post. <https://swisspost.opendatasoft.com/>.
- Dijkstra, E. W. (1959): A note on two problems in connexion with graphs, in: *Numerische Mathematik*, 1, 269–271.
- EPA (2023): Emission Factors for Greenhouse Gas Inventories. https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-03/ghg_emission_factors_hub.pdf.
- Europäische Kommission. (2013): COFRET-Carbon footprint of freight transport, Berechnungen von CO₂-Emissionen für Lieferketten verbessern.
- Faria, R.; Marques, P.; Moura, P.; Freire, F.; Delgado, J.; de Almeida, A. (2013): Impact of the electricity mix and use profile in the life-cycle assessment of electric vehicles, in: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 24, August 2013, 271–287. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.063>.
- Fechner, W.; Herder, E. (2021): Digital Nudging for More Ecological Supermarket Purchases. In *Adjunct Proceedings of the 29th ACM Conference on User Modeling, Adaptation and Personalization (UMAP '21 Adjunct)*, 21–25 June 2021, Utrecht. <https://doi.org/10.1145/3450614.3464620>.
- FedEx (2002): FedEx Express Global Hubs. <https://web.archive.org/web/20021109110334/http://www.fedex.com/us/about/news/hubs.pdf>.
- FedEx (2007): FedEx Express Gateway for Central & Eastern Europe Moves to Cologne. <https://newsroom.fedex.com/newsroom/europe-english/fedex-express-gateway-for-central-eastern-europe-moves-to-cologne>.
- Ferromex (2022): Ferromex moves it, What do we transport? Intermodal. <https://ferromex.com.mx/ferromex-lo-mueve-eng/intermodal.jsp>.
- FlightConnections. (2022). FlightConnections.
- Frischknecht, R.; Bauer, C.; Froemelt, A.; Hellweg, S.; Biemann, K.; Buetler, T.; Cox, B.; de Haan, P.; Hoerl, S.; Itten, R.; Jungbluth, N.; Ligen, Y.; Mathys, N. A.; Schiess, S.; Schori, S.; van Loon, P.; Wang, J.; Wettstein, S. (2018): LCA of mobility solutions: approaches and finding. 66th LCA forum, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, 30 August 2017, in: *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 23, 381–386. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-017-1429-1>.
- Froemelt, A.; Buffat, R.; Hellweg S. (2020): Machine learning based modeling of households. A regionalized bottom-up approach to investigate consumption-induced environmental impacts, in: *Journal of Industrial Ecology*; 24, 639–652. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/jiec.12969>.



- Froemelt, A.; Dürrenmatt, D. (2018): Using Data Mining To Assess Environmental Impacts of Household Consumption Behaviors, in: *Environ. Sci. Technol.*, 52, 8467–8478. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29933691/>.
- Funk, A.; Sütterlin, B.; Siegrist, M. (2021): Consumer segmentation based on Stated environmentally-friendly behavior in the food domain, in: *Sustainable Production and Consumption*, 25, 173–186. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352550920303997>.
- Götz, K.; Haefeli, U.; Meierhans, D. (2019): Mobilitätsverhalten, in: *Leitungsgruppen der Nationalen Forschungsprogramme «Energiewende» (NFP 70) und «Steuerung des Energieverbrauchs» (NFP 71)* (Hrsg.): NFP Energie. <https://www.nfp-energie.ch/de/key-themes/199/synthese>.
- GS1. (2013). *Einblick in den Schweizer Logistikmarkt 2014*.
- Haefeli, U.; Lutzenberger, M.; Götz, K. (2021): *Treibende Kräfte im Freizeitverkehr*, Forschungsprojekt SVI 2017/008, Bern/Luzern.
- Haefeli, U.; Artho, J.; de Haan, P.; Arnold, T. (2020a): *Autolose Haushalte in der Stadt Zürich*. Energieforschung Stadt Zürich, Bericht Nr. 60, Forschungsprojekt FP-1.25, Zürich.
- Haefeli, U.; Studer, S.; Oechslin, L.; Artho, J. (2020b), *Verkehr der Zukunft 2060: Folgen der demografischen Alterung für den Verkehr*, Forschungsprojekt SVI 2017/001, Bern/Luzern.
- Haefeli, U.; Arnold, T.; Gubser, J. (2022): *Einstellungen zum Online-Handel und zu Paketboxen im Quartier*. Befragung im Kanton Zürich. Fallstudie im Rahmen des BFE-Forschungsprojekts INTRALOG_ECO (Integration of Transport and Logistics Energy-Consumption in Consumers Decisions); Luzern.
- Haefeli, U.; Arnold, T.; Gubser, J. (2023): *Befragung der Nutzenden der SmartBox Basel*. Fallstudie im Rahmen des BFE-Forschungsprojekts INTRALOG_ECO (Integration of Transport and Logistics Energy-Consumption in Consumers Decisions), Luzern.
- Hansen, P. G.; Jespersen, A. M. (2013): Nudge and the manipulation of choice: A framework for the responsible use of the nudge approach to behaviour change in public policy, in: *European Journal of Risk Regulation*, 4(1), 3–28.
- Hellweg, S.; Milà i Canals, L. (2014): Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment, in: *Science*, Vol 344, Issue 6188, 1109–1113. <https://www.sciencedirect.com/science/doi/10.1126/science.1248361>
- Hemmati, M.; Messadi, T.; Gu, H. (2022): Life Cycle Assessment of Cross-Laminated Timber Transportation from Three Origin Points, in: *Sustainability* 2022, 14(1), 336. <https://doi.org/10.3390/su14010336>.
- IEA (2022): *Extended World Energy Balances*. <https://doi.org/10.1787/data-00513-en>
- Ickert, L.; Althaus, H.-J.; Knörr, W.; & Bergk, F. (2017): *Beitrag des Güterverkehrs zur Erreichung der Schweizer Klimaziele [Kurzbericht]*. Bundesamt für Verkehr (BAV).
- ifeu Heidelberg, INFRAS Bern, & IVE Hannover. (2019). *Ecological Transport Information Tool for Worldwide Transports (EcoTransIT): Methodology Report Short version Update 2019*. EcoTransIT World Initiative (EWI).
- INFRAS. (2022): *Handbuch für Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs (HBEFA)*, Version 4.2. <https://www.hbefa.net/d/index.html>
- Ingrao, C.; Scrucca, F.; Matarazzo, A.; Arcidiacono, C.; Zabaniotou, A. (2021): Freight transport in the context of industrial ecology and sustainability: evaluation of uni- and multi-modality scenarios via life cycle assessment, in: *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26, 127–142. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-020-01831-8>.



- Intek Freight and Logistics (2022): Intermodal Network Map. <https://www.intekfreight-logistics.com/intermodal-network-map>.
- ISO 14040—Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework (1:2006). (2006).
- ISO 14064—Greenhouse gases—Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals (1:2018). (2018).
- ISO 14083—Greenhouse gases—Quantification and reporting of greenhouse gas emissions arising from transport chain operations (ISO 14083; Version 2023). (2023). ISO (2006b): ISO 14044:2006 – Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. <https://www.iso.org/standard/38498.html>.
- Jensen, A. F.; Thorhauge, M.; De Jong, G.; Rich, J.; Dekker, T.; Johnson, D.; Cabral, M. O.; Bates, J.; & Nielsen, O. A. (2019): A disaggregate freight transport chain choice model for Europe. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 121, 43–62. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.10.004>.
- Jourquin, B., & Beuthe, M. (2019): Cost, transit time and speed elasticity calculations for the European continental freight transport. *Transport Policy*, 83, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2019.08.009>.
- Kahneman, D.; Tversky, A. (1979): Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk, in: *Econometrica*, Vol. 47, No. 2, 263–291.
- Känzig, J.; Jolliet, O. (2006): Umweltbewusster Konsum: Schlüsselentscheide, Akteure und Konsummodelle, *Umwelt-Wissen* Nr. 16/06, Bundesamt für Umwelt, Bern.
- Kohnen, W. (2005): Wasserstrassenkarte Europa. <http://www.werner-kohnen.de/html/wasserstrasse.html> (accessed on 2022-08-22).
- Lembcke, T.-B.; Engelbrecht, N.; Willnat, M.; Lichtenberg, S. (2020): Behavioral Design in Online Supermarkets: How Virtual Shopping Cart Functions Impact Sustainable Consumption. *AMCIS 2020*. https://aisel.aisnet.org/amcis2020/sig_hci/sig_hci/2.
- Lévová, T. (2015): Freight transport with intermodal shipping containers and transport of goods in need of atmosphere control, *ecoinvent database version 3.2*, ecoinvent Centre, Zürich.
- Liu, Y.; Xu, C. (2021): Consumer intention to purchase and corporate social responsibility: Evidence from an experiment in an entrepreneurial context, in: *Consumer Behaviour*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/cb.1987>.
- Lubowiecki-Vikuk, A.; Dabrowska, A.; Machnik, A. (2021): Responsible consumer and lifestyle: Sustainability insights, in: *Sustainable Production and Consumption*, 25, 91–101. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352550920304371?via%3Dihub>.
- Marquez, L.; Estrada-Flores, S.; Higgins, A. (2011): Development of a Fruit & Vegetable Supply Chain Emissions Model for Victoria. Conference: First International Workshop on Food Supply Chains. <https://publications.csiro.au/rpr/pub?list=BRO&pid=csiro:EP113018>.
- Menten, F.; Cheze, B.; Patouillard, L.; Bouvart, F. (2013): A review of LCA greenhouse gas emissions results for advanced biofuels: The use of meta-regression analysis, in: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 26, 108–134. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.04.021>
- Meyerding, S. G. H.; Schaffmann, A.-L.; Lehberger, M. (2019): Consumer Preferences for Different Designs of Carbon Footprint Labelling on Tomatoes in Germany – Does Design Matter?, in: *Sustainability*, 11(6), 1587. <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/6/1587>.
- Migros (2022): Verteilbetriebe. <https://corporate.migros.ch/de/migros-gruppe/verteilbetriebe.html>.



- mobitool (2023): mobitool-Faktoren v3.0 – Die Excel-Datenbank mit aufbereiteten ecoinvent-Umweltdaten und Emissionsfaktoren (Update 2023). <https://www.mobitool.ch/de/tools/mobitool-faktoren-v3-0-25.html>.
- National Geospatial-Intelligence Agency (2019): Nautical publications – World Port Index. Pub. 150. <https://msi.nga.mil/Publications/WPI>.
- Natural Earth (2022a): Railroads v4.0.0. <https://www.naturalearthdata.com/downloads/10m-cultural-vectors/railroads/>.
- Natural Earth (2022b): Airports v5.0.0. <https://www.naturalearthdata.com/downloads/10m-cultural-vectors/airports/>.
- Oberschelp, C.; Pfister, S.; Raptis, C.; Hellweg, S. (2019): Global emission hotspots of coal power generation, in: Nature Sustainability, 2, 113–121. <https://www.nature.com/articles/s41893-019-0221-6>.
- Ohnmacht, T.; Schaffner, D.; Weibel, C.; Schad, H. (2017): Rethinking social psychology and intervention design: A model of energy savings and human behavior, in: Energy Research & Social Science, 26, 40–53.
- Pani, A.; Sahu, P. K.; Holguín-Veras, J. (2021): Examining the determinants of freight transport emissions using a fleet segmentation approach, in: Transportation Research Part D: Transport and Environment, Volume 92. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102726>.
- Planzer (2022): Both sides of the border: Our locations. <https://www.planzer.ch/en/about-us/locations/>.
- Pfohl, H.-C. (2010). Logistiksysteme: Betriebswirtschaftliche Grundlagen. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-04162-4>.
- Qin, Y.; Horvath, A. (2022): What contributes more to life-cycle greenhouse gas emissions of farm produce: Production, transportation, packaging, or food loss?, in: Resources, Conservation and Recycling, Volume 176. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105945>.
- Rodrigue, J.-P. (2020): Hubs of Major Air Freight Integrators. <https://transportgeography.org/contents/chapter6/airport-terminals/hubs-air-freight-integrators/>.
- Roos, S.; Zamani, B.; Sandin, G.; Peters, G. M.; Svanström, M. (2016): A life cycle assessment (LCA)-based approach to guiding an industry sector towards sustainability: the case of the Swedish apparel sector, in: Journal of Cleaner Production, Volume 133, 691–700. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.146>.
- Ruesch, M.; Haefeli, U. (2018): Energy efficient and CO₂-free Urban Freight Logistics. Scientific Report for the project Energy efficient and CO₂-free Urban Freight Logistics in the framework of NRP 71 Steering Energy Consumption.
- Ruesch, M.; Haefeli, U.; Schmid, T.; Bohne, S. (2016): Freight Transport with Vans: Developments and Measures. Scientific Paper for the City Logistics Conference 2015 on Tenerife, Spain, in: Transportation Research Procedia, 12, 79–92. https://www.researchgate.net/publication/299459784_Freight_Transport_with_Vans_Developments_and_Measures.
- Ruesch, M.; Haefeli, U. et al. (2017): A 2050 Vision for Energy efficient and CO₂-free Urban Logistics. Scientific Paper for the City Logistics Conference 2017 on Phuket Island, Thailand
- Sacchi, R.; Bauer, C.; Cox, B. (2021): Does Size Matter? The Influence of Size, Load Factor, Range Autonomy, and Application Type on the Life Cycle Assessment of Current and Future Medium- and Heavy-Duty Vehicles, in: Environ. Sci. Technol. 55, 8, 5224–5235. <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.est.0c07773>.



- Sacchi, R.; Terlouw, T.; Siala, K.; Dirnaichner, A.; Bauer, C.; Cox, B.; Mutel, C.; Daioglou, V.; Luderer, G. (2022): PRospective EnvironMental Impact asSEment (premise): a streamlined approach to producing databases for prospective Life Cycle Assessment using Integrated Assessment Models. <https://chemrxiv.org/engage/chemrxiv/article-details/61fbf3b57a054a32ca011149>.
- Sacchi, R.; Bauer, C. (2023): Life-cycle inventories for on-road vehicles. Villigen, Switzerland. https://www.mobitool.ch/admin/data/files/marginal_download/file_de/34/vehic-lelca_psi_2023.pdf?lm=1680515567.
- SEDAC (2013): Global Roads Open Access Data Set, Version 1 (gROADSv1). NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC), Columbia University, New York. <https://doi.org/10.7927/H4VD6WCT>.
- Smyth (2020): List of United Parcel Service Hubs. <https://bizfluent.com/info-8452377-list-united-parcel-service-hubs.html> (accessed on 2022-08-18).
- Sohn, J.; Nielsen, K. S.; Birkved, M.; Joanes, T.; Gwozdz, W. (2021): The environmental impacts of clothing: Evidence from United States and three European countries, in: Sustainable Production and Consumption, Volume 27, 2153–2164. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.05.013>.
- Stadelmann, M.; Schubert, R. (2018): How Do Different Designs of Energy Labels Influence Purchases of Household Appliances? A Field Study in Switzerland, in: Ecological Economics, vol. 144, 112–123.
- Steinemann, M.; Schwegler, R. X.; Spescha, G.; Iten, R. (2015): Marktbeobachtung Nachhaltiger Konsum: Entwicklung eines Instrumentes zur Langzeit-Erfassung von Marktanteilen, Trends und Treibern nachhaltigen Konsums, Texte 02/2015, Dessau-Rosslau.
- Simplemaps. (2022): <https://simplemaps.com/>.
- Sun, Y.; Luo, B.; Wang, S.; Fang, W. (2021): What you see is meaningful: Does green advertising change the intentions of consumers to purchase eco-labeled products?, in: Business Strategy and Environment, 30, 694–704.
- Sunstein, C. R.; Reisch, L. A. (2014): Automatically Green: Behavioral Economics and Environmental Protection, in: Harvard Environmental Law Review, Vol. 38, No. 1. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2245657.
- Swain, M. (2006): Energy use in food refrigeration – Calculations, assumptions and data sources. <https://www.grimsby.ac.uk/documents/defra/usrs-top10users.pdf>.
- Tahara, K. (2019): IDEA v2.3. Research Laboratory for IDEA, Research Institute of Science for Safety and Sustainability, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tsukuba City.. <http://www.idea-lca.jp/index.html>.
- Thaler, R. H.; Sunstein, C. R. (2008): Nudge: Improving Decisions About Health, Wealth and Happiness, in: Yale University Press, New Haven.
- Tu, J. (2011): Program on Energy and Sustainable Development, Working Paper #103. https://carnegiendowment.org/files/China_Coal_Value_Chain_Kevin_Tu.pdf.
- UBA (Hrsg.) (2020): Marktbeobachtung Nachhaltiger Konsum: Entwicklung eines Instrumentes zur Langzeit-Erfassung von Marktanteilen, Trends und Treibern nachhaltigen Konsums, Dessau-Rosslau.
- UBA Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg.) (2017): Nudge-Ansätze beim nachhaltigen Konsum: Ermittlung und Entwicklung von Massnahmen zum «Anstossen» nachhaltiger Konsummuster, Texte 69/2017, Dessau-Rosslau.



- UBA (Hrsg.) (2020): KonsUmwelt. Kurzstudie zur globalen Umweltinanspruchnahme unseres privaten Konsums, Dessau-Rosslau.
- UBA (Hrsg.) (2021): Die Ökologisierung des Onlinehandels. Neue Herausforderungen für die umweltpolitische Förderung eines nachhaltigen Konsums, Dessau-Rosslau
- Ueckerdt, F.; Bauer, C.; Dirnaicher, A.; Everall, J.; Sacchi, R.; Luderer, G. (2021): Potenzial and risks of hydrogen-based e-fuels in climate change mitigation, in: Nature Climate Change, 11, 384–393. <https://www.nature.com/articles/s41558-021-01032-7>.
- UIC (2022): Uniform Distance Table for International Freight Traffic. <https://uic.org/freight/seamless-data-exchange/dium>.
- UPS (2022a): U.S. Airports Served by State. <https://www.aircargo.ups.com/Media/PdfDocuments/domesticAirports.pdf>.
- UPS (2022b): World Airports Served by Region. <https://www.aircargo.ups.com/Media/PdfDocuments/internationalAirports.pdf>.
- US Department of Transportation (2022): Intermodal Freight Facilities Rail TOFC/COFC. <https://data.usdot.opendata.arcgis.com/datasets/usdot::intermodal-freight-facilities-rail-tofc-cofc/explore>.
- van der Voet, E.; Lifset, R.; Luo, L. (2014): Life-cycle assessment of biofuels, convergence and divergence, in: Biofuels, Volume 1, 2010 – Issue 3, 435–449. <https://doi.org/10.4155/bfs.10.19>.
- VesselFinder (2022): Free AIS Ship Tracker. <https://www.vesselfinder.com/>.
- Walker, C.; Pfister, S.; Hellweg, S. (2021): Methodology and optimization tool for a personalized low environmental impact and healthful diet specific to country and season, in: Journal of Industrial Ecology, Volume 25, Issue 5, 1147–1160, <https://doi.org/10.1111/jiec.13131>.
- Wang, H.; Wu, J.; Chen, Z. (2021): Carbon footprint accounting and low-carbon path optimization for imported timber-based wooden furniture supply chains, in: BioResources; 16(4), 6870–6890. <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/carbon-footprint-accounting-and-low-carbon-path-optimization-for-imported-timber-based-wooden-furniture-supply-chains/>.
- Weibel, C.; Ohnmacht, T.; Schaffner, D.; Kossmann, K. (2019): Reducing individual meat consumption: An integrated phase model approach, in: Food Quality and Preference, Vol. 73, 8–18.
- Wernet, G.; Bauer, C.; Steubing, B.; Reinhard, J.; Moreno-Ruiz, E.; Weidema, B. (2016): The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology, in: The International Journal of Life Cycle Assessment, 21, 1218–1230. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-016-1087-8>.
- White, K.; Habib, R.; Hardisty, D. J. (2019): How to SHIFT Consumer Behaviors to be More Sustainable: A Literature Review and Guiding Framework, in: Journal of Marketing, Vol. 83(3), 22–49. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0022242919825649>.
- Wikipedia (2022a): List of rail yards. https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_rail_yards.
- Wikipedia (2022b): Amazon Air. https://en.wikipedia.org/wiki/Amazon_Air.
- Wu, W.; Beretta, C.; Cronje, P.; Hellweg, S.; Defraeye T. (2019): Environmental trade-offs in fresh-fruit cold chains by combining virtual cold chains with life cycle assessment, in: Applied Energy, Volume 254. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113586>.
- Zimmermann, T.; Memelink, R.; Rödig, L.; Reitz, A. M.; Pelke, N.; John, R.; Eberle, U. (2020): Die Ökologisierung des Onlinehandels. Neue Herausforderungen für die umweltpolitische Förderung eines nachhaltigen Konsums, im Auftrag des Umweltbundesamtes, Texte 227/2020, Dessau-Rosslau.



5 Verzeichnis von Abbildungen, Tabellen und Formeln

5.1 Verzeichnis Abbildungen

Abbildung 1: Umsatz ausgewählter «grüner» Produkt in Deutschland 2012–2019.....	15
Abbildung 2: Life Cycle Analysen / Ökobilanzen.....	21
Abbildung 3: Häufigkeit von Online-Bestellungen.....	28
Abbildung 4: Umweltbewusstsein nach Konsumtyp.....	31
Abbildung 5: Discrete-Choice-Experiment Birne.....	33
Abbildung 6: Discrete-Choice-Experiment Kleiderschrank.....	34
Abbildung 7: Discrete-Choice-Experiment Gusseisenpfanne.....	35
Abbildung 8: Übersicht über die Ergebnisse der Discrete-Choice-Experimente.....	37
Abbildung 9: Mögliche Transportrouten für die Birne aus Südafrika in die Schweiz.....	40
Abbildung 10: Mögliche Transportrouten für die Birne aus Italien in die Schweiz.....	41
Abbildung 11: Mögliche Transportrouten für die Birne aus dem Kanton Thurgau in den Kanton Luzern.....	42
Abbildung 12: Mögliche Transportrouten für die Birne aus Belgien in die Schweiz.....	43
Abbildung 13: Modal-Split pro transportiertem Kilometer für Birnen aus vier Herkunftsorten.....	44
Abbildung 14: Histogramm und kumulierte Dichte der kg CO ₂ -eq-Emissionen für eine Tonne transportierter Birnen aus vier Herkunftsorten.....	45
Abbildung 15: Histogramm (blau) und kumulierte Dichte (rot) der kg CO ₂ -eq-Emissionen für eine Tonne Birnen aus Südafrika (Wolseley).....	46
Abbildung 16: Mögliche Transportrouten für den Rasenmäher aus Deutschland in die Schweiz.....	48
Abbildung 17: Mögliche Transportrouten für den Rasenmäher aus den USA in die Schweiz.....	49
Abbildung 18: Mögliche Transportrouten für den Rasenmäher aus China in die Schweiz.....	50
Abbildung 19: Mögliche Transportrouten für den Rasenmäher aus den USA in die Schweiz.....	51
Abbildung 20: Modal-Split pro transportiertem Kilometer für Rasenmäher aus vier Herkunftsorten....	53
Abbildung 21: Histogramm und kumulierte Dichte der kg CO ₂ -eq-Emissionen für eine Tonne transportierter Rasenmäher aus vier Herkunftsorten.....	54
Abbildung 22: Baumdarstellung der Prozessschritte zur Pfannenherstellung mit den dazugehörigen Multiplikatoren.....	56
Abbildung 23: Mögliche Transportrouten für die Ausgangsstoffe und der Zwischenprodukte der Pfanne weltweit.....	58
Abbildung 24: Mögliche Transportrouten für die Ausgangsstoffe und der Zwischenprodukte der Pfanne in Europa.....	59
Abbildung 25: kg CO ₂ -eq-Emissionen pro Pfanne für unterschiedliche Komponenten der Pfanne, aufgeteilt nach Ausgangsstoffen.....	60
Abbildung 26: Modal-Split pro transportiertem Kilometer für verschiedene Ausgangsstoffe der Pfanne.....	61
Abbildung 27: Modellstruktur.....	80
Abbildung 28: Visualisierung der schiffbaren Binnengewässersysteme in Europa (CERR, RHOR, SEIR).....	84
Abbildung 29: Visualisierung der schiffbaren Binnengewässersysteme in Nordamerika (COLR, MISR).....	85
Abbildung 30: Visualisierung der schiffbaren Binnengewässersysteme in Südamerika (AMAR, PARR).....	86



Abbildung 31: Visualisierung der schiffbaren Binnengewässersysteme in Russland (WOLR, OBRI, JENR, LENR).....	87
Abbildung 32: Visualisierung des schiffbaren Binnengewässersystems in China (YANR).....	87
Abbildung 33: Beispiele für automatisch generierte Binnenhäfen und intermodale Terminals an den schiffbaren Binnengewässern in Europa	88
Abbildung 34: Funktion Erwartungswert Anzahl Hubs	91
Abbildung 35: Histogramm der PERT-Verteilung der Emissionsintensität Lastwagen 26t, Diesel, EURO 3, 150-400 km basierend auf mobitool (mobitool, 2023).	94
Abbildung 36: Histogramme der Verteilung der Emissionsintensitäten nach Verkehrsmittel basierend auf mobitool (mobitool, 2023).	95
Abbildung 37: WSS-Plot zur statistischen Überprüfung der Cluster-Lösungen	101
Abbildung 38: Discrete-Choice-Experiment Birne. Regressionskoeffizienten pro Produktinformation	102
Abbildung 39: Discrete-Choice-Experiment Kleiderschrank. Regressionskoeffizienten pro Produktinformation.....	102
Abbildung 40: Discrete-Choice-Experiment Gusseisenpfanne. Regressionskoeffizienten pro Produktinformation.....	103

5.2 Verzeichnis Tabellen

Tabelle 1: Klassifizierung von Typen von Nudges	14
Tabelle 2: Faktorenladungen der Faktorenanalyse.....	24
Tabelle 3: Übersicht über die in die Cluster-Analyse einbezogenen Variablen	25
Tabelle 4: Einkaufsverhalten und Einstellungen der drei Typen von Konsumenten/-innen (Variablen, die in die Cluster-Analyse einbezogen wurden)	26
Tabelle 5: Einkaufsverhalten der drei Typen von Konsumenten/-innen	27
Tabelle 6: Soziodemografische Merkmale der Konsumtypen.....	29
Tabelle 7: Mobilitätswerkzeuge nach Konsumtyp	30
Tabelle 8: Umweltbewusstsein nach Konsumtyp.....	31
Tabelle 9: Zur Verfügung gestellte Produktinformationen pro Experiment	32
Tabelle 10: Verkehrsmittelaaffinität Birne	39
Tabelle 11: kg CO ₂ -eq-Emissionen pro Tonne transportierter Birnen und Standardabweichung für vier Herkunftsorte	44
Tabelle 12: Verkehrsmittelaaffinität Rasenmäher	47
Tabelle 13: kg CO ₂ -eq-Emissionen pro Tonne transportierter Rasenmäher und Standardabweichung für vier Herkunftsorte	52
Tabelle 14: Inputparameter Fallstudie Bratpfanne	56
Tabelle 15: Codierung der verschiedenen Transportmittel	81
Tabelle 16: Codierung der Transportinfrastrukturknotenpunkte	81
Tabelle 17: Codierung der schiffbaren Binnengewässersysteme.....	82
Tabelle 18: Beispiel Logistikkette	88
Tabelle 19: Typen von Teillogistikketten	89
Tabelle 20: Typen von Gesamtketten	89
Tabelle 21: Serverspezifikationen zur detaillierten Transportwegberechnung	92
Tabelle 22: Kosten pro Transportmodus.....	93
Tabelle 23: Geschätzte Geschwindigkeiten pro Transportmittel.....	96
Tabelle 24: Kategorien für den Value of Time (VoT).....	97
Tabelle 25: Variablen, die in die Clusterbildung einbezogen wurden	100



Tabelle 26: Liste der Teilketten	103
Tabelle 27: Stark vereinfacht geschätzte Emissionsintensitäten verschiedener Energieträger für Länder ohne Länder-spezifische Daten (WKK: Wärme-Kraft-Kopplung).....	109

5.3 Verzeichnis Formeln

Formel 1: Erwartungswert Anzahl Hubs.....	90
Formel 2: Bewertung Logistikketten	91



6 Anhang

6.1 Methodik und Vorgehen Modellierung Schätzmodell

Der Zweck des zu konstruierenden Modells ist die Schätzung von Klimagasemissionen, insbesondere CO₂, und weiteren Umweltbelastungen, die durch die Logistiktätigkeiten innerhalb der Produktion und Verteilung von Gütern entstehen. Mit den Ergebnissen soll es erstens möglich sein, produktspezifische Emissions- und Umweltbelastungswerte ausgeben zu können, ohne auf Daten zum Logistikprozess der Unternehmen zurückgreifen zu müssen, und zweitens Verbesserungspotenziale zur Reduktion von Klimagasausstößen und Umweltbelastungen bei verschiedenen Dienstleistungen der Logistik und an verschiedenen geografischen Orten produktspezifisch zu identifizieren. Das Modell muss aufgrund der globalisierten Lieferketten global ausgestaltet sein. Dabei geht es nicht darum Warenströme gänzlich abzubilden, sondern für einzelne Produkte auf vorab bestimmten Quelle-Ziel-Relationen die Emissions- und Umweltbelastungswerte zu ermitteln.

Durch die Anforderungen an das Modell ergeben sich verschiedene Herausforderungen bei dessen Ausgestaltung.

Modellierung der Logistik

Die mikroskopische und makroskopische Modellierung von Logistik und Güterverkehr in Verkehrsmodellen wird deutlich weniger stark in der Literatur und auch in der Praxis angewendet als für den Personenverkehr. Typische Herausforderungen disaggregierter Güterverkehrsmodelle gegenüber Personenverkehrsmodellen sind die Heterogenität der Güter, unbekannte vertragliche Beziehungen oder unbekannte Transportnetzwerke einzelner Anbieter. Die Zusammenstellung von de Jong et al. (2013) zeigt, dass bisher kaum Forschung dazu durchgeführt wurde, wie Produktions- und Transportnetzwerke gestaltet werden, wie die logistischen Einrichtungen räumlich verteilt sind und wie Fahrzeuge ausgewählt, geroutet und zeitlich disponiert werden. Diese fehlenden Kenntnisse zu Verhaltensweisen fallen in diesem Modell ebenfalls ins Gewicht, jedoch aufgrund der Fokussierung auf die Modellierung einzelner Transportwege für spezifische Produkte weniger stark als bei nationalen Equilibriummodellen, wie de Jong et al. (2013) sie beschreiben.

Die Modellierung von Unternehmensnetzwerken und Logistikinfrastrukturen ist global kaum möglich, da diese nicht datengestützt und nicht öffentlich verfügbar sind. Eine manuelle Recherche dieser Netzwerke ist zu aufwändig. Die grundsätzliche Notwendigkeit, diese Netzwerke in das Modell aufzunehmen, ist jedoch vorhanden, da das genutzte Unternehmen massgeblich das genutzte Netzwerk bestimmt. Da diese Unternehmen ihre Transportaktivitäten unterschiedlich organisieren und unterschiedliche Standorte zur Verfügung haben, können sich grosse Unterschiede ergeben. Wird zum Beispiel ein Paket von Zürich nach Bern versendet, wird es je nach Anbieter in ein nahegelegenes Sortierzentrum oder in ein weiter weg liegendes Sortierzentrum in entgegengesetzter Richtung gebracht, von dort aus per LKW oder Bahn zu einem weiteren Sortierzentrum in Raum Bern oder direkt zu einer Distributionsbasis geleifert und dort verteilt. Die Wahl des Anbieters kann die Transportdistanz signifikant erhöhen und hat ebenfalls einen Einfluss auf das gewählte Transportmittel.

Eine weitere Herausforderung ist, dass kein Equilibriummodell über das gesamte Transportsystem erstellt wird, sondern ein Modell für einen einzelnen Transportweg zur Abschätzung der Emissionen berechnet werden soll. Kapazitäten und Auslastungen einzelner Strecken können damit nicht berücksichtigt werden. In der Realität nimmt dasselbe Gut aus derselben Region viele unterschiedliche Wege, da der kostengünstigste oder der schnellste Weg oft überlastet ist. Auch hier spielt die Wahl des Transportunternehmens eine grosse Rolle.

Wir gehen diese Herausforderungen an, indem wir zum einen für ein Produkt mehrere Transportwege berechnen, zum anderen diese Transportwege vorab durch die Erstellung von Logistikketten, die eine



Abfolge von Transportmitteln und Kategorien von Umschlagpunkten festlegen, steuern. So kann sichergestellt werden, dass sehr unterschiedliche Transportwege generiert werden, die dem Verhalten verschiedener Unternehmensnetzwerke entsprechen.

6.1.1 Modellstruktur

Das Emissionsmodell ist modular aufgebaut (vgl. Abbildung 27). Die Module werden je Durchlauf sequenziell ausgeführt. Im Modul 1 wird der Modell-Input generiert beziehungsweise eingegeben. In Abschnitt 6.1.2 wird sowohl der interne Input, also die Daten, die für die Berechnung bereits hinterlegt sind, als auch der externe Input, also die Eingaben, die zur Berechnung des Produkts noch gemacht werden müssen, beschrieben. Das Modul 2 ist die Generierung der Logistikketten. Auf Basis der Inputs werden mögliche Logistikketten zusammengesetzt (vgl. Abschnitt 6.1.3). Anhand der vorgegebenen Logistikketten werden im Modul 3 mögliche Transportwege berechnet (vgl. Abschnitt 6.1.4). In Modul 4 findet dann die Emissionsberechnung statt, die deterministische und stochastische Elemente enthält (vgl. Abschnitt 6.1.5). Die Module 5 und 6 sind eng verzahnt. Um am Ende einen realistischen Schätzwert für die Logistikemissionen eines Produkts abgeben zu können, müssen die Emissionen je Transportweg zu einem gewichteten Mittelwert zusammengefasst werden, denn nicht jeder Transportweg ist aufgrund der Kosten (inklusive Zeitbedarf) gleich wahrscheinlich (vgl. Abschnitt 6.1.5). Der Output besteht aus den berechneten Transportwegen, die alle Informationen zur Kosten- und Transportberechnung sowie bereits durchgeführten Standardauswertungen, wie beispielsweise dem mittleren Emissionswert enthalten (vgl. Abschnitt 6.1.7).

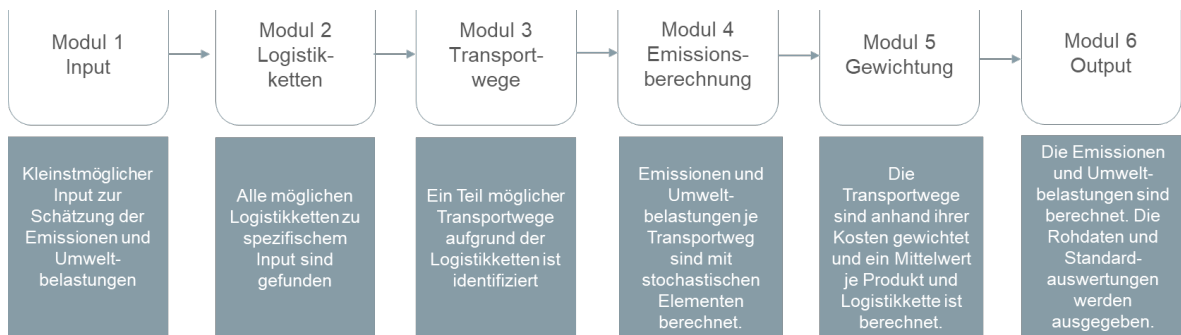


Abbildung 27: Modellstruktur

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.

6.1.2 Modul 1: Input

Dieser Abschnitt beinhaltet die Kurzbeschreibung der internen Modellinputs (Datengrundlagen) und externen Modellinputs (Eingaben, die pro Fall getätigt werden müssen), die für das Gesamttransportmodell von Relevanz sind.

Datengrundlagen

Die Modellierung der Emissionen von Transport- und Logistikprozessen basiert auf einem umfangreichen Satz an Basisdaten, die bei Bedarf flexibel ausgetauscht werden können. Grundsätzlich werden zwei Arten von Daten unterschieden: Daten zu den Transportmitteln und Daten zu den Knoten der Transportinfrastruktur. Die einzelnen Datenpunkte sind codiert, um die Verarbeitung der Daten mit dem Modell zu erleichtern und um eine eindeutige Zuordnung zu ermöglichen. Die Codes für die



Transportmittel sind in Tabelle 15 aufgeführt, während die Codes für die Infrastrukturknoten in Tabelle 16 zu finden sind. Eine Zuordnung der Transportmodi zu Transportnetzwerken ist generell eindeutig, während Knotenpunkte auch mehrere Codes zugeordnet haben können (wie z.B. ein Flughafen, der sowohl als Passagierflughafen als auch als Frachtflughafen dient).

Tabelle 15: Codierung der verschiedenen Transportmittel

Code	Bezeichnung Deutsch	Bezeichnung Englisch
AIRC	Luftfracht	Air Cargo
RAIL	Bahn	Rail
SHIP	Schiff	Ship
TRCK	Lastwagen	Truck

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.

Tabelle 16: Codierung der Transportinfrastrukturknotenpunkte

Code	Bezeichnung Deutsch	Bezeichnung Englisch
PAIR	Passagierflughafen	Passenger Airport
FAIR	Frachtflughafen	Freight Airport
CAIR	Flughafendrehkreuz KEP	Hub Airport CEP
PIER	Private Anlegestelle	Private Pier
SEAP	Seehafen	Sea Port
INLP	Binnenhafen	Inland Port
SDNG	Privates Anschlussgleis	Private Siding
RHBC	Bahncenter Konsumgut	Rail Hub Consumer Goods
RHBP	Bahncenter KEP	Rail Hub CEP
RHBB	Bahncenter Massengut	Rail Hub Bulk
ITER	Intermodales Terminal	Intermodal Terminal
MAYA	Rangierbahnhof	Marshalling Yard
STRA	Strassenanschluss	Street Access
RHUB	Regionales/Städtisches Verteilzentrum	Regional/City Hub
CWAR	Zentrallager	Central Warehouse
SORT	Sortierzentrum	Sorting Centre

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.

Über die Daten zu den Transportmitteln und den Knotenpunkten hinaus wurden weitere Daten benötigt. Diese umfassen Daten zu den möglichen Transportwegen zwischen den einzelnen Knotenpunkten, Daten speziell zur Kühlung von Fracht, zu Lagerung und Umschlag, zu den Kosten und Dauern,



sowie Daten zu den Emissionen und Umweltauswirkungen der Logistikprozesse. Die verwendeten Daten und ihre Aufbereitung werden im Folgenden beschrieben.

Flughäfen und Flugverbindungen

Bei den Flughäfen werden grundsätzlich drei Typen unterschieden: Passagierflughäfen, Frachtflughäfen und KEP-Flughafendrehkreuze. Basisdaten zu allen Flughäfen mit ihrer Bezeichnung, ihrem IATA-Code, ihren Koordinaten und einer grundsätzlichen Klassifikation (Grösse und spezielle Nutzungsarten) sind publiziert (Natural Earth 2022b). Für die grössten dieser Flughäfen (scalerank = 2) sowie für einige selektierte für die Schweiz bedeutende Flughäfen (z.B. Genf) wurden dann die bestehenden kommerziellen Passierfluglinien zu jeglichen anderen Flughäfen extrahiert (FlightConnections 2022). Diejenigen Flughäfen, die in beiden Datensätzen enthalten sind, wurden als Passagierflughäfen in die Datenbank der Logistikhubs aufgenommen und umfassen 532 Einträge. Frachtflughäfen sind hingegen in der Datenbank 250 Flughäfen, die von DHL (undatiert), FedEx (Bowen 2012), FedEx (2007), FedEx (2002), Airline Route Maps (undatiert), UPS (Bowen 2012), Smyth (2020), Airline Route Maps (undatiert), UPS (2022a), UPS (2022b) und Amazon (Rodrigue 2020) und Wikipedia (2022b) per Frachtflugzeug angefliegen werden. Unter diesen werden jeweils alle Verbindungen als möglich angenommen. Dies trifft ebenfalls auf die insgesamt zehn KEP-Flughafendrehkreuze zu, die für DHL, FedEx, UPS und Amazon hinzugefügt wurden. In der Summe sind das 582 Flughäfen, die teils mehreren Flughafentypen zugeordnet sind.

Häfen und Schiffsverbindungen

Bei den Häfen wurden Seehäfen und Binnenhäfen unterschieden. Die Seehäfen mit ihren Bezeichnungen und Standortdaten wurden direkt dem World Port Index (National Geospatial-Intelligence Agency, 2019) entnommen, wobei sehr kleine Häfen (harbor size «very small») nicht berücksichtigt wurden. Die Häfen mit Anschluss an einen Fluss oder Binnengewässer (harbor type «Rb», «Rn», «Rt», «Lc») wurden zusätzlich als Binnenhäfen deklariert. Alle Binnenhäfen wurden zudem einem von Binnenschiffen befahrbaren Binnengewässersystem zugeordnet. Die modellierten Binnengewässersysteme sind in Tabelle 17 aufgeführt. Sollten die Häfen zudem laut World Port Index über einen Bahnanschluss verfügen, wurde auch diese Information in die Datenbank übertragen.

Tabelle 17: Codierung der schiffbaren Binnengewässersysteme

Code	Bezeichnung Deutsch	Bezeichnung Englisch
AMAR	Amazonas	Amazon river
CERR	Zentraleuropäisches System	Central European river system
COLR	Columbia	Columbia river
JENR	Jenissei	Jenisej river
LENR	Lena	Lena river
MISR	Mississippi	Mississippi river system
OBRI	Ob	Ob river
PARR	Río Paraná	Parana river
RHOR	Rhône	Rhône river
SEIR	Seine	Seine river
WOLR	Wolga	Wolga river
YANR	Yangtze	Yangtze river

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.



Eine Karte der meistbefahrenen Ozeanschiffahrtsrouten wurde von Oberschelp et al. (2019) verwendet, während die entsprechenden Binnengewässersysteme aus Tabelle 17 anhand von Kartenmaterial spezifisch für dieses Projekt digitalisiert worden sind. Die Digitalisierung ist mit Hilfe der Software QGIS v3.22.3 durchgeführt worden und das Kartenmaterial, das als Grundlage verwendet worden ist, stammt von OpenStreetMap. Die Informationen, welche Teile der Binnengewässer schiffbar sind, beruhen zum einen auf Transponderdaten (Vesselfinder 2022), zum anderen auf grauer Literatur (Kohnen 2005). Die Daten zu den Binnengewässersystemen liegen als Shapefiles vor und sind in den Abbildungen 5 bis 10 dargestellt (Binnengewässersystem Europa: Abbildung 28, Binnengewässersystem Nordamerika: Abbildung 29, Binnengewässersystem Südamerika: Abbildung 30, Binnengewässersystem Russland: Abbildung 31, Binnengewässersystem China: Abbildung 32, Binnenhäfen/intermodale Terminals Europa: Abbildung 33)

Ein eigener Datensatz zu allen relevanten Binnenhäfen der jeweiligen Binnengewässer lag nicht vor, da publizierte Datensätze, wie zum Beispiel der WorldPortIndex, vor allem auf die Häfen mit Meeresanschluss fokussiert sind. Gleichzeitig aber ist aus dem Kartenmaterial ersichtlich, dass die meisten grösseren Städte an den betrachteten Binnengewässern Anlegestellen oder Häfen haben. Um diese Datenlücke zu schliessen, wurden aus der World Cities Database (*simplemaps* 2022) alle Städte mit mehr als 50'000 Einwohnern herausgefiltert. Anschliessend wurden automatisch in QGIS dort Binnenhäfen dieser Städte generiert, wo sich die Städte innerhalb einer Distanz von maximal 0,2° Abstand zu einem der Binnengewässersysteme befinden (vgl. Abbildung 33). Auf diese Weise wurden 275 Binnenhäfen generiert.

Bahncenter, intermodale Terminals, Bahnverbindungen und Rangierbahnhöfe

Für die Bahnverbindungen stellen verschiedene Arten von Bahncentern wichtige Knotenpunkte dar. Diese Knotenpunkte sind für die Schweiz der «Uniform Distance Table for International Freight Traffic» (UIC 2022) entnommen und beinhalten insgesamt 28 Bahncenter. Die Koordinaten dieser Bahncenter sind manuell hinzugefügt worden. Neben den Bahncentern besitzen auch die meisten intermodalen Terminals einen Bahnanschluss. Daten zu den intermodalen Terminals sind für insgesamt 595 Terminals in Europa, Nordamerika, Mittelamerika und Südafrika vorhanden (Agora 2022; APM Terminals 2022; Cronje et al. 2009; US Department of Transportation 2022; CSX 2022; CN 2022; Ferromex 2022; Intek Freight and Logistics 2022). Neben den möglichen Verbindungen zum Schienennetzwerk wurde dabei auch individuell berücksichtigt, ob ein Anschluss an das Strassennetzwerk, an Binnengewässer oder an Meere vorliegt. Intermodale Terminals mit Anschluss an Binnengewässer sind beispielhaft für Europa in Abbildung 28 dargestellt. Für verschiedene Weltregionen liegen jedoch keine Daten zu intermodalen Terminals vor, können jedoch alternativ über die Standorte grösserer Städte angenähert werden.

Weiterhin spielt für den nationalen und internationalen Bahnfrachtverkehr das Rangieren für die passende Zusammenstellung von Frachtzügen eine wesentliche Rolle. Daten zu insgesamt 419 internationalen Rangierbahnhöfen wurden einer Datensammlung in der Wikipedia (Wikipedia, 2022a) und zahlreichen Einzelberichten (wie etwa Unternehmenswebsites, Pressemitteilungen, Baufortschrittsberichten und ähnlichem) entnommen, manuell mit Koordinaten versehen und der Logistikstandortdatenbank hinzugefügt.

Für die Bahnverbindungen selbst wurden Streckeninformationen von Natural Earth (2022a) verwendet. Die Daten zu den Strecken liegen als Shapefile vor und mussten nicht weiterbearbeitet werden, um für die Wegfindung zwischen Bahnknotenpunkten eingesetzt werden zu können. Lediglich einzelne Sonderfälle für Bahnverbindungen, wie der Transport von Zügen per Schiff auf der Ostsee, wurden aus dem Datensatz entfernt.



Zentrallager, Sortierzentren, Verteilzentren und Strassenverbindungen

Zentrallager, Sortierzentren und Verteilzentren wurden speziell für wichtige Logistikunternehmen in der Schweiz zusammengetragen. Die Schweizer Post zum Beispiel publizierte einen Open-Access-Datensatz zu ihren Standorten (Die Post 2022), von denen die Sortierzentren und Verteilzentren direkt verwendet werden können. Daten von Planzer (Planzer 2022), coop (coop 2022) und Migros (Migros 2022) wurden dagegen von deren Websites entnommen, während Daten zu Denner, Aldi und Lidl über Werbematerialien zugänglich waren. Da für die Verwendung des Transportmodells vorerst nur Schweiz-fokussierte Fallstudien vorgesehen sind, war eine Datensammlung zu diesen Logistikstandorten ausserhalb der Schweiz nicht notwendig. Insgesamt sind 258 Standorte dieser drei Kategorien für die Datenbank zusammengetragen worden.

Das internationale Strassennetzwerk basierte nach dem Test mehrerer Alternativen auf dem Datensatz der NASA (SEDAC, 2013). Diese Auswahl wurde als Kompromiss zwischen Detaillierungsgrad und Rechenzeit in der Routenfindung ausgewählt. Dieser Datensatz wurde vor der Verwendung zur Routenfindung weiter bearbeitet. So wurden in QGIS mit der Funktion «v_clean» die einzelnen Wegstrecken an Kreuzungen unterbrochen und als Knotenpunkte im Transportnetzwerk gesetzt, um ein Abbiegen der Fahrzeuge an Kreuzungen zu ermöglichen.



Abbildung 28: Visualisierung der schiffbaren Binnengewässersysteme in Europa (CERR, RHOR, SEIR)

Quelle: CERR, RHOR, SEIR.



Abbildung 29: Visualisierung der schiffbaren Binnengewässersysteme in Nordamerika (COLR, MISR)

Quelle: CERR, RHOR, SEIR.



Abbildung 30: Visualisierung der schiffbaren Binnengewässersysteme in Südamerika (AMAR, PARR)

Quelle: CERR, RHOR, SEIR.



Abbildung 31: Visualisierung der schiffbaren Binnengewässersysteme in Russland (WOLR, OBRI, JENR, LENR)

Quelle: CERR, RHOR, SEIR.



Abbildung 32: Visualisierung des schiffbaren Binnengewässersystems in China (YANR)

Quelle: CERR, RHOR, SEIR.



Abbildung 33: Beispiele für automatisch generierte Binnenhäfen und intermodale Terminals an den schiffbaren Binnengewässern in Europa

Quelle: CERR, RHOR, SEIR.

6.1.3 Modul 2: Logistikketten

Auf Basis des Inputs werden im ersten Arbeitsschritt Logistikketten generiert. In dieser Studie wird unter Logistikkette eine Abfolge von zu passierenden Umschlaganlagentypen unter Berücksichtigung der dazwischen genutzten Transportmittel verstanden. Eine Logistikkette dient der Vorabauswahl eines Transportkettentyps, ohne geografisch lokalisierte Umschlaganlagen und Transportwege zu suchen. Tabelle 18 zeigt ein Beispiel für eine Transportkette.

Tabelle 18: Beispiel Logistikkette

Hub	Modus
Strassenanschluss	LKW
Intermodales Terminal	Bahn
Hochseehafen	Schiff
Hochseehafen	Schiff
Binnenhafen	LKW



Hub	Modus
Zentrallager	LKW
Regionallager	LKW
Strassenanschluss	

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.

Eine solche Gesamtlogistikkette wird aus Teilketten zusammengesetzt (eine komplette Liste findet sich im Anhang in Tabelle 26). Tabelle 19 zeigt die Arten von Teilketten, die im Projekt identifiziert wurden.

Tabelle 19: Typen von Teillogistikketten

Code	Bezeichnung
FEEDG	Zulauf
FEEDS	Hafenzulauf
FINTP	Zulauf Zwischenlauf KEP
MAINO	Hauptlauf Übersee
MAINE	Hauptlauf Europa
MAINI	Hauptlauf Schweiz Import
MAINN	Hauptlauf Schweiz National
INTDI	Zwischenlauf Distribution
POSTN	Nachlauf Schweiz
DIREC	Direkttransport

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.

Die Regeln, nach denen diese Ketten zusammengesetzt werden, werden durch den Transporttyp bestimmt. Tabelle 20 zeigt eine Übersicht. Die Unterscheidung liegt dabei hauptsächlich in der Quelle des Transports. Damit tragen wir der unterschiedlichen Struktur eines Binnentransports in der Schweiz gegenüber einem Import aus Europa oder einem anderen Kontinent Rechnung. Zudem wird zwischen KEP und nicht-KEP unterschieden. Für beide Gruppen werden teilweise separate Infrastrukturen genutzt (z.B. Sortierzentren), deshalb werden diese möglichst früh im Modell getrennt behandelt. Die Teilketten beinhalten die Hub-Typen aus Tabelle 16. Als Transportmodi werden Luftfracht (AIRC), Bahn (RAIL), Schiff (SHIP) und Lastwagen (TRCK) betrachtet.

Tabelle 20: Typen von Gesamtketten

Bezeichnung	Zusammensetzung
Binnen CH	Zulauf – Hauptlauf Schweiz – (Zwischenlauf Distribution) – Nachlauf Schweiz
Import aus Europa	Zulauf – Hauptlauf Europa – (Hauptlauf Import) – (Zwischenlauf Distribution) – Nachlauf



Bezeichnung	Zusammensetzung
Import aus Europa (KEP)	Zulauf – Zulauf Zwischenlauf KEP – Hauptlauf Europa – (Hauptlauf Import) – (Zwischenlauf Distribution) – Nachlauf
Import aus Übersee	Zulauf – (Hafenzulauf) – Hauptlauf Übersee – (Hauptlauf Europa) – (Hauptlauf Import) – (Zwischenlauf Distribution) – Nachlauf
Import aus Übersee (KEP)	Zulauf – Zulauf Zwischenlauf KEP – Hauptlauf Übersee – (Hauptlauf Europa) – Hauptlauf Import – (Zwischenlauf Distribution) – Nachlauf
	Direkttransport ohne Umschlag immer möglich

Legende: Teilketten in Klammern sind optional.

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.

Mithilfe der Teilketten, die eine nach bestem Wissen der Forschenden vollständige Liste umfasst, werden nun alle möglichen Gesamtketten für den jeweiligen Transporttyp zusammengesetzt. Ausgeschlossen werden lediglich Ketten, die aufgrund der Anschlüsse an Quelle oder Ziel nicht möglich sind (wenn z.B. kein Gleisanschluss [SDNG] besteht, kann die Logistikkette nicht mit einem Schienentransport beginnen). Eine zusätzliche Abfrage im Input ist, ob es sich um einen Massenguttransport handelt. Ist dies nicht der Fall werden alle Teilketten, die eine massengutspezifische Infrastruktur enthalten ausgeschlossen (RHBB). An dieser Stelle besteht Differenzierungspotenzial – da das Modell zu Beginn jedoch vorwiegend auf Konsumgut ausgerichtet sein soll, verzichten wir hier vorerst darauf.

Nun stehen alle theoretisch möglichen Logistikketten für den gegebenen Input zur Verfügung. Um den Berechnungsaufwand an späterer Stelle zu vermindern, werden bereits nach diesem Schritt die Logistikketten auf ihre Nutzungswahrscheinlichkeit hin bewertet und bei Unterschreiten einer Wahrscheinlichkeitsschwelle aussortiert. Die Wahrscheinlichkeit wird mithilfe der eingegebenen Luftdistanz, der Anzahl Hubs in der Logistikkette und den eingegebenen Modusaffinitäten bestimmt. Dazu wird zuerst eine erwartete Anzahl Hubs mit Formel 1 bestimmt. Die möglichen Werte dieser Formel nach Luftdistanz sind in Abbildung 34 dargestellt. Die erwartete Anzahl Hubs ist zu Beginn klein und steigt bis 1'000 Kilometer schnell auf fünf an, danach verlangsamt sich die Zunahme. Es wird davon ausgegangen, dass sich die Transporte zwischen einzelnen Hubs verlängern, nicht jedoch, dass sich die Anzahl der Umschläge schnell erhöht. Die Anzahl der erwarteten Hubs wird gerundet aus der Funktion entnommen.

Formel 1: Erwartungswert Anzahl Hubs

$$Hubs_{erwartet} = \log(\text{Luftdistanz}) * 2.1 - 10$$

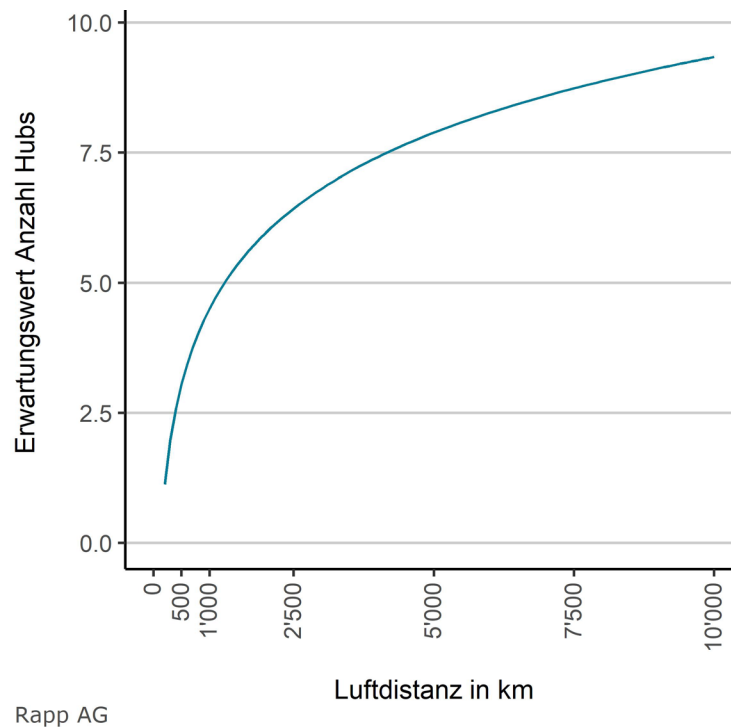


Abbildung 34: Funktion Erwartungswert Anzahl Hubs

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.

Formel 2: Bewertung Logistikketten

$$Bewertung_{Logistikkettei} = -5 * \left(Hubs_{gemessen_{Logistikkettei}} - Hubs_{erwartet_{Logistikkettei}} \right)^2 + 100$$

Mithilfe von Formel 2 werden die Logistikketten nun anhand der Differenz zwischen Anzahl erwarteter Hubs und tatsächlicher Anzahl Hubs bewertet, dabei wird die Anzahl erwarteter Hubs nochmals modifiziert. Handelt es sich um ein Expressgut, werden unabhängig von der Distanz zwei Hubs weniger erwartet. Kleine Erwartungswerte für die Anzahl Hubs kleiner drei werden zudem auf drei gesetzt. So wird verhindert, dass bei kurzen Distanzen innerhalb der Schweiz nur Direkttransporte möglich sind. Liegt der ermittelte Punktwert nun gleich oder unter null, wird die Logistikkette entfernt. Taucht ein Modus in einer der Ketten auf, der eine Affinität von Null für dieses Gut hat, so wird auch diese Kette entfernt.² Die verbleibenden Logistikketten dienen nun als Basis für die Berechnung der Transportwege.

² Ursprünglich sollte an dieser Stelle bereits mithilfe einer Wahrscheinlichkeit die Häufigkeit der Logistikketten bestimmt werden. Auf diese Vorgehensweise wird aufgrund einer einfacheren und konsistenteren Variante nach Berechnung der Transportwege verzichtet.



6.1.4 Modul 3: Transportwege

Innerhalb des Transportmodells kann die Berechnung von Transportwegen auf zwei Arten erfolgen: in der vereinfachten Variante allein in der Programmierumgebung R, wo die Distanzen zwischen Netzknotenpunkten über lineare Distanzen mit zufällig verteilten Umwegfaktoren angenähert werden, und in der detaillierten Variante mit den vollständigen Transportwegnetzwerken. Die vereinfachte Variante dient dabei der schnellen Abschätzung von Wegen, Emissionen und Umweltauswirkungen auf dem lokalen Computer, während die detaillierte Variante mit deutlichem höherem Rechenaufwand zweckmässigerweise auf einem Server ausgeführt wird.

In der vereinfachten Variante werden die linearen Distanzen, in der detaillierten Variante die Wege entlang der realen Netzwerke verfolgt und dann die Summe des Gesamtweges als Summe aller Wegsegmente berechnet. Diese Berechnung erfolgt für die realen Netzwerke zweckmässigerweise auf einem hinreichend leistungsstarken Server, der zudem auch die parallele Berechnung mehrerer Wege erlaubt und so die Rechenzeit wesentlich senken kann. In der für dieses Projekt umgesetzten Variante wird ein Server mit den Spezifikationen aus Tabelle 21 verwendet.

Tabelle 21: Serverspezifikationen zur detaillierten Transportwegberechnung

Typ	Beschreibung
CPUs	2x Intel Xeon Gold 6154 mit 18 Cores/36 Threads
Taktfrequenz CPU	3.0 GHz (Turbo: 3.7 GHz)
Arbeitsspeicher	377 GiB RAM
Betriebssystem	Ubuntu 18.04.6 LTS
Linux-Version	4.15.0-55-generic

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.

Die Daten werden dabei in eine PostGIS-Datenbank auf dem Server eingespeist und mittels QGIS und pgAdmin verwaltet. Dabei werden auch Datenbereinigungen (wie z.B. das Entfernen von Artefakten, wie Verknüpfungen mit einer Länge von 0) vorgenommen. Aus einer lokalen R-Programmierung kann dann die Wegberechnung auf dem Server ausgelöst werden. Die Berechnungsergebnisse werden dann nach Abschluss der Berechnung an den lokalen Computer zurückgeliefert, müssen im Format angepasst werden, um dann als Koordinatentabelle weiterverarbeitet werden zu können.

Grundsätzlich werden alle Wege als kostenoptimale Wege berechnet. Dazu wird der Dijkstra-Algorithmus (Dijkstra 1959) verwendet. Die Kosten der einzelnen Wegstrecken entsprechen ihren Längen, weil immer nur Wege innerhalb eines Transportmodus zwischen zwei Knotenpunkten berechnet werden und die Kosten pro Transportmodus exogen nach Tabelle 22 (basierend auf internen Diskussionen und Daten von Tu [2011]) vorgegeben werden.



Tabelle 22: Kosten pro Transportmodus

Modus	Transportkosten
Seeschiff	0.03 USD/tkm
Binnenschiff	0.09 USD/tkm
Zug	0.07 USD/tkm
LKW	0.19 USD/tkm
Flugzeug	0.56 USD/tkm

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.

Die gesamte Berechnung der Transportwege kann dabei mehrstufig erfolgen. Zuerst erfolgt eine Auswahl geeigneter konkreter Logistikstandorte aus der Datenbank aller möglicher Standorte, basierend auf den allgemeinen Logistikketten. Im nachfolgenden Schritt können dann «lineare» Transportketten zwischen den jeweiligen Standorten berechnet werden, die im optionalen dritten Schritt durch die exakte Berechnung der Wege und Distanzen auf dem Server ergänzt werden.

6.1.5 Modul 4: Emissionsberechnung

Die Emissionsberechnung für die jeweiligen Transportmittel beruht grundsätzlich auf den Emissionsintensitäten von mobitool (2023). Pro berechnetem Transportweg wird – sofern die Basisdaten dafür vorhanden sind – eine zufällige Beladung des Transportmittels angenommen und die zugehörige Emissionsintensität bestimmt. Die Zufallsverteilung der Beladungen pro Transportmittel wird im Fall von LKW-Emissionen über eine PERT-Verteilung angenähert, die als minimale Beladung einen Wert von 20 Prozent, als maximale Beladung einen Wert von 100 Prozent und als Erwartungswert die durchschnittliche Beladung aus mobitool erhält. Diese Funktion wird gewählt, weil sie zum einen im Gegensatz zu anderen üblichen Verteilungen (z.B. Normal-Verteilung, Lognormal-Verteilung, Weibull-Verteilung) die Definition von oberen und unteren Grenzwerten ermöglicht und somit physikalisch unmögliche Zahlenwerte (Beladung <0% oder >100%) ausgeschlossen werden können. Zum anderen sind sehr niedrige Beladungen und sehr hohe Beladungen der Transportmittel zwar möglich, aber sehr selten. Genaue Daten liegen dafür jedoch nicht vor, sodass die PERT-Verteilung zum Beispiel im Vergleich zur Dreieck-Verteilung robustere Ergebnisse liefert, weil sie durch den gleichmässigen und nach aussen hin abflachenden Verlauf robuster in Bezug auf die Wahl der exakten Ober- und Untergrenze ist. Die PERT-Verteilung ist daher bereits zuvor für solche Zwecke eingesetzt worden (Marquez et al. 2011).

Für die Emissionen der LKWs werden aus Mobitool die Emissionen für den Treibstoff Diesel, alle verfügbaren Abgasnormen (EURO3, EURO4, EURO5, EURO6), die mittlere Distanzklasse (140-400 km) und alle LKW-Grössenklassen (3.5t, 7.5t, 26t, 32t, 40t) extrahiert. Eine Gewichtung der Wahrscheinlichkeiten erfolgt für den LKW-Transport zudem mit den Transportmengen der jeweiligen LKW-Kategorien in der Schweiz (Tabelle 83 in Sacchi und Bauer, 2023) ausgedrückt in Vehikel-Kilometern. Die Angaben für die Grössenklasse 3.5t lag in Tabelle 83 nicht vor und ist daher zwar implementiert, aber mit einer Wahrscheinlichkeit von null angenommen. Ein Beispiel für die PERT-verteilte CO₂-Emissionsintensität pro tkm eines bestimmten LKW-Typs wird beispielhaft in Abbildung 35 gezeigt.

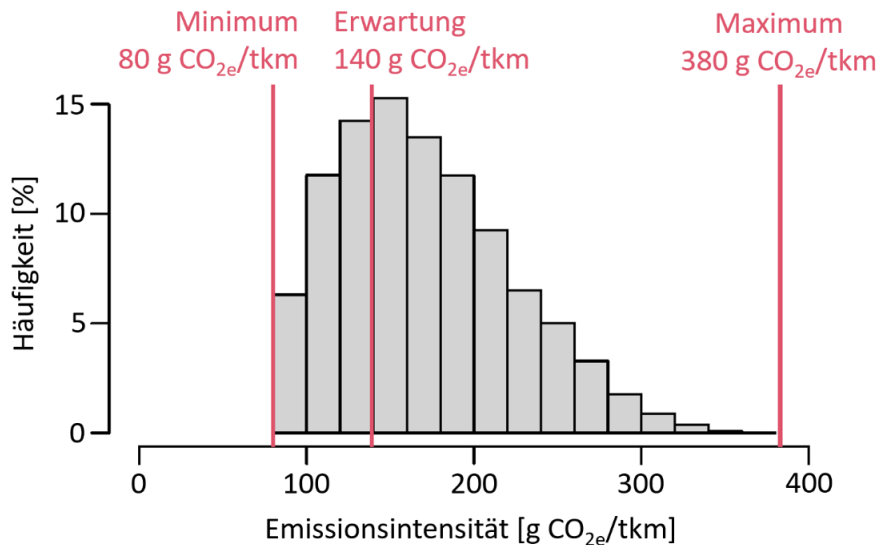


Abbildung 35: Histogramm der PERT-Verteilung der Emissionsintensität Lastwagen 26t, Diesel, EURO 3, 150-400 km basierend auf mobitool (mobitool, 2023).

Für den Schienentransport wird aus den vorhandenen Datensätzen (Schweiz, Italien, Österreich, Deutschland, Frankreich, Europa (ENTSO-E-Stromnetz)) in mobitool für kombinierten Strom- und Dieseltransport ohne zusätzliche Gewichtung zufällig ausgewählt, da hier keine weiteren Daten vorliegen. Die Zahlenwerte entsprechen dabei grob denjenigen, die auch für andere Länder, wie zum Beispiel die USA (EPA, 2023) gefunden werden können.

Für den Schiffstransport werden die wenigen unparametrisierten Datensätze aus mobitool ebenfalls im ersten Schritt ungewichtet pro Streckenabschnitt zufällig ausgewählt, anschliessend jedoch mit einer Wahrscheinlichkeitsverteilung der Brennstoffverbräuche von Frachtschiffen nach Grössenklasse und Häufigkeit (Oberschelp et al. 2019) basierend auf Daten des Schiffsmotorenherstellers MAN verwendet. Dabei wird angenommen, dass die Daten aus mobitool einem durchschnittlichen Verbrauch entsprechen und die Emission dann anschliessend über die Verteilung aus der Literatur angenähert.

Ähnlich wird im Fall vom Lufttransport verfahren, wo nur wenige unparametrisierte Datensätze für den Luftfrachttransport vorliegen, aus denen im ersten Schritt ungewichtet ausgewählt wird. Anschliessend wird über typische Treibstoffverbräuche pro Flugzeugtyp und Distanzklasse, die als Zusammenstellung von Flugzeugherstellerdatenblättern frei verfügbar sind, eine Skalierung der Emissionsintensitäten vorgenommen. Diese Daten liegen als Treibstoffverbrauch pro Sitzplatz vor und werden normiert, um als Näherung die Skalierung pro Tonnen-Kilometer zu ermöglichen. Die resultierenden Verteilungen über alle vier Sorten von Transportmitteln hinweg werden in Abbildung 36 dargestellt.

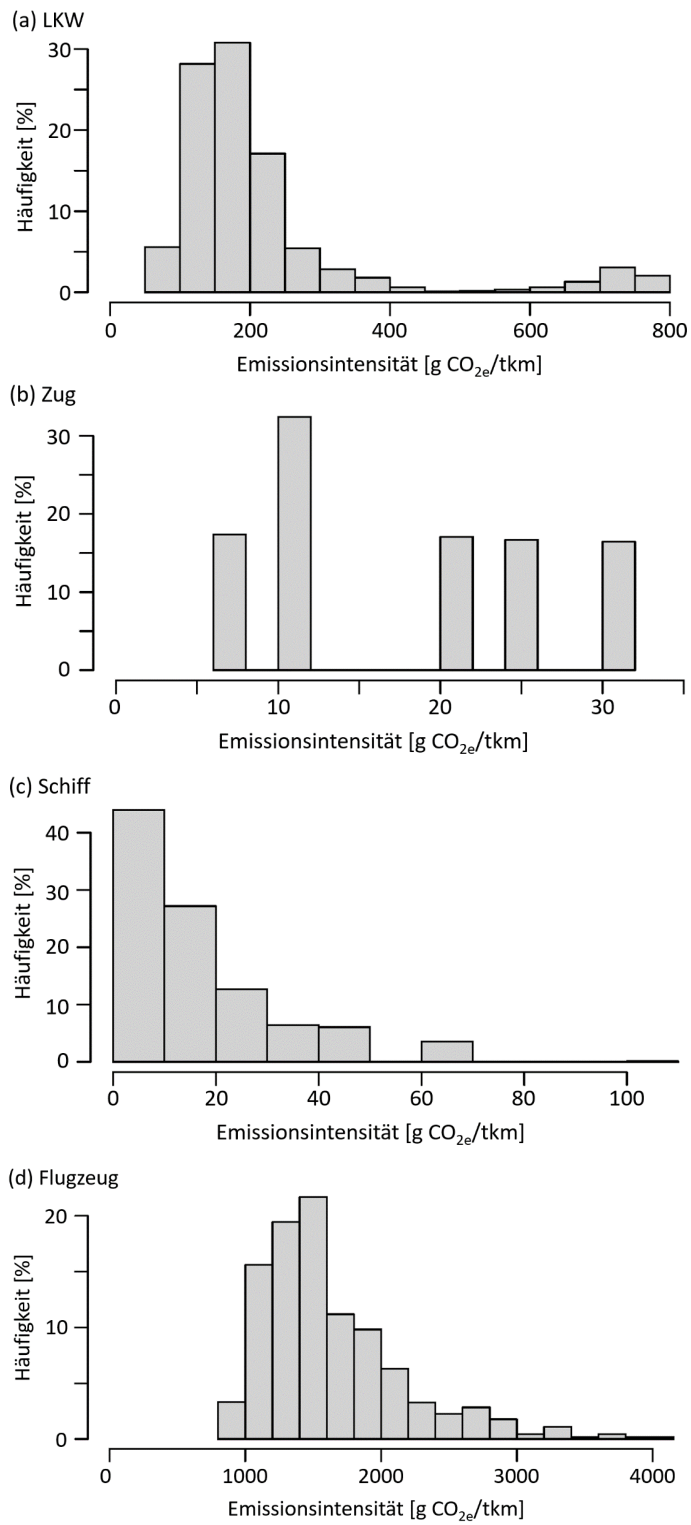


Abbildung 36: Histogramme der Verteilung der Emissionsintensitäten nach Verkehrsmittel basierend auf mobitool (mobitool, 2023).



Zusätzliche Emissionen aus gekühlter oder gefrorener Lagerung werden über die Lagerdauern und Energieverbräuche in Department for Environment, Food and Rural Affairs UK (2009) berechnet (unter der Annahme von gleichverteilten Häufigkeiten). Dabei werden die Emissionsintensitäten der jeweiligen nationalen Energiemixe berücksichtigt, indem mobitool-kompatible Strommixe der jeweiligen Länder mit ihren Emissionsintensitäten aus der UVEK-Datenbank (BAFU, 2019) entnommen werden und fehlende Strommixe, zum Beispiel für kleinere Länder, für das Jahr 2019 (IEA, 2022) mit groben Schätzwerten für typische CO₂-Emissionsintensitäten der jeweiligen Energieträger (Tabelle 27) kombiniert werden. Die Emissionen für gekühlten Transport werden mithilfe eines Modells aus der Literatur berechnet (Swain, 2006), wobei typische Geschwindigkeiten der jeweiligen Transportmittel nach Tabelle 23 dazu dienen, die Dauern der Transportschritte zu schätzen.

Tabelle 23: Geschätzte Geschwindigkeiten pro Transportmittel

Modus	Geschwindigkeit
Schiff	30 km/h
Flugzeug	660 km/h
Zug	80 km/h
LKW	70 km/h

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.

6.1.6 Modul 5: Gewichtung

Die Transportwege mit den berechneten Emissionen müssen nun gewichtet werden, um ihre Nutzungswahrscheinlichkeit in die Berechnung eines mittleren Emissionswertes einzubeziehen. Als GewichtungsvARIABLE dienen die generalisierten Kosten für den jeweilig berechneten Transportweg. Dies spiegelt die betriebswirtschaftlichen Motive der Akteure im Logistikmarkt wider. Gleichzeitig kann durch eine Gewichtung (im Gegensatz zu einer Umlegung des kompletten Volumens auf einen Transportweg) berücksichtigt werden, dass die Kosten durch unterschiedliche Unternehmensstrategien nicht auf alle Unternehmen gleich wirken (ein Unternehmen, das regelmässig Bahntransporte nutzt und die nötigen Abläufe und Infrastrukturen kennt beziehungsweise besitzt, hat tiefere Kosten die Bahn zu nutzen, als ein Unternehmen, welches vollständig auf Strassentransporte setzt) und dass durch Kapazitätsbeschränkungen nicht nur der kostengünstigste Transportweg genutzt werden kann.

Die generalisierten Kosten setzen sich zusammen aus den tatsächlich entstehenden Kosten für Transport (vgl. Tabelle 22), Umschlag und Lagerung sowie Qualitätsfaktoren, die monetarisiert werden. Als wichtigster Qualitätsfaktor wird hier nur die Transportzeit berücksichtigt, die je nach Gutart einen anderen monetären Wert besitzt. In der vorhandenen Literatur (vgl. z.B. Jensen et al. 2019 oder Jourquin/Beuthe 2019) werden diese Werte je Verkehrsträger bestimmt. Diese Vorgehensweise ist für das hier konstruierte Modell jedoch nicht zielführend, da der monetäre Zeitwert eigentlich gutspezifisch und nicht verkehrsträgerspezifisch ist. Ein bestimmtes Gut hat auf jedem Verkehrsträger den gleichen monetären Zeitwert. Im Modell kann dieser Zeitwert manuell als Inputparameter eingegeben werden. Fehlt eine Eingabe, wird basierend auf verschiedenen Kategorien ein Standardzeitwert ergänzt (vgl. Tabelle 24). Weitere Qualitätskriterien werden nicht berücksichtigt.

Mathematisch erfolgt die Gewichtung durch den Kehrwert der generalisierten Kosten. So ist sichergestellt, dass niedrigere Kosten zu einer höheren Gewichtung führen. Durch die dem Kehrwert zugrunde liegenden Hyperbelfunktion ist eine starke Gewichtung von Kostenunterschieden jedoch sichergestellt. Die Kehrwerte werden in einem letzten Schritt mit ihrer Summe normiert, sodass gewichtete Kennzahlen und Verteilungen erstellt werden. Durch diese Vorgehensweise wird zwar sichergestellt, dass



Transportwege mit hohen generalisierten Kosten gegenüber Transportwegen mit tiefen Kosten weniger wahrscheinlich sind, jedoch werden so keine Transportwege ausgeschlossen. Dies wirkt sich zwar kaum auf die berechneten Mittelwerte aus, fällt jedoch beispielsweise bei kartografischen Darstellungen deutlich auf.

Um den Wert der Zeit (Value of Time [VoT]) festzulegen, gibt es verschiedene Kategorien zur Auswahl. Diese Kategorien sind in der folgenden Tabelle 24 definiert.

Tabelle 24: Kategorien für den Value of Time (VoT)

Kategorie	Affinität
Sehr niedrig	0.03 CHF/t/h
Niedrig	0.1 CHF/t/h
Mittel	0.5 CHF/t/h
Hoch	1 CHF/t/h
Sehr hoch	3 CHF/t/h
Spezialfracht sehr hoch	10 CHF/t/h

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.

Im Modell wurde dies berücksichtigt, indem entweder direkt ein VoT-Wert festgelegt werden kann oder indem Informationen wie KEP (Kurier, Express und Paketdienst), Expresslieferung und Massengutgaben verwendet werden, um einen passenden VoT-Wert zuzuordnen.

Es ist zu beachten, dass der theoretische VoT für bestimmte Güter noch höher sein kann. Dieser Effekt wird jedoch bereits durch die Verkehrsmittelaaffinität berücksichtigt, die die Priorisierung bestimmter Verkehrsträger basierend auf ihrem VoT-Wert beeinflusst.

6.1.7 Modul 6: Output

Der Output des Modells besteht nun aus mehreren Elementen. Das Rohergebnis des Modells sind die berechneten Transportwege zu den im zweiten Modul generierten Logistikketten. Sie sind die Basis für alle weiteren Berechnungen. Die zu den Transportwegen berechneten Emissionen und Kosten werden ebenfalls in Rohform ausgegeben – so kann nach Bedarf auf mikroskopischer Ebene ausgewertet werden. Zusätzlich zu dieser Ausgabe der Rohergebnisse werden bereits einige Standardanalysen und -aggregationen durchgeführt. Diese Ergebnisse sind für die durchgeführten Fallstudien im Kapitel 3 dargestellt.

6.2 Methodik und Vorgehen Survey

Insgesamt wurden drei Surveys durchgeführt, auf die nachfolgend im Einzelnen eingegangen wird.

6.2.1 Gesamtschweizerischer Survey

Erstens wurde eine Erhebung bei der in der Schweiz wohnhaften Bevölkerung zu Einstellungen und Verhalten im Online-Handel durchgeführt. Insgesamt wurden über ein extern einbezogenes Befragungsinstitut 1'052 Personen befragt. Davon stammen 779 aus der deutschsprachigen und 273 aus



der französischsprachigen Schweiz. Die Befragung ist repräsentativ für die sprachassimilierte Wohnbevölkerung in der deutsch- und französischsprachigen Schweiz im Alter von 18 bis 89 Jahren mit Internetzugang.

Der Fragebogen bestand aus zwei Teilen:

Teil 1: Fragen für Cluster-Analyse

In einem ersten Teil wurden Fragen gestellt, mit denen in der Auswertung eine Cluster-Analyse vorgenommen werden konnte. Anhand einer Cluster-Analyse konnten Typen von Online-Konsumenten/-innen identifiziert werden. Der Cluster-Analyse vorangestellt war eine Faktorenanalyse, um die abgefragten Items zu einer überschaubaren und für die Cluster-Analyse handhabbaren Anzahl Faktoren zusammenzufassen.³

Eine Cluster-Analyse dient dazu, die erhobenen Daten sinngemäss zu strukturieren. Dazu werden Gruppen gebildet, die sich in ihrem Antwortverhalten ähneln, jedoch untereinander eine grösstmögliche Heterogenität aufweisen. Für diese Auswertung wurde das k-Means-Verfahren angewendet.⁴

Die Herleitung der Faktoren sowie die anschliessende Durchführung der Cluster-Analyse inklusive deren Interpretation findet sich in Abschnitt 2.1.

Teil 2: Discrete-Choice-Experimente

Der zweite Teil innerhalb der schweizweiten Befragung war sogenannten Discrete-Choice-Experimenten (DCE) gewidmet. Die DCE hatten zum Ziel, den Einfluss von Produktinformationen auf den Kaufentscheid zu ermitteln. Es wurden DCE zu drei Produkten durchgeführt:

- Birne
- Kleiderschrank
- Gusseisenpfanne

³ Eine Faktorenanalyse überprüft, ob sich mehrere der gemessenen Variablen (in diesem Fall Fragen zur Bewertung des Online-Handels im Vergleich zum Verkauf vor Ort) durch eine oder wenige latente Variablen, sogenannte Faktoren, erklären lassen. Der erste Schritt der Faktorenanalyse besteht darin, abzuschätzen, wie viele Faktoren den Variablen zugrunde liegen. Hat man zum Vornherein keine theoretische Annahme über die Anzahl der Faktoren, so kann der Eigenwert jedes möglichen Faktors – also den Anteil der Varianz, der bei allen Variablen durch den Faktor erklärt wird – visuell dargestellt werden. In dieser Visualisierung werden die Eigenwerte der Grösse absteigend sortiert und es ist erkennbar, welche Anzahl Faktoren einen bedeutenden Anteil der Varianz aller Variablen erklären. Ist die Anzahl der Faktoren bestimmt, erfolgt die eigentliche Faktorenanalyse, oder in diesem Fall Hauptkomponentenanalyse. Es wird in diesem Schritt berechnet, wie viel Varianz von jeder Variable auf den Faktor lädt. Diese Werte werden anschliessend extrahiert und der Faktor wird als einzelne Variable weiterverwendet.

⁴ Beim k-Means-Verfahren handelt es sich um einen Algorithmus, der sich für die Clusterung von Beobachtungen eignet. Die Clusterbildung erfolgt iterativ, das heisst, die Rechenvorgänge werden fortlaufend wiederholt, bis ein zusätzlicher Rechendurchlauf keine Verbesserung des Ergebnisses mehr bringt. Beim k-Means-Verfahren muss vorgängig die Anzahl der Cluster festgelegt werden. Es wurden mehrere Varianten von Cluster-Analysen durchgeführt (2, 3 und 4 Cluster), wobei letztlich mit jener Variante weiterverfahren wurde, die erstens aus statistischer Sicht in sich möglichst homogene und untereinander möglichst heterogene Cluster hervorbrachte und zweitens auch sinnvoll interpretiert werden konnte.



Die DCE waren wie folgt konzipiert:

- Pro Experiment wurde den befragten Personen eine Serie von sechs Auswahl-situationen präsentiert.
- Eine Auswahl-situation bestand in der gleichzeitigen Präsentation von jeweils zwei Produkten (Birken, Kleiderschränke oder Gusseisenpfannen), die hinsichtlich Preis und Aussehen keine Unterschiede aufwiesen, sich jedoch bezüglich der Produktinformationen unterschieden. Damit konnte der Effekt von Produktinformationen isoliert untersucht werden unter Ausschluss von möglichen Effekten der Drittvariablen Preis und Aussehen.
- Die Befragten mussten nun angeben, welches der beiden Projekte sie eher kaufen würden. Dabei beurteilten sie die Produkte anhand von 4 bis 6 Produktinformationen mit einer Skala von A (sehr ökologisch nachhaltig) bis E (überhaupt nicht ökologisch nachhaltig). Innerhalb desselben Experiments wurden über alle Auswahl-situationen hinweg dieselben Produktinformationen, aber unterschiedliche Ausprägungen präsentiert. Die Ausprägungen wurden mittels Zufallsprinzip ermittelt. Um die Komplexität des Experiments nicht zu überstrapazieren, wurde jeweils eine Zufallsauswahl zwischen den Ausprägungen «B» oder «D» getroffen. Damit reduzierte sich die Anzahl möglicher Kombinationen von Produktinformationen auf eine Grösse, die aus statistischer Sicht vertretbar war.⁵ Zusätzlich wurde die Regel festgelegt, dass beide präsentierten Produkte gleich häufig Produktinformationen mit «B» aufwiesen. Damit wurde sichergestellt, dass die Personen Produkte gegeneinander abwägen mussten und sich nicht für offensichtlich besser präsentierte Produkte entscheiden konnten (z.B., wenn ein Produkt nur «B»-Skalenwerte und das andere nur «D»-Skalenwerte hat). Zusätzlich wurde eine letzte Produktinformation zum «Gesamt-energieverbrauch für Herstellung, Lagerung, Transport und Entsorgung» ergänzt, die für beide präsentierten Produkte die Ausprägung «C» aufwies.
- Die Fixierung der Anzahl Produktinformationen mit Ausprägung «B» respektive «D» hatte bei der Regressionsanalyse zur Folge, dass das Modell die Ausprägung der letzten Produktinformation im Voraus definieren konnte.⁶ Dies verunmöglicht es für die Analyse, die Koeffizienten aller Eigenschaften (d.h. unabhängigen Variablen) gleichzeitig im Regressionsmodell zu schätzen. Deshalb musste ein alternativer Ansatz gewählt werden, indem das Modell mehrmals geschätzt wurde, wobei bei jeder Schätzung eine andere unabhängige Variable weggelassen wurde. Bei einem Experiment mit fünf Eigenschaften heisst dies, dass fünf Regressionsmodelle geschätzt wurden. Für die Verdichtung der Regressionsergebnisse und zur besseren Veranschaulichung der Ergebnisse wurde anschliessend der Mittelwert der Regressionskoeffizienten pro Eigenschaft (d.h. pro unabhängige Variable) sowie die Standardabweichung der Regressionskoeffizienten pro Experiment und Verwendungszweck berechnet. Die Eigenschaft mit dem tiefsten durchschnittlichen Regressionskoeffizienten wurde auf 0 gesetzt und die anderen durchschnittlichen Regressionskoeffizienten um diesen Wert absolut ergänzt. Dies soll es ermöglichen, die relative Wichtigkeit einzelner Eigenschaften besser zu erfassen.

Ein Link zwischen der Cluster-Analyse und dem Discrete-Choice-Experiment war konzeptionell angedacht. Es hat sich jedoch bei den Auswertungen gezeigt, dass es im Experiment keine signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Clustern gibt.

⁵ Hätte man eine Zufallsauswahl aus allen fünf Ausprägungen («A» bis «E») getroffen, wäre die Anzahl möglicher Kombinationen zu hoch gewesen, da mit der verfügbaren Stichprobe nur ein kleiner Teil davon hätte abgefragt werden können.

⁶ Beispiel: Bei einem Produkt mit fünf Produktinformationen wird vorgegeben, dass drei Produktinformationen die Ausprägung «B» und zwei Produktinformationen die Ausprägung «D» haben sollen. Wenn bei den ersten vier Produktinformationen zweimal die Ausprägung «B» und zweimal die Ausprägung «D» vorliegt, ist klar, dass die fünfte Eigenschaft die Ausprägung «B» haben muss.



Im Abschnitt 2.2 sind die für die DCE verwendeten Produktinformationen im Detail aufgeführt sowie die Ergebnisse der DCE dargestellt.

6.2.2 Survey im Kanton Zürich

Ergänzend zur schweizweiten Befragung wurden im Kanton Zürich 200 Personen bezüglich ihrer Einstellungen zu Paketboxen im eigenen Quartier und zur Zustellung von Paketen befragt. Die Resultate sind in einem gesonderten Bericht festgehalten (Haefeli et al. 2022).

6.2.3 Survey bei Nutzenden der SmartBoxBasel

Als zweite Ergänzung zur schweizweiten Befragung wurden im Juni 2022 sämtliche damals registrierte Nutzende (268) der SmartBox Basel (Paketboxen) durch den Betreiber der SmartBox Basel angeschrieben. Die Resultate sind ebenfalls in einem gesonderten Bericht festgehalten (Haefeli et al. 2023).

6.3 Cluster-Analyse: einbezogene Variablen

Tabelle 25: Variablen, die in die Clusterbildung einbezogen wurden

s	Ausprägungen	Skalenniveau
Ausgaben Online-Handel im Vergleich zu Einkaufen vor Ort in den letzten 30 Tagen	Von (1) «Ich gebe deutlich mehr Geld im Online- Handel aus.» bis (2) «Ich gebe deutlich weniger Geld im Online- Handel aus.»	kategorial
Häufigkeit Online-Einkauf in den letzten 30 Tagen	Wie oft haben Sie in den letzten 30 Tagen Waren online bestellt?	metrisch
Ausgaben im Online-Handel in den letzten 30 Tagen (Total)	Wie viel Geld haben Sie in den letzten 30 Tagen für Waren ausgegeben, die Sie online bestellt haben?	metrisch
Nachhaltigkeit des Online-Handels im Vergleich zu Einkaufen vor Ort	Item: «Der Online-Handel ist ökologischer.» Bewertung auf Skala von (1) «stimme überhaupt nicht zu» bis (5) «stimme voll und ganz zu»	kategorial
Kostenoptimierung	Faktor aus Faktorenanalyse	metrisch
Kontakt und Vertrauen	Faktor aus Faktorenanalyse	metrisch

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.

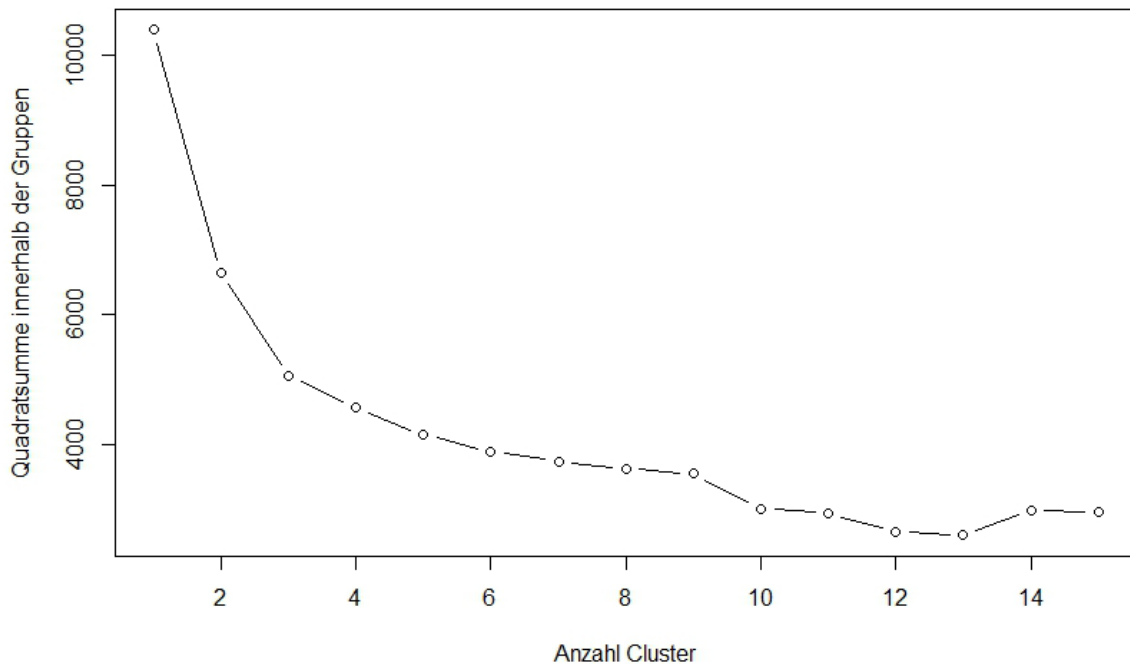


Abbildung 37: WSS-Plot zur statistischen Überprüfung der Cluster-Lösungen

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.

Der WSS-Plot bildet die jeweiligen Quadratsummen innerhalb der Gruppen ab und ermittelt diese Kennzahlen für jeweils jede mögliche Anzahl an Cluster. Der Abbildung 37 kann entnommen werden, dass die Lösung mit drei Clustern die beste ist. Ab drei Cluster verringert sich die Quadratsumme nur noch langsam, weshalb kein grosser Informationsgewinn daraus erwartet werden kann, wenn vier oder mehr Cluster gebildet werden.

6.4 Ergebnisse der DCE, unveränderte Regressionskoeffizienten

Wie in Abschnitt 2.2.1 beschrieben wurde, wurden jeweils fünf Regressionen gerechnet. Aufgrund der Koeffizienten kann die relative Wichtigkeit der Produktinformationen für die Kaufentscheidung abgelesen werden. Je positiver und grösser ein Koeffizient ist, desto wichtiger ist die Produktinformation, um sich für ein Produkt zu entscheiden. Je negativer ein Koeffizient, desto marginaler war die Produktinformation für die Kaufentscheidung relativ gesehen im Vergleich mit den anderen Produktinformationen. Die Abbildung 38 gibt keine Auskunft darüber, ob eine Produktinformation insgesamt als bedeutend oder nicht für einen Kauf angesehen wird. Die Produktinformationen müssen in Relation zueinander verglichen werden. Ein negatives Vorzeichen heisst nicht, dass ein Wert «B» bei dieser Produktinformation (eher ökologisch nachhaltig) sich negativ auf den Kauf des Produkts auswirkt, sondern dass diese Produktinformation im Vergleich, sondern nur im Vergleich mit den anderen Produktinformationen.

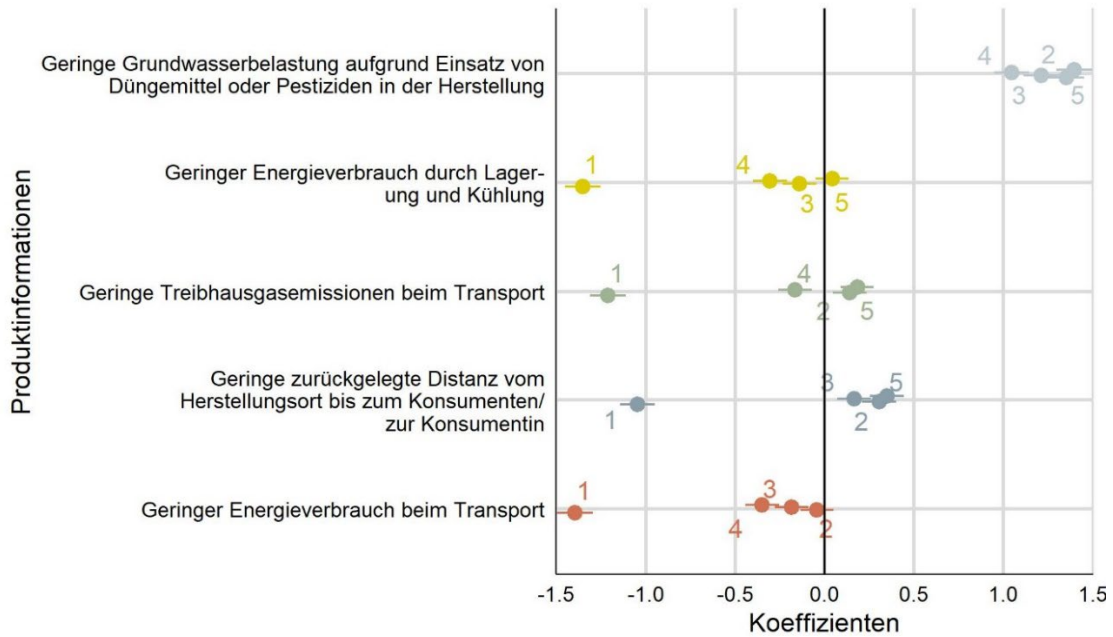


Abbildung 38: Discrete-Choice-Experiment Birne. Regressionskoeffizienten pro Produktinformation

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.

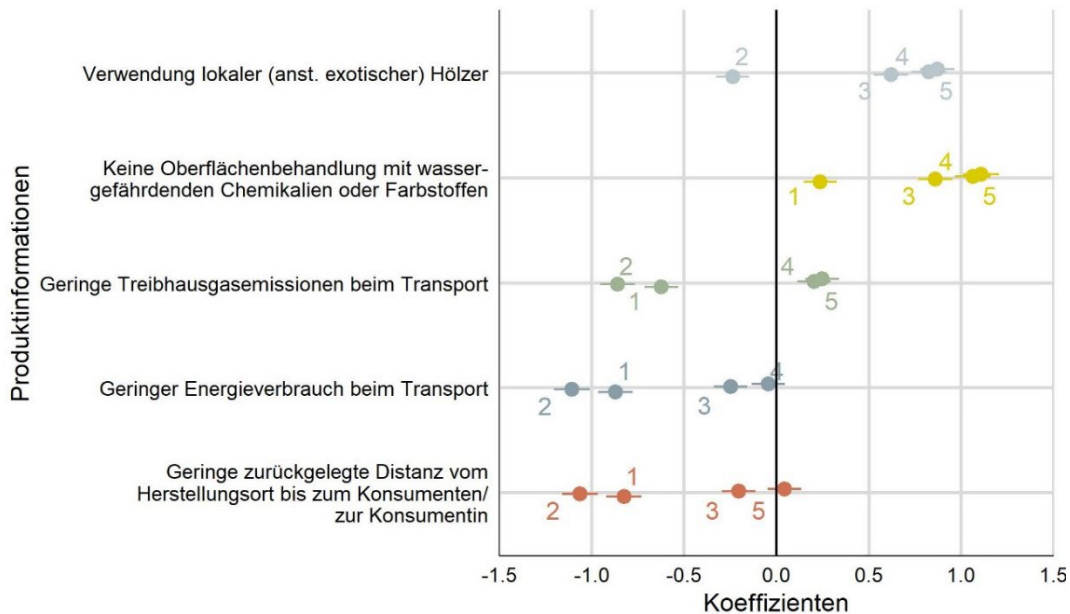


Abbildung 39: Discrete-Choice-Experiment Kleiderschrank. Regressionskoeffizienten pro Produktinformation

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.

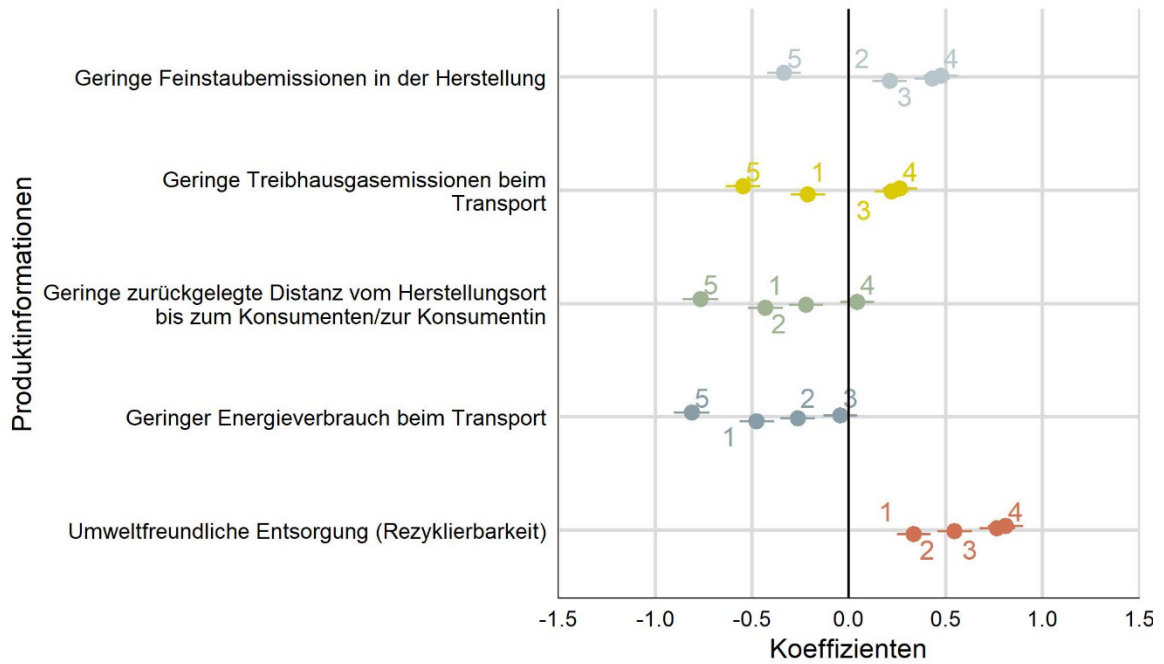


Abbildung 40: Discrete-Choice-Experiment Gusseisenpfanne. Regressionskoeffizienten pro Produktinformation

Quelle: Interface/Rapp AG/ETHZ.

6.5 Modellinputs

Tabelle 26: Liste der Teilketten

ID	Typ	Mode	KEP	Bulk	Hub 1	Hub 2	Hub 3	Hub 4
1	FEEDG	TRCK	TRUE	FALSE	STRA	FAIR		
2	FEEDG	TRCK	TRUE	FALSE	STRA	PAIR		
3	FEEDG	TRCK	FALSE	FALSE	STRA	FAIR		
4	FEEDG	TRCK	FALSE	TRUE	STRA	SEAP		
5	FEEDG	TRCK	TRUE	TRUE	STRA	SEAP		
6	FEEDG	TRCK	FALSE	TRUE	STRA	INLP		
7	FEEDG	TRCK	FALSE	FALSE	STRA	RHBC		
8	FEEDG	TRCK	TRUE	FALSE	STRA	RHBP		
9	FEEDG	TRCK	FALSE	TRUE	STRA	RHBB		
10	FEEDG	TRCK	FALSE	TRUE	STRA	ITER		
11	FEEDG	TRCK	TRUE	TRUE	STRA	ITER		



ID	Typ	Mode	KEP	Bulk	Hub 1	Hub 2	Hub 3	Hub 4
12	FEEDG	TRCK	FALSE	FALSE	STRA	RHUB		
13	FEEDG	TRCK	TRUE	FALSE	STRA	RHUB		
14	FEEDG	TRCK	FALSE	FALSE	STRA	CWAR		
15	FEEDG	TRCK	TRUE	FALSE	STRA	SORT		
16	FEEDG	RAIL	FALSE	TRUE	SDNG	SEAP		
17	FEEDG	RAIL	FALSE	TRUE	SDNG	INLP		
18	FEEDG	RAIL	FALSE	TRUE	SDNG	MAYA		
19	FEEDG	RAIL	FALSE	TRUE	SDNG	ITER		
20	FEEDG	SHIP	FALSE	TRUE	PIER	SEAP		
21	FEEDG	SHIP	FALSE	TRUE	PIER	INLP		
22	FEEDS	RAIL	FALSE	TRUE	MAYA	SEAP		
23	FEEDS	RAIL	FALSE	TRUE	MAYA	INLP		
24	FEEDS	RAIL	FALSE	TRUE	MAYA	MAYA	SEAP	
25	FEEDS	RAIL	FALSE	TRUE	MAYA	MAYA	INLP	
26	FEEDS	RAIL	FALSE	TRUE	ITER	SEAP		
27	FEEDS	RAIL	TRUE	TRUE	ITER	SEAP		
28	FEEDS	RAIL	FALSE	TRUE	ITER	INLP		
29	FEEDS	SHIP	FALSE	TRUE	INLP	ITER		
30	FINTP	TRCK	TRUE	FALSE	RHUB	SORT	FAIR	
31	FINTP	TRCK	TRUE	FALSE	RHUB	SORT	PAIR	
32	FINTP	TRCK	TRUE	FALSE	RHUB	SORT	SEAP	
33	FINTP	RAIL	TRUE	FALSE	RHUB	SORT	SEAP	
34	FINTP	TRCK	TRUE	FALSE	SORT	FAIR		
35	FINTP	TRCK	TRUE	FALSE	SORT	PAIR		
36	FINTP	TRCK	TRUE	FALSE	SORT	SEAP		
37	FINTP	RAIL	TRUE	FALSE	SORT	SEAP		
38	FINTP	TRCK	TRUE	FALSE	SORT	SORT	FAIR	
39	FINTP	TRCK	TRUE	FALSE	SORT	SORT	PAIR	
40	FINTP	TRCK	TRUE	FALSE	SORT	SORT	SEAP	
41	FINTP	RAIL	TRUE	FALSE	SORT	SORT	SEAP	
42	FINTP	TRCK	TRUE	FALSE	ITER	SORT	FAIR	
43	FINTP	TRCK	TRUE	FALSE	ITER	SORT	PAIR	
44	FINTP	TRCK	TRUE	FALSE	ITER	SORT	SEAP	



ID	Typ	Mode	KEP	Bulk	Hub 1	Hub 2	Hub 3	Hub 4
45	FINTP	RAIL	TRUE	FALSE	ITER	SORT	SEAP	
46	FINTP	TRCK	TRUE	FALSE	ITER	SORT	SORT	FAIR
47	FINTP	TRCK	TRUE	FALSE	ITER	SORT	SORT	PAIR
48	FINTP	TRCK	TRUE	FALSE	ITER	SORT	SORT	SEAP
49	FINTP	RAIL	TRUE	FALSE	ITER	SORT	SORT	SEAP
50	MAINO	AIRC	TRUE	FALSE	FAIR	FAIR		
51	MAINO	AIRC	FALSE	FALSE	FAIR	FAIR		
52	MAINO	AIRC	TRUE	FALSE	FAIR	CAIR		
53	MAINO	AIRC	TRUE	FALSE	CAIR	FAIR		
54	MAINO	AIRC	TRUE	FALSE	CAIR	CAIR		
55	MAINO	AIRC	TRUE	FALSE	PAIR	PAIR		
56	MAINO	AIRC	FALSE	FALSE	PAIR	PAIR		
57	MAINO	AIRC	TRUE	FALSE	PAIR	PAIR	PAIR	
58	MAINO	AIRC	FALSE	FALSE	PAIR	PAIR	PAIR	
59	MAINO	AIRC	TRUE	FALSE	FAIR	FAIR	PAIR	
60	MAINO	AIRC	FALSE	FALSE	FAIR	FAIR	PAIR	
61	MAINO	AIRC	TRUE	FALSE	PAIR	FAIR	FAIR	
62	MAINO	AIRC	FALSE	FALSE	PAIR	FAIR	FAIR	
63	MAINO	AIRC	TRUE	FALSE	CAIR	CAIR	PAIR	
64	MAINO	AIRC	TRUE	FALSE	PAIR	CAIR	CAIR	
67	MAINO	AIRC	TRUE	FALSE	FAIR	FAIR	CAIR	
68	MAINO	AIRC	TRUE	FALSE	FAIR	CAIR	FAIR	
69	MAINO	AIRC	TRUE	FALSE	CAIR	FAIR	FAIR	
70	MAINO	AIRC	TRUE	FALSE	FAIR	CAIR	CAIR	
71	MAINO	AIRC	TRUE	FALSE	CAIR	FAIR	CAIR	
72	MAINO	AIRC	TRUE	FALSE	CAIR	CAIR	FAIR	
73	MAINO	AIRC	TRUE	FALSE	CAIR	CAIR	CAIR	
74	MAINO	SHIP	FALSE	TRUE	SEAP	SEAP		
75	MAINO	SHIP	TRUE	TRUE	SEAP	SEAP		
76	MAINO	RAIL	FALSE	TRUE	MAYA	MAYA		
77	MAINO	RAIL	TRUE	TRUE	MAYA	MAYA		
78	MAINO	RAIL	FALSE	TRUE	MAYA	MAYA	MAYA	
79	MAINO	RAIL	TRUE	TRUE	MAYA	MAYA	MAYA	



ID	Typ	Mode	KEP	Bulk	Hub 1	Hub 2	Hub 3	Hub 4
80	MAINO	RAIL	FALSE	TRUE	ITER	ITER		
81	MAINO	RAIL	TRUE	TRUE	ITER	ITER		
82	MAINO	RAIL	FALSE	TRUE	ITER	ITER	ITER	
83	MAINO	RAIL	TRUE	TRUE	ITER	ITER	ITER	
84	MAINE	TRCK	TRUE	FALSE	FAIR	SORT		
85	MAINE	TRCK	TRUE	FALSE	PAIR	SORT		
86	MAINE	SHIP	FALSE	TRUE	SEAP	INLP		
87	MAINE	SHIP	FALSE	TRUE	INLP	INLP		
88	MAINE	RAIL	FALSE	TRUE	INLP	ITER		
89	MAINE	RAIL	FALSE	TRUE	INLP	ITER	ITER	
90	MAINE	RAIL	FALSE	TRUE	INLP	MAYA		
91	MAINE	RAIL	FALSE	TRUE	INLP	MAYA	MAYA	
92	MAINE	TRCK	FALSE	FALSE	INLP	RHBC		
93	MAINE	TRCK	FALSE	TRUE	INLP	RHBB		
94	MAINE	TRCK	FALSE	FALSE	INLP	CWAR		
95	MAINE	TRCK	FALSE	FALSE	INLP	RHUB		
96	MAINE	RAIL	FALSE	TRUE	ITER	ITER		
97	MAINE	RAIL	TRUE	TRUE	ITER	ITER		
98	MAINE	RAIL	FALSE	TRUE	ITER	ITER	ITER	
99	MAINE	RAIL	TRUE	TRUE	ITER	ITER	ITER	
100	MAINE	TRCK	FALSE	TRUE	ITER	CWAR		
101	MAINE	TRCK	TRUE	TRUE	ITER	RHUB		
102	MAINE	TRCK	FALSE	TRUE	ITER	RHUB		
103	MAINE	RAIL	FALSE	TRUE	MAYA	MAYA		
104	MAINE	RAIL	TRUE	TRUE	MAYA	MAYA		
105	MAINE	RAIL	FALSE	TRUE	MAYA	MAYA	MAYA	
106	MAINE	RAIL	TRUE	TRUE	MAYA	MAYA	MAYA	
107	MAINE	RAIL	FALSE	FALSE	MAYA	RHBC		
108	MAINE	RAIL	TRUE	FALSE	MAYA	RHBP		
109	MAINE	RAIL	FALSE	TRUE	MAYA	RHBB		
110	MAINE	TRCK	FALSE	TRUE	RHUB	RHUB		
111	MAINE	TRCK	FALSE	TRUE	FAIR	RHUB		
112	MAINE	TRCK	FALSE	TRUE	PAIR	RHUB		



ID	Typ	Mode	KEP	Bulk	Hub 1	Hub 2	Hub 3	Hub 4
113	MAINE	TRCK	FALSE	TRUE	FAIR	CWAR		
114	MAINE	TRCK	FALSE	TRUE	PAIR	CWAR		
115	MAINI	TRCK	TRUE	FALSE	FAIR	SORT		
116	MAINI	TRCK	TRUE	FALSE	FAIR	SORT		
117	MAINI	TRCK	TRUE	FALSE	PAIR	SORT		
118	MAINI	RAIL	FALSE	TRUE	INLP	ITER		
119	MAINI	RAIL	FALSE	TRUE	INLP	MAYA		
120	MAINI	TRCK	FALSE	TRUE	INLP	CWAR		
121	MAINI	TRCK	FALSE	TRUE	INLP	RHUB		
122	MAINI	TRCK	FALSE	FALSE	RHBC	CWAR		
123	MAINI	TRCK	FALSE	FALSE	RHBC	RHUB		
124	MAINI	TRCK	TRUE	FALSE	RHBP	RHUB		
125	MAINI	TRCK	FALSE	TRUE	RHBB	RHUB		
126	MAINI	RAIL	FALSE	TRUE	MAYA	MAYA		
127	MAINI	RAIL	TRUE	TRUE	MAYA	MAYA		
128	MAINI	RAIL	FALSE	TRUE	MAYA	MAYA	MAYA	
129	MAINI	RAIL	TRUE	TRUE	MAYA	MAYA	MAYA	
130	MAINI	RAIL	FALSE	FALSE	MAYA	RHBC		
131	MAINI	RAIL	TRUE	FALSE	MAYA	RHBP		
132	MAINI	RAIL	FALSE	TRUE	MAYA	RHBB		
133	MAINI	RAIL	FALSE	FALSE	MAYA	MAYA	RHBC	
134	MAINI	RAIL	TRUE	FALSE	MAYA	MAYA	RHBP	
135	MAINI	RAIL	FALSE	TRUE	MAYA	MAYA	RHBB	
136	MAINI	TRCK	FALSE	TRUE	RHUB	RHUB		
137	MAINI	TRCK	FALSE	TRUE	FAIR	RHUB		
138	MAINI	TRCK	FALSE	TRUE	PAIR	RHUB		
139	MAINI	TRCK	FALSE	TRUE	FAIR	CWAR		
140	MAINI	TRCK	FALSE	TRUE	PAIR	CWAR		
141	MAINN	RAIL	FALSE	FALSE	RHBC	MAYA	RHBC	
142	MAINN	RAIL	TRUE	FALSE	RHBP	MAYA	RHBP	
143	MAINN	RAIL	FALSE	TRUE	RHBB	MAYA	RHBB	
144	MAINN	RAIL	FALSE	FALSE	RHBC	MAYA	RHBC	
145	MAINN	RAIL	TRUE	FALSE	RHBP	MAYA	RHBP	



ID	Typ	Mode	KEP	Bulk	Hub 1	Hub 2	Hub 3	Hub 4
146	MAINN	RAIL	FALSE	TRUE	RHBB	MAYA	RHBB	
147	MAINN	RAIL	FALSE	FALSE	RHBC	MAYA	MAYA	RHBC
148	MAINN	RAIL	TRUE	FALSE	RHBP	MAYA	MAYA	RHBP
149	MAINN	RAIL	FALSE	TRUE	RHBB	MAYA	MAYA	RHBB
150	MAINN	RAIL	FALSE	FALSE	RHBC	MAYA	MAYA	RHBC
151	MAINN	RAIL	TRUE	FALSE	RHBP	MAYA	MAYA	RHBP
152	MAINN	RAIL	FALSE	TRUE	RHBB	MAYA	MAYA	RHBB
153	MAINN	RAIL	FALSE	TRUE	MAYA	MAYA		
154	MAINN	RAIL	TRUE	TRUE	MAYA	MAYA		
155	MAINN	RAIL	FALSE	TRUE	ITER	ITER		
156	MAINN	RAIL	TRUE	TRUE	ITER	ITER		
157	MAINN	RAIL	FALSE	TRUE	ITER	ITER	ITER	
158	MAINN	RAIL	TRUE	TRUE	ITER	ITER	ITER	
159	MAINN	RAIL	TRUE	FALSE	SORT	SORT		
160	MAINN	TRCK	TRUE	FALSE	SORT	SORT		
161	INTDI	RAIL	FALSE	FALSE	CWAR	RHUB		
162	INTDI	TRCK	FALSE	FALSE	CWAR	RHUB		
163	INTDI	RAIL	TRUE	FALSE	SORT	RHUB		
164	INTDI	TRCK	TRUE	FALSE	SORT	RHUB		
165	POSTN	TRCK	FALSE	FALSE	FAIR	STRA		
166	POSTN	TRCK	FALSE	TRUE	INLP	STRA		
167	POSTN	RAIL	FALSE	TRUE	MAYA	SDNG		
168	POSTN	TRCK	TRUE	TRUE	ITER	STRA		
169	POSTN	TRCK	FALSE	TRUE	ITER	STRA		
170	POSTN	TRCK	FALSE	FALSE	RHBC	STRA		
171	POSTN	TRCK	TRUE	FALSE	RHBP	STRA		
172	POSTN	TRCK	FALSE	TRUE	RHBB	STRA		
173	POSTN	TRCK	FALSE	FALSE	CWAR	STRA		
174	POSTN	TRCK	TRUE	FALSE	RHUB	STRA		
175	POSTN	TRCK	FALSE	FALSE	RHUB	STRA		
176	POSTN	TRCK	TRUE	FALSE	SORT	STRA		
177	DIREC	RAIL	FALSE	TRUE	SDNG	SDNG		
178	DIREC	TRCK	FALSE	TRUE	STRA	STRA		



ID	Typ	Mode	KEP	Bulk	Hub 1	Hub 2	Hub 3	Hub 4
179	DIREC	SHIP	FALSE	TRUE	PIER	PIER		
180	MAINN	TRCK	FALSE	TRUE	RHUB	RHUB		
181	POSTN	TRCK	FALSE	FALSE	PAIR	STRA		

Tabelle 27: Stark vereinfacht geschätzte Emissionsintensitäten verschiedener Energieträger für Länder ohne Länder-spezifische Daten (WKK: Wärme-Kraft-Kopplung).

Brennstoff	Geschätzte Emissionsintensität
Steinkohle (keine WKK)	1.1 kg CO ₂ e/kWh Strom
Braunkohle (keine WKK)	1.2 kg CO ₂ e/kWh Strom
Torf (keine WKK)	1.2 kg CO ₂ e/kWh Strom
Erdgas (keine WKK)	0.5 kg CO ₂ e/kWh Strom
Hüttengas (keine WKK)	0.5 kg CO ₂ e/kWh Strom
Kohlegas (keine WKK)	0.5 kg CO ₂ e/kWh Strom
Abfall (keine WKK)	1.0 kg CO ₂ e/kWh Strom
Heizöl (keine WKK)	0.8 kg CO ₂ e/kWh Strom
Biogas (keine WKK)	0.8 kg CO ₂ e/kWh Strom
Holz (keine WKK)	0.96 kg CO ₂ e/kWh Strom
Steinkohle (WKK)	0.88 kg CO ₂ e/kWh Strom
Braunkohle (WKK)	0.96 kg CO ₂ e/kWh Strom
Torf (WKK)	0.96 kg CO ₂ e/kWh Strom
Erdgas (WKK)	0.4 kg CO ₂ e/kWh Strom
Heizöl (WKK)	0.64 kg CO ₂ e/kWh Strom
Biogas (WKK)	0.65 kg CO ₂ e/kWh Strom
Andere	0.5 kg CO ₂ e/kWh Strom