

Klimabilanz von Parkraumbewirtschaftungskonzepten im Vergleich

Kamerabasierte Free-Flow-Systeme als Alternative zum konventionell
beschränkten Parken

KLIMABILANZ VON PARKRAUMBEWIRTSCHAFTUNGSKONZEPTEN IM VERGLEICH

KAMERABASIERTE FREE-FLOW-SYSTEME ALS ALTERNATIVE ZUM KONVENTIONELL BESCHRANKTEN PARKEN

Autoren: Janek Röttgen¹, Leonard Janzen¹, Jürgen Bertling¹, Daniel Maga¹, Matthias Werner²

Kontakte: ¹**Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT** (Auftragnehmer)
Osterfelder Straße 3, 46047 Oberhausen
www.umsicht.fraunhofer.de

Ansprechpartner: Janek Röttgen
janek.roettgen@umsicht.fraunhofer.de

²**fair parken GmbH** (Auftraggeber)
Grafenberger Allee 337c, 40235 Düsseldorf
<https://www.fairparken.com>

Ansprechpartner: Matthias Werner
werner.matthias@fairparken.com

Beiträge (CRediT): **Janek Röttgen:** Conceptualization, Data Curation, Formal analysis, Investigation, Methodology, Project administration, Validation, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing **Leonard Janzen:** Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Investigation, Methodology, Visualization, Writing – original draft, **Jürgen Bertling:** Conceptualization, Investigation, Supervision, Validation, Writing – review & editing, **Daniel Maga:** Conceptualization, Investigation, Supervision, Validation, Writing – review & editing, **Matthias Werner:** Conceptualization, Data curation, Project administration, Resources, Validation

Titelfoto: © shubas/Adobe Stock

Ausgabe: Juli 2025

Im Internet verfügbar: publica.fraunhofer.de, DOI: 10.24406/publica-5485

Nutzungsbedingungen: CC BY-SA 4.0

Zitierweise: Röttgen, J.; Janzen, L.; Bertling J.; Maga, D.; Werner M. (2025): *Klimabilanz von Parkraumbewirtschaftungskonzepten im Vergleich: Kamerabasierte Free-Flow-Systeme als Alternative zum konventionell beschränkten Parken*. Oberhausen. DOI: 10.24406/publica-5485.

Inhalt

1	Executive Summary.....	1
2	Beschränktes Parken und Free-Flow	2
2.1	Worum geht es?.....	2
2.2	Was sagen bisherige Studien?.....	3
3	Aufbau der Studie – Ziel und Untersuchungsrahmen	5
4	Sachbilanz - Daten und Modellierung.....	12
5	Wirkungsabschätzung und Beitragsanalyse	27
5.1	»Basis«-Szenario	27
5.2	»Dichter-Verkehr«-Szenario	31
5.3	»Großveranstaltung«-Szenario.....	33
5.4	»Digitale-Zahlung«-Szenario	34
6	Interpretation und Diskussion der Ergebnisse.....	36
6.1	Einordnung der Ergebnisse.....	36
6.2	Datenqualität und Limitationen	40
7	Fazit und Empfehlungen.....	53
	Anhang: Datenbasis und Annahmen.....	56
	Abbildungsverzeichnis	115
	Tabellenverzeichnis	116
	Literatur	118
	Bericht zur kritischen Prüfung	129

1 Executive Summary

Der vorliegende Bericht fasst die Ergebnisse einer Klimabilanzstudie zu zwei alternativen Parkraumbewirtschaftungskonzepten – ein schrankenloses Free-Flow-System und ein klassisches Schranken-System – zusammen. Das Free-Flow-System zielt darauf ab, den Verkehrsfluss zu optimieren, indem auf eine Beschränkung verzichtet wird und ein- sowie ausfahrende Fahrzeuge automatisch erfasst werden. Ziel dieser Studie war es, die potenzielle Klimawirkung der beiden Bewirtschaftungskonzepte (gemessen in CO₂-Äquivalenten) pro Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang einer Parkraumnutzung zu ermitteln und Unterschiede in den Treibhausgasemissionen quantifizierbar zu machen. Analysiert wurden dabei alle für den kommerziellen Betrieb eines Parkraums relevanten Bestandteile: Die Organisation und Abwicklung von Ein- und Ausfahrt (einschließlich möglicher durch das Bewirtschaftungskonzept bedingter Wartezeiten oder Stausituationen) sowie die Zahlungsabwicklung. Aspekte wie Parkleitsysteme oder der Parksuchverkehr innerhalb des Parkraums selbst blieben unberücksichtigt, da sie kein Teil des kommerziellen Bewirtschaftungskonzepts für einen Parkraum sind bzw. nicht durch dieses beeinflusst werden. Die Studie bezog sich auf einen fiktiven, aber repräsentativen, kostenpflichtigen Parkraum im Off-Street-Bereich¹ in Deutschland. In der Bewertung wurden verschiedene Szenarien in Bezug auf das Verkehrsaufkommen sowie die Zahlungsvarianten ausgewertet.

Die Ergebnisse zeigen für alle betrachteten Szenarien potenzielle Treibhausgaseinsparungen für das Free-Flow-System. Diese liegen je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang im Bereich von rund 8 bis 915 g CO₂-Äquivalenten, das entspricht einem Einsparpotenzial von 31 % bis 60 % gegenüber dem Schranken-System. Die höheren Einsparwerte beziehen sich dabei auf Extremfälle und werden in der Praxis somit eher selten erreicht. Der Kraftstoffverbrauch/Energiebedarf der Fahrzeuge beim Durchfahren des Ein- und Ausfahrtsbereichs hat einen signifikanten Einfluss auf die potenzielle Klimawirkung. Bei einem niedrigen Verkehrsaufkommen leistet zudem die Finanztransaktion (insbesondere mit Bargeld) einen signifikanten Beitrag. Im Falle des Schranken-Systems ergibt sich durch die zusätzlichen Abbrems- und Beschleunigungsvorgänge sowie längeren Haltephasen vor der Schranke ein gesteigerter Kraftstoffverbrauch/Energiebedarf der Fahrzeuge und folglich höhere Treibhausgasemissionen. Dieser Effekt verstärkt sich bei zunehmendem Verkehrsaufkommen mit Stop-and-Go-Verkehr im Ein- und Ausfahrtsbereich des Schranken-Systems.

Limitationen der Studie ergeben sich insbesondere durch die fehlende empirische Fundierung der Staubildung auf und vor Parkräumen in den Szenarien mit erhöhtem Verkehrsaufkommen sowie durch die Beschränkung der Studie auf die Klimawirkung. Indirekte Rebound-Effekte durch eine mögliche Nachfrageänderung wurden aufgrund der zusätzlichen Komplexität im Rahmen dieser Studie ebenfalls nicht untersucht. Eine kritische Prüfung durch einen unabhängigen Sachverständigen ist erfolgt.

¹ Der Begriff »Off-Street-Bereich« im Zusammenhang mit Parkräumen bezieht sich auf alle Parkmöglichkeiten, die nicht direkt auf öffentlichen Straßen (On-Street) liegen, sondern sich auf privaten oder speziell dafür vorgesehenen Flächen befinden.

2 Beschränktes Parken und Free-Flow

2.1 Worum geht es?

In Deutschland waren zum 01.01.2024 rund 49 Millionen PKW zugelassen (Kraftfahrtbundesamt 2024). Ein durchschnittlicher PKW wird über 96 % der Zeit eines Tages nicht aktiv benutzt und verbringt somit den Großteil der Zeit parkend (Nobis und Kuhnimhof 2018). Neben privaten Parkflächen, dem öffentlichen Straßenraum und kostenfreien Parkplätzen, werden dazu kostenpflichtige Parkräume im Off-Street-Bereich genutzt.

Auf kostenpflichtigen Parkräumen im Off-Street-Bereich, wie Parkhäusern oder Tiefgaragen, werden Zufahrt und Ausfahrt traditionell über ein Beschränkungssystem mit Parktickets organisiert. Beim Passieren der Schranke im Einfahrtsbereich wird ein Parkticket zur Verfügung gestellt. Das am Kassenautomaten bezahlte Ticket legitimiert zur Ausfahrt und bewirkt eine Öffnung der Schranke. Eine Alternative zu beschränkten Parkräumen, sind unbeschränkte Parkraumkonzepte, bei welchen die Ein- und Ausfahrt mit Hilfe einer automatisierten optischen Kennzeichenerfassung kontrolliert wird.

Unbeschränkte Parkraumkonzepte sollen die Betreuungsintensität sowie die Instandhaltungs- und Wartungskosten für die Betreiber von gebührenpflichtigen Parkräumen reduzieren. Gleichzeitig soll das Parkerlebnis für Kunden durch verringerte Wartezeiten vor Kassenautomat und Schranken optimiert werden. Insbesondere für Situationen mit hohem Verkehrsaufkommen, wie beispielsweise bei Großveranstaltungen, wird erwartet, dass beim schrankenlosen Parkraumkonzept die Staubildung reduziert oder völlig vermieden werden kann. Aus ökologischer Sicht ergibt sich die Frage, ob eine Verminderung des Stop-and-Go-Verkehrs im Ein- und Ausfahrtsbereich aufgrund des reduzierten Kraftstoffverbrauchs bzw. Energiebedarfs der Fahrzeuge und verringerte Energiebedarfe durch das fehlende Beschränkungssystem signifikante Vorteile gegenüber beschränkten Parkräumen erzielen kann. Demgegenüber steht ein zusätzlicher Energiebedarf für die Kennzeichenerfassung sowie Datenübertragung und -verarbeitung.

Die fair parken GmbH ist ein Anbieter, welcher unbeschränkte Parkraumkonzepte für bestehende und neue Parkräume als Dienstleister umsetzt. Das sogenannte Free-Flow-System ist dabei charakterisiert durch ein System zur Kennzeichenerfassung im Bereich der Ein- und Ausfahrt sowie den Wegfall von Schranken und Parktickets. Neben der Bezahlungsmöglichkeit vor Ort am Kassenautomat, kann zudem auch online über die firmeneigene Webseite bis zu 48 Stunden nach Verlassen des Parkraumes bezahlt werden. Um die aus dem Free-Flow-Konzept resultierende potenzielle Klimawirkung gegenüber beschränkten Parkräumen zu untersuchen und zu quantifizieren hat die fair parken GmbH die vorliegende Studie beauftragt.

2.2 Was sagen bisherige Studien?

Nach dem Kenntnisstand der Autoren dieser Studie sowie der Experten der fair parken GmbH, existieren zum aktuellen Zeitpunkt keine wissenschaftlichen Studien zum Vergleich der Klimabilanz von beschränkten und unbeschränkten Parkraumkonzepten. Cruz et al. (2017) haben im Kontext des Parkraummanagements verschiedene Strategien zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen von Pendlerverkehr am Beispiel der Universität Coimbra (Portugal) untersucht. Die dabei analysierten Szenarien umfassen Maßnahmen zur Reduzierung der Nachfrage (bspw. höhere Strafen für Falschparker oder höhere Parkgebühren) sowie Maßnahmen zur Beschränkung der Zufahrt auf Fahrzeuge mit Elektroantrieb. Strategien zur Verkehrsflussoptimierung sind hier nicht Gegenstand der Untersuchung. Chester et al. (2010) haben für die Situation in den Vereinigten Staaten die mit der Bereitstellung von Parkrauminfrastruktur einhergehenden Umweltwirkungen modelliert und den Einfluss auf die Gesamtwirkung einer PKW-Fahrt ermittelt.

Darüber hinaus beschäftigen sich verschiedene Studien allgemein mit der Bedeutung von Stausituationen bzw. der Bedeutung einer Verkehrsflussoptimierung für verkehrsbedingte Umweltwirkungen, ohne jedoch einen konkreten Bezug zu Parkräumen herzustellen. Im Rahmen einer Untersuchung zu verschiedenen Verkehrsflussverstetigungsmaßnahmen, haben Schmaus et al. (2023) u. a. den Effekt einer optimierten Steuerung von Lichtsignalanlagen an Knotenpunkten auf die verkehrsbezogenen Treibhausgasemissionen untersucht. Aufgrund von Rebound-Effekten (durch ein gesteigertes Verkehrsaufkommen) ergaben sich hierbei allerdings keine Einsparungen, sondern insgesamt gesteigerte Emissionen. Demgegenüber zeigen die Studien von Barth und Boriboonsomsin (2009) sowie Pelkmans et al. (2005) Potenziale zur Reduzierung der verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen für Strategien zur Verkehrsflussverstetigung und Verkehrsflussglättung auf. Zur Reduzierung von verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen empfehlen die Autoren konkret Stauminderungsmaßnahmen (bspw. Störungsmanagement und Staugebühren), Geschwindigkeitsmanagementstrategien (bspw. überhöhte Geschwindigkeiten auf moderatere Geschwindigkeiten von ca. 90 km/h reduzieren) sowie Strategien zur Verkehrsglättung, welche die Anzahl und Intensität von Beschleunigungs- und Abbremsvorgängen verringern (z. B. variable Geschwindigkeitsbegrenzungen).

Nach Li et al. (2014) können durch den Einsatz moderner Assistenzsysteme Vorteile in Bezug auf die Reaktionszeit und Informationsaustausch zwischen den Fahrzeugen gegenüber dem manuellen Fahren in Stausituationen erzielt werden. Die daraus folgende Glättung des Verkehrs führt laut den Autoren zu einer Reduzierung der verkehrsbedingten Umweltwirkungen. Auch Jereb et al. (2018) sowie Srisakda et al. (2022) haben den Einfluss der Signalsteuerung an Knotenpunkten auf den Verkehrsfluss sowie den damit verbundenen Kraftstoffverbrauch untersucht. Die Studien bestätigen eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs bei einer Verkehrsflussverstetigung. Matsuura et al. (2004) haben in ihrer Studie den Einfluss durch Ab- und Wiedereinschalten des Motors beim Halten an einer Ampel auf den Kraftstoffverbrauch untersucht. Die Autoren kommen

zu dem Schluss, dass das Abschalten des Motors beim Halten erst ab einer Haltezeit von mindestens 7 Sekunden zu Vorteilen führt. Grund ist der zusätzliche Kraftstoffverbrauch beim Motorstart. Lizasoain-Arteaga et al. (2020) haben weiterhin die Bedeutung von baustellenbedingten Stausituationen für die ökologische Bewertung von Straßenbaumaßnahmen herausgearbeitet.

Für verschiedene Verkehrssituationen mit Staubildung haben Treiber et al. (2008) zudem einen Ansatz zur Berechnung des Kraftstoffverbrauch von Fahrzeugen auf Basis von fahrzeugbezogenen Eigenschaften, Beschleunigungsprofil, Geschwindigkeit sowie Motorkennfeldern und Schaltschema entwickelt. Einen ähnlichen Ansatz verfolgten die Studien von Ben-Chaim et al. (2013) sowie Dallmeyer et al. (2012). Hier wurden ebenfalls mathematische Berechnungsmodelle für den Kraftstoffverbrauch von PKW in unterschiedlichen Verkehrsszenarien entwickelt (Barth und Boriboonsomsin 2009).

3 Aufbau der Studie – Ziel und Untersuchungsrahmen

Ziel der Studie war es, die potenzielle Klimawirkung der beiden alternativen Parkraumbewirtschaftungskonzepte, gemessen in CO₂-Äquivalenten, pro Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang einer Parkraumnutzung zu ermitteln und Unterschiede in den Treibhausgasemissionen quantifizierbar zu machen. Analysiert wurden dabei alle für den kommerziellen Betrieb eines Parkraums relevanten Bestandteile: Die Organisation und Abwicklung von Ein- und Ausfahrt (einschließlich möglicher durch das Bewirtschaftungskonzept bedingter Wartezeiten oder Stausituationen) sowie die Zahlungsabwicklung. Der Bewirtschaftungsvorgang beschreibt in diesem Zusammenhang sämtliche organisatorische und technische Schritte bezogen auf eine Nutzung, die den kommerziellen Parkraumbetrieb ermöglichen. Der Abrechnungsvorgang deckt anschließend alle Prozesse rund um die Bezahlung der Parkgebühr ab. Aspekte wie Parkleitsysteme oder der Parksuchverkehr innerhalb des Parkraums selbst blieben im Rahmen der Studie unberücksichtigt, da sie kein Teil des kommerziellen Bewirtschaftungskonzepts für einen Parkraum sind bzw. nicht durch dieses beeinflusst werden und somit außerhalb des Untersuchungsrahmens liegen. Die Studie wurde von der fair parken GmbH beauftragt und von Fraunhofer UMSICHT realisiert. Zielgruppe der Studie und des vorliegenden Berichts ist die Geschäftsführung der fair parken GmbH und deren Kunden sowie Expertinnen und Experten aus dem Bereich der Parkraumbewirtschaftung.

Die Klimabilanzstudie wurde in Anlehnung an ISO 14067 sowie ISO 14040 und ISO 14044 durchgeführt. Die wesentlichen Schritte der Bewertung waren:

1. Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens
2. Datensammlung, Modellierung und Erstellung der Sachbilanz
3. Durchführung der Wirkungsabschätzung
4. Analyse und Interpretation der Ergebnisse
5. Kritische Prüfung durch externen Sachverständigen

Wirkungsabschätzung

Der Fokus dieser Studie lag auf der Quantifizierung der relevanten Treibhausgasemissionen sowie deren potenziellen Klimawirkung (Wirkungskategorie Klimawandel). Die Wirkungsabschätzung erfolgte dabei nach ISO 14067 bzw. IPCC (2021). Als Wirkungsindikator diente folglich die globale Verstärkung der Infrarotstrahlung in der Atmosphäre und zur Charakterisierung von Treibhausgasemissionen wurde das zugehörige relative Erderwärmungspotenzial über 100 Jahre im Vergleich zu CO₂ herangezogen (GWP 100). Der Ergebnisse werden in kg CO₂-Äquivalenten angegeben. Eine Liste relevanter Treibhausgase und der zugehörigen Charakterisierungsfaktoren kann bei IPCC (2021) eingesehen werden.

Technologische, zeitliche und geografische Repräsentativität

Die Bewertung beider Parkraumbewirtschaftungskonzepte basiert auf generischen Daten, und adressiert in Abstimmung mit den Experten der fair parken GmbH eine durchschnittliche Situation für den geografischen Bezugsbereich Deutschland. Ein Vergleich herstellerspezifischer Technologien oder Parkraumdesigns einzelner Anbieter an einem bestimmten Standort war nicht Gegenstand der Studie. Zusammen mit Experten aus dem Bereich der Parkraumbewirtschaftung wurde stattdessen ein fiktiver und dennoch repräsentativer, gebührenpflichtiger Parkraum im Off-Street-Bereich als Grundlage für den Vergleich der Klimawirkung definiert. Dieser hat eine Kapazität von 500 Stellplätzen. Zudem wird angenommen, dass sowohl beim Schranken-System als auch beim Free-Flow-System jeweils eine Zufahrt und eine Ausfahrt vorgesehen sind. Für den repräsentativen Parkraum werden bei beiden zu vergleichenden Systemen auf Basis von Experteneinschätzungen 6 Parkvorgänge pro Stellplatz und Tag angesetzt. Die für das Parkraumdesign verwendeten Daten und getroffenen Annahmen sind für beide Alternativen in Tabelle 3 im Anhang zusammengefasst. Für beide Systeme ist zudem der Ablauf eines Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgangs für die Parkraumnutzung vereinfacht in Abbildung 1 und Abbildung 2 dargestellt. Es gilt zu beachten, dass sich die Bewertung in dieser Studie ausschließlich auf diese beiden beschriebenen Parkraumbewirtschaftungskonzepte bezieht. Mögliche hybride Varianten, wie beispielsweise ein Parkraum mit Schrankensystem und zusätzlicher Kennzeichenerfassung ohne Parktickets, wurden im Rahmen der Studie nicht untersucht. Der zeitliche Bezugsrahmen der Studie war 2023 bis 2024. Für die Modellierung des Vordergrundsystems wurden Primärdaten und Expertenschätzungen der fair parken GmbH aus 2024 angesetzt sowie Literaturdaten aus den Jahren 2010 bis 2024. Die Hintergrunddatenbank (»ecoinvent 3.10«, siehe Kapitel 4) enthält teilweise auch ältere Daten.

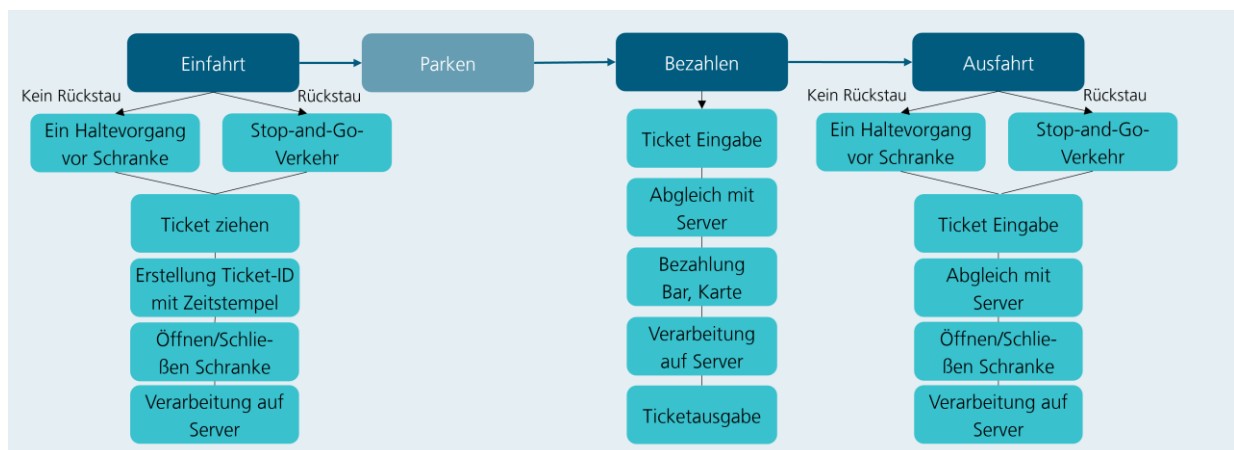


Abbildung 1: Ablauf eines Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgangs für die Parkraumnutzung beim Schranken-System.

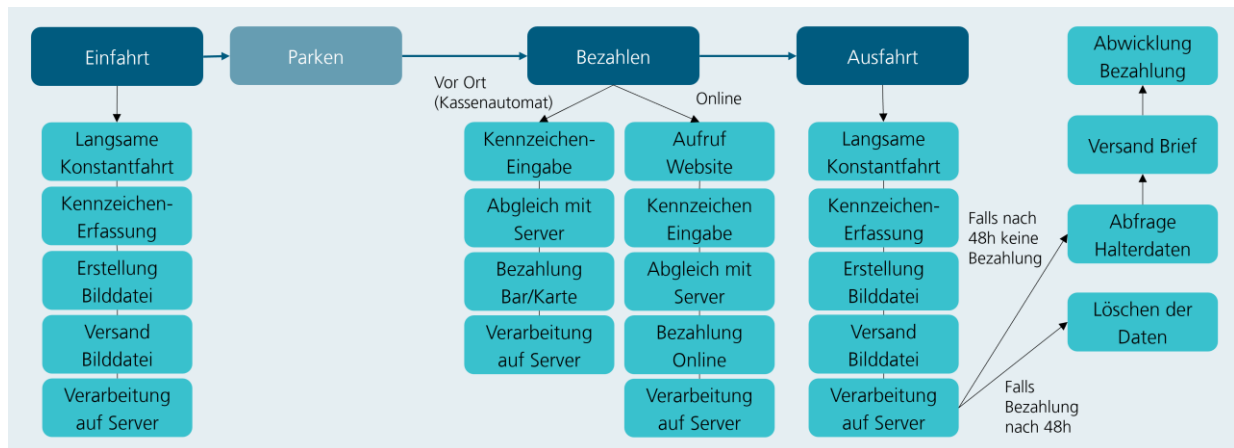


Abbildung 2: Ablauf eines Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgangs für die Parkraumnutzung beim Free-Flow-System.

Systemgrenzen

Im Rahmen der Studie wurden alle für den kommerziellen Betrieb des Parkraums relevanten bzw. durch diesen beeinflussten Bestandteile und Aspekte der Parkraumnutzung berücksichtigt. Hierzu zählt die Abwicklung von Ein- und Ausfahrt, welche die korrekte Berechnung der Parkgebühr sicherstellt, sowie die Abwicklung der Parkgebühreinzahlung selbst. Die Systemgrenzen umfassen somit alle für den kommerziellen Betrieb relevanten Infrastrukturkomponenten und Verbrauchsmaterialien.

Dazu zählt im Falle des Schranken-Systems die Schrankenanlage inklusive Schrankenterminal mit Ticketgeber/-nehmer, während im Falle des Free-Flow-Systems das System zur Kennzeichenerfassung zu den relevanten Infrastrukturkomponenten zählt. Für beide Systeme wurden darüber hinaus die Kassenautomaten, Signalanlagen zur Zugangsbeschränkung sowie Serversysteme zur Datenverarbeitung berücksichtigt. Auch die Finanztransaktion selbst (bar oder digital) war Teil der betrachteten Produktsysteme. Beim Free-Flow-System musste zusätzlich die Möglichkeit zur nachträglichen Zahlung der Parkgebühr im Internet sowie die zusätzlichen Aufwendungen im Falle einer Vertragsstrafe bei ausbleibender Zahlung mit in die Bilanz einbezogen werden. Relevante Verbrauchsmaterialien waren Parktickets (nur Schrankensystem) sowie die Zahlungsquittung. Berücksichtigt wurde der jeweils relevante Teil der PKW-Fahrt (Kraftstoffverbrauch/Energiebedarf und anteilig Fahrzeugherstellung/-verwertung) im Ein- und Ausfahrtsbereich, einschließlich möglicher durch das Bewirtschaftungskonzept bedingter Wartezeiten oder Stausituationen.

Die Bilanzierung erfolgte dabei stets über den gesamten Lebenszyklus (*»cradle-to-grave«*), d. h. von der Herstellung, Distribution und Installation einer Komponente/eines Materials über dessen Nutzung bis zur Verwertung am Ende des Lebenszyklus. Nicht berücksichtigt wurden demgegenüber die Stellplätze selbst, ggf. vorhandene Gebäude, die Beleuchtung, die Überwachung sowie die Be- und Entlüftung eines Parkraums. Diese Bestandteile der Parkrauminfrastruktur sind kein Teil des kommerziellen Bewirtschaftungskonzepts und nicht charakteristisch für das Schrankensystem oder das Free-Flow-System. Weiterhin war eine Bilanzierung von bspw. Parksuchverkehr auf dem Parkraum nicht Gegenstand der

Studie, da dieser nicht durch die Wahl des Bewirtschaftungskonzepts beeinflusst wird. Abbildung 3 gibt einen Überblick über die gewählten Systemgrenzen und zeigt zudem die Einteilung in Vordergrund- und Hintergrundsystem. Das Vordergrundssystem definiert dabei die Material- und Energiebedarfe und das Hintergrundsystem enthält die Treibhausgasemissionen, die bei der Bereitstellung der Material- und Energiebedarfe entstehen.

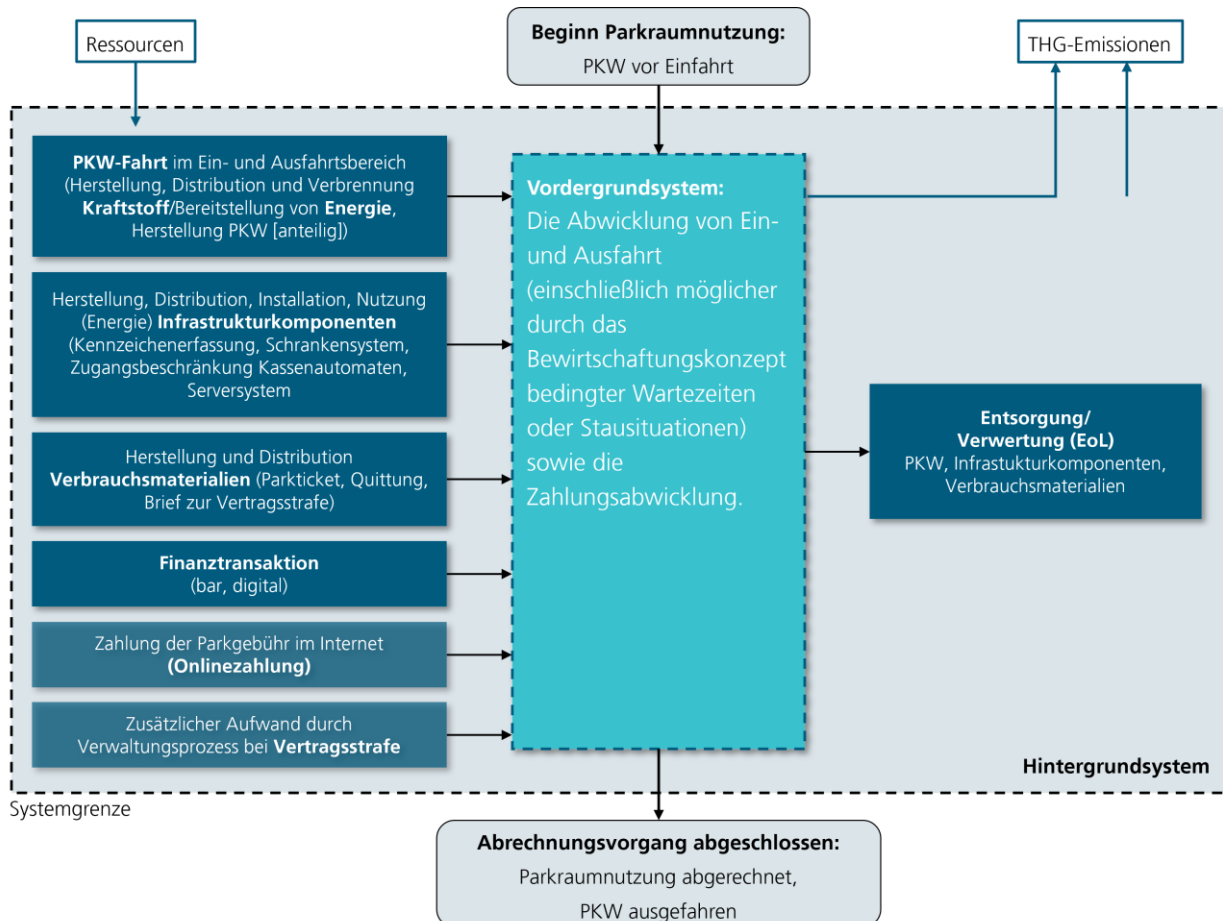


Abbildung 3: Wahl der Systemgrenzen

Funktionelle Einheit

Um einen fairen Vergleich zwischen den beiden Parkraumbewirtschaftungskonzepten zu ermöglichen, muss eine funktionelle Einheit (Vergleichseinheit) festgelegt und alle berücksichtigten Inputs und Outputs in Bezug auf diese skaliert werden. Ein Parkraumbewirtschaftungskonzept legt die Rahmenbedingungen für den kommerziellen Betrieb eines Parkraums fest. Im Fokus stehen wirtschaftliche Ziele durch die entgeltliche Bereitstellung von Parkflächen. Die zentrale Funktion des Bewirtschaftungskonzepts besteht darin, die Höhe der Parkgebühr für die Parkraumnutzung automatisiert und sicher zu ermitteln sowie die Zah-

lungsabwicklung mit dem Nutzer zu organisieren. Um diese Funktion eines Parkraumbewirtschaftungskonzeptes in eine quantifizierbare und vergleichbare Einheit zu überführen, kann entsprechend ein vollständiger Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang für die Parkraumnutzung herangezogen werden. Die funktionelle Einheit wurde im Rahmen der Klimabilanzstudie folglich gewählt als:

»Ein Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang für die einmalige Nutzung eines kommerziell betriebenen Off-Street-Parkraums mit 500 Stellplätzen in Deutschland, einschließlich der Abwicklung von Ein- und Ausfahrt sowie der Zahlungsabwicklung«.

Umgang mit Multifunktionalität

Zur Modellierung der Entsorgung und Verwertung von Materialien am Ende des Lebenszyklus wurde der »allocation, cut-off by classification« Ansatz genutzt. Dies ist konsistent mit der verwendeten Hintergrunddatenbank (siehe Kapitel 4). Der Ansatz gibt vor, dass alle recyclingfähigen Materialien lastenfrei vom untersuchten Produktsystem abgeschnitten werden, während Treibhausgasemissionen aus der Abfallbehandlung nicht rezyklierbarer Materialien vollständig dem untersuchten Produktsystem zugerechnet werden (Wernet et al. 2016; ecoinvent Association 2024). Gutschriften für Energierückgewinnung werden bei diesem Ansatz nicht vergeben. Allokierbare Koppelprodukte fallen im konkreten Anwendungsfall nicht an.

Sensitivitätsanalysen: Untersuchte Szenarien

Ein wesentliches Versprechen des schrankenlosen Free-Flow-Systems gegenüber dem Schranken-System ist die Vermeidung bzw. Reduzierung von Rückstau im Ein- und Ausfahrtbereich eines Parkraums, insbesondere in Situationen mit hohem Verkehrsaufkommen (fair parken GmbH o. J.). Bereits bei der isolierten Betrachtung eines einzelnen PKWs ohne Rückstau fällt das einmalige Abbremsen und Halten vor der Schranke im Falle des Free-Flow-Systems weg. Stattdessen kann der Bereich im Normalfall mit verringerter Geschwindigkeit ohne Halten passiert werden. Die aus der Verkehrsflussoptimierung im Ein- und Ausfahrtsbereich eines Parkraums resultierenden Unterschiede in Bezug auf den Kraftstoffverbrauch/Energiebedarf der PKW können somit deutlich dem gewählten Parkraumbewirtschaftungskonzept zugeschrieben werden. Im Unterschied dazu haben andere Stauursachen, wie bspw. der Parksuchverkehr, kreuzende Fußgänger oder Radfahrer sowie die verkehrstechnische Anbindung eines Parkraums, keinen direkten Bezug zum Bewirtschaftungskonzept und können in beiden Systemen gleichermaßen auftreten.

Im Hinblick auf den zu berücksichtigen Kraftstoffverbrauch/Energiebedarf der Fahrzeuge (PKW-Fahrt) lag der Fokus in der Klimabilanzstudie folglich ausschließlich auf den aus dem Wegfall der Beschränkung resultierenden Unterschieden. Dabei wurde im Falle des Schranken-Systems jeweils der durch die Öffnungs- und Schließzeiten der Schranke induzierte Effekt auf den Verkehrsfluss berücksichtigt, während beim Free-Flow-System eine Konstantfahrt mit reduzierter Geschwindigkeit über jeweils die gleiche Distanz angenommen wurde.

Wird für den gewählten repräsentativen Parkraum angenommen, dass sich die Nutzung gleichmäßig über alle Betriebsstunden eines Tages verteilt, ergibt sich ein Verkehrsaufkommen von rund 3 Fahrzeugen pro Minute sowohl im Einfahrts- als auch im Ausfahrtsbereich (3.000 Parkvorgänge pro Tag bei 15 Betriebsstunden pro Tag). Unter diesen Annahmen ist eine Staubildung beim Schranken-System unwahrscheinlich, da nach den angesetzten Modellparametern der Haltevorgang vor der Schranke inklusive Parkticketausgabe bzw. -eingabe, Öffnungs- und Schließzeiten der Schranke sowie Reaktionszeit des Fahrers bei lediglich 6,5 Sekunden liegt. Zusammen mit Abbremsen und Beschleunigen ergibt sich eine Gesamtintervalldauer von 12,72 Sekunden. Nach diesen Parametern würde es bei einem gleichmäßigen Zu- bzw. Abfluss (deterministischer Fall) erst ab einem Verkehrsaufkommen von rund 4,72 Fahrzeugen pro Minute zu einer Staubildung kommen. Da sich das Verkehrsaufkommen über die Betriebsstunden eines Tages in der Realität jedoch nicht gleichmäßig verteilt, sondern dynamischen Schwankungen mit Peaks nach oben und unten unterliegt, können über den Tagesverlauf verschiedene Situationen auch mit Staubildung auftreten.

Eine empirische Messung oder Simulation der dynamischen Staubildung auf und vor Parkräumen sowie der Wechselwirkung zwischen verschiedenen Einflussfaktoren für Stau konnte im Rahmen der Studie nicht umgesetzt werden. Aufgrund der resultierenden Unsicherheiten sowie des erhöhten Ergebniseinflusses (siehe Kapitel 5) wurden in Bezug auf das Verkehrsaufkommen und den zugehörigen Effekt auf den Verkehrsfluss bei beiden Systemen unterschiedliche Szenarien im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse untersucht. Gemäß der gewählten funktionalen Einheit ist dabei je Szenario und System die durchschnittliche Situation für ein einzelnes Fahrzeug in einer bestimmten Situation sowohl bei der Einfahrt als auch bei der Ausfahrt anzusetzen. Je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang wird entsprechend der durchschnittliche Kraftstoffverbrauch/Energiebedarf für den durch das Bewirtschaftungskonzept beeinflussten Teil der Ein- und Ausfahrt eines einzelnen PKW in beiden Systemen bestimmt.

Im Sinne eines konservativen Ansatzes, welcher einen möglichen Vorteil des Free-Flow-Systems in jedem Fall unterschätzt, wird als **»Basis«-Szenario** eine Situation mit niedrigem Verkehrsaufkommen ohne Stau angesetzt. Dabei wird angenommen, dass die deterministische Ankunfts-/Ausfahrtsrate kleiner als die Abfertigungsrate der Schrankenanlage ist. Hier kommt es folglich zu keiner Staubildung und es möchte stets nur ein Nutzer/Fahrzeug den Parkraum gleichzeitig befahren sowie verlassen. Im Falle des Schranken-Systems wurde somit je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang lediglich das einmalige Halten und Anfahren eines PKW vor der Schranke bei Ein- und Ausfahrt berücksichtigt. Wie in Kapitel 4 im Detail beschrieben wird, beläuft sich die dabei zurückgelegte Strecke jeweils auf 7 m. Für das Free-Flow-System wurde entsprechend eine Fahrt mit der konstanten Geschwindigkeit von 10 km/h über die gleiche Distanz im **»Basis«-Szenario** angenommen (7 Meter bei Einfahrt und 7 Meter bei Ausfahrt).

Weiterhin wird im **»Dichter-Verkehr«-Szenario** angenommen, dass im Durchschnitt vier Nutzer den Parkraum gleichzeitig befahren sowie verlassen möchten. Dabei ist die deterministische Ankunfts-/Ausfahrtsrate genau gleich der Abfertigungsrate der Schrankenanlage, sodass die Staulänge konstant bleibt. Beim

Schranken-System steht jedes Fahrzeug somit im Schnitt hinter drei vorausfahrenden PKW und muss anschließend die Schranke passieren. Dabei wird entsprechend bei der Einfahrt als auch bei der Ausfahrt eine Strecke von 28 Metern im Stop-and-Go-Verkehr zurückgelegt. Im Falle des Free-Flow-Systems wird analog eine Konstantfahrt mit 15 km/h über die gleiche Distanz angesetzt.

Im **»Großveranstaltung«-Szenario** wurde hingegen eine Extremsituation mit sehr hohem Verkehrsaufkommen, wie bspw. bei einer großen Konzertveranstaltung, abgebildet. Im Falle des Schranken-Systems wurde dabei sowohl für die Einfahrt als auch für die Ausfahrt eine durchschnittliche Wartezeit im Stau von 30 Minuten je PKW angesetzt (entspricht 994 m Stop-and-Go-Verkehr bzw. 142 im Stau stehenden Fahrzeugen). Für das Free-Flow-System wurde erneut eine Fahrt mit der konstanten Geschwindigkeit von 15 km/h über die entsprechende Distanz angesetzt.

Wie in Kapitel 5 dargestellt, leistet neben der PKW-Fahrt auch die Durchführung der Finanztransaktion einen vergleichsweise hohen Beitrag zur Klimawirkung je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang. Insbesondere die Zahlung mit Bargeld fällt hier stark ins Gewicht. Da beim Free-Flow-System neben der Bezahlung am Kassenautomaten auch eine nachträgliche (digitale) Zahlung im Internet möglich ist, ist der Anteil zwischen Barzahlung und digitaler Zahlung bei den beiden untersuchten Systemen aktuell nicht gleich. Zukünftig ist jedoch davon auszugehen, dass der Anteil an digitalen Finanztransaktionen stetig zunimmt (Bosch und Bruck 2025; Deutsche Bundesbank 2023, 2024; European Central Bank 2024; HONK MOBILE INC. 2025). Entsprechend wurde im **»Digitale-Zahlung«-Szenario** die Klimawirkung für beide Systeme unter der Annahme von ausschließlich digitalen Finanztransaktionen bestimmt. Auf diese Weise können Unterschiede bei der Klimawirkung auch ohne den Effekt aus den unterschiedlichen Anteilen bei der Art der Finanztransaktion quantifiziert und ausgewiesen werden.

4 Sachbilanz - Daten und Modellierung

Zur Modellierung der Material- und Energiebedarfe beider Produktsysteme (Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang beim Free-Flow-System und beim Schranken-System) wurde, je nach Verfügbarkeit, vorrangig auf die Primärdaten der fair parken GmbH zurückgegriffen. Darüber hinaus flossen Herstellerinformationen, Expertenschätzungen, wissenschaftliche Literatur sowie technische Datenblätter in die Analyse ein. Zur Quantifizierung der mit den Material- und Energiebedarfen verbundenen Treibhausgasemissionen wurde die Ökobilanzdatenbank »ecoinvent 3.10, allocation, cut-off by classification« verwendet (ecoinvent Association o. J.). Die Auswahl der Ökobilanzdatensätze erfolgte dabei unter Berücksichtigung ihrer zeitlichen, technologischen und geografischen Repräsentativität. Zur Durchführung der Bilanzierung wurde die LCA-Software »openLCA« eingesetzt (GreenDelta GmbH 2024). In den folgenden Abschnitten werden die für den Vergleich der Klimawirkung berücksichtigten Elemente im Hinblick auf den Modellierungsansatz als auch die entsprechende Datengrundlage beschrieben.

System zur Kennzeichenerfassung

Das System zur Kennzeichenerfassung dient beim Free-Flow-System dazu, den Zeitpunkt der Einfahrt eines PKW auf den Parkraum sowie den Zeitpunkt der Ausfahrt automatisiert und sicher zu dokumentieren. Aus den Informationen kann zum einen die Parkdauer sowie die Parkgebühr ermittelt werden. Weiterhin kann im Falle einer Vertragsstrafe (ausbleibende oder fehlerhafte Zahlung der Parkgebühr) eine Halterermittlung eingeleitet werden.

Das System besteht aus einer Kamera, welche mit einem Schaltschrank verbunden ist. Der Schaltschrank wiederum enthält verschiedene elektronische Komponenten sowie unter anderem einen Mobilfunkrouter, welcher die erstellten Bilddateien inklusive Zeitstempel an einen zentralen Server übermittelt. Im Falle eines Freiflächenparkraums wird die Kamera sowie der Schaltschrank an einem Stahlmast angebracht, während bei einem Parkhaus das bereits bestehende Mauerwerk hierfür genutzt werden kann. Das System ist sowohl für den Bereich der Einfahrt als auch für den Bereich der Ausfahrt identisch aufgebaut. Zudem wird stets ein redundanter Aufbau vorgesehen, um die Funktionsfähigkeit auch im Falle eines Teilausfalls sicherzustellen. Da der Ein- und Ausfahrtsbereich im Normalfall nah beieinander liegen, kann zudem ein Schaltschrank für zwei Kameras genutzt werden. Für den im Rahmen der Klimabilanzstudie gewählten, repräsentativen Parkraum mit einer Einfahrt und einer Ausfahrt werden somit 4 Kameras und zwei Schaltschränke installiert. Die durchschnittliche Lebensdauer der eingesetzten Kameras beträgt dabei laut Herstellerangaben 12,5 Jahre. Als Herstellungsland wurde Schweden angesetzt (Axis Communications AB 2025). Für den Schaltschrank gibt die fair parken GmbH eine durchschnittliche Lebensdauer von 10 Jahren an. Nach der Ecoinvent-Datenbank beträgt die durchschnittliche Lebensdauer eines Routers 6 Jahre. Im Sinne eines konservativen Ansatzes wird im Rahmen der Klimabilanzstudie eine Lebensdauer von 6 Jahren für den gesamten Schaltschrank inklusive aller elektronischen Komponenten angesetzt. Dabei

wurde auf Basis von Primärdaten der fair parken GmbH von einer Herstellung in Deutschland ausgegangen.

Nach den gewählten Systemgrenzen wurden in der Studie sowohl die Herstellung, die Distribution, die Installation von Ort sowie die Verwertung am Ende des Lebenszyklus für alle Komponenten des Systems zur Kennzeichenerfassung anteilig berücksichtigt. Der entsprechende Zuweisungsfaktor je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang wurde anhand der angegebenen Lebensdauer des Systems sowie der Anzahl an Parkvorgängen über diesen Zeitraum ermittelt (siehe Tabelle 3). Zudem wurde der Energiebedarf für die Nutzung des Systems berücksichtigt und auf einen einzelnen Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang umgelegt.

Die Modellierung für das System zur Kennzeichenerfassung basiert zunächst auf Primärdaten der fair parken GmbH. Das Modell für die Herstellung, Distribution, Installation und Verwertung der Kamera wurde auf Basis von Hillerström und Troborg (2010) erstellt. Zusätzlich wurde für den Transport der Kameras zum Einsatzort eine Distanz von 1.400 km (Stockholm – Düsseldorf) mittels LKW berücksichtigt. Für die Installation vor Ort wurde je Kamera konservativ ein Energieeinsatz von 2 kWh angesetzt. Der Energiebedarf je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang während der Nutzungsphase wurde wiederum auf Basis von Primärdaten der fair parken GmbH nach einem Bottom-Up-Ansatz bestimmt. Je Kamera beträgt die Leistungsaufnahme während der Kennzeichenerfassung 10 W. Die Leistungsaufnahme im Stand-By-Betrieb liegt bei 7,2 W. Für die Kennzeichenerfassung können dabei 0,2 Sekunden angesetzt werden. Tabelle 7 im Anhang zeigt detailliert die für die Modellierung der Kameras verwendeten Daten inklusive der verwendeten Hintergrunddatensätze aus der Ecoinvent-Datenbank.

Für die Modellierung des Schaltschranks wiederum wurden verschiedene technische Datenblätter der einzelnen Komponenten herangezogen. Auch hier wird für die Installation vor Ort konservativ ein Energiebedarf von 2 kWh abgeschätzt und die Modellierung des Energiebedarfs während der Nutzung basiert auf Primärdaten der fair parken GmbH. So wurde für den Router eine Leistungsaufnahme von 5,3 W im aktiven Betrieb und 3,8 W im Stand-By-Betrieb angesetzt. Für die übrigen Komponenten des Schaltschranks wird mit einer durchschnittlichen Leistungsaufnahme von 13 W gerechnet. Die gesamte Modellierung des Schaltschranks und des Stahlmasts ist in Tabelle 8 und Tabelle 9 im Anhang detailliert dokumentiert.

Schrankenanlage

Die Schrankenanlage leistet beim Schranken-System ebenfalls einen zentralen Beitrag zur automatisierten Bestimmung der Parkgebühr sowie Kontrolle der korrekten Bezahlung dieser. Die Einfahrt auf den Parkraum wird hier durch ein Öffnen der Schranke erst freigegeben, nachdem ein Parkticket vom Nutzer gezogen wurde. Dabei wird der Zeitstempel zusammen mit der Ticket-ID auf einem Server gespeichert. Die Ausfahrt wird hingegen erst freigegeben, wenn die Parkgebühr bezahlt wurde und diese Information entsprechend auf dem Server hinterlegt

wurde. Durch die Beschränkung sind Vertragsstrafen bei diesem System in Regelfall nicht relevant.

Die Schrankenanlage ist ebenfalls für Ein- und Ausfahrtsbereich identisch aufgebaut und besteht aus der Schrankeneinheit, welche die elektronische Steuerung, den Motor sowie den Schrankenbaum umfasst, und einem separaten Schrankenterminal mit Ticketgeber bzw. Ticketnehmer. Für den im Rahmen der Klimabilanzstudie gewählten, repräsentativen Parkraum mit einer Einfahrt und einer Ausfahrt werden somit insgesamt 2 Schrankeneinheiten und 2 Schrankenterminals installiert. Nach Ernst B. Gausmann GmbH (o. J.) und Preiser MRT oHG (o. J.) werden Schrankeneinheiten typischerweise für rund 10 Millionen Zyklen (Öffnen + Schließen) ausgelegt. Unter Berücksichtigung der im Rahmen der Klimabilanzstudie angesetzten Auslastung des repräsentativen Parkraums (6 Parkvorgänge pro Stellplatz und Tag) sowie der Anzahl an Betriebstagen pro Jahr entspricht das einer Lebensdauer von 11 Jahren. Für Schrankenterminals konnten keine separaten Angaben zur Lebensdauer identifiziert werden. Es wurde entsprechend angenommen, dass Schrankeneinheit und Schrankenterminal nach Ablauf der Lebensdauer stets gemeinsam ausgetauscht werden. Die Lebensdauer von 11 Jahren wurde folglich für das Schrankenterminal übernommen. Nach Experteneinschätzung der fair parken GmbH gilt es dabei zu beachten, dass das Wechselintervall des Schrankenbaums deutlich kürzer ausfällt. Dieser wird bspw. aufgrund von Kollisionen mit Fahrzeugen mehrfach über die Lebensdauer der Schrankeneinheit ausgetauscht. Auf Basis der Expertenschätzung der fair parken GmbH wurde für den Schrankenbaum im Rahmen der Klimabilanzstudie eine Lebensdauer von 1,5 Jahren angesetzt. Für die gesamte Schrankenanlage wurde eine Herstellung in Deutschland angenommen.

Entsprechend der gewählten Systemgrenzen wurden für alle Komponenten anteilig die Herstellung, Distribution, Installation vor Ort und Verwertung am Ende des Lebenszyklus berücksichtigt. Der Zuweisungsfaktor je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang wurde auch hier anhand der angegebenen Lebensdauer des jeweiligen Systems sowie der Anzahl an Parkvorgängen über diesen Zeitraum (siehe Tabelle 3) ermittelt. Der Energiebedarf je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang während der Nutzungsphase war ebenfalls Teil der Bilanz.

Die Modellierung der Schrankenanlage basiert auf verschiedenen technischen Datenblättern und Herstellerangaben. Für die Installation der Schrankeneinheit sowie für die Installation des Schrankenterminals wurde konservativ ein Energieaufwand in Höhe von 2 kWh angesetzt. Zusätzlich wurde für die produzierte Schrankenanlage ein LKW-Transport über 500 km innerhalb von Deutschland angesetzt. Für den Energiebedarf der Schrankeneinheit während der Nutzungsphase wurde auf Basis von Ernst B. Gausmann GmbH (2021), Automatic Systems IER Group (2018), Bebarmatic Parksysteme GmbH (2024), ACOTEC GmbH (2020) und Attas GmbH (2023) eine durchschnittliche Leistungsaufnahme von 261 W berücksichtigt bei einer durchschnittlichen Öffnungs- und Schließzeit der Schranke von 2,5 Sekunden. Stand-By-Energiebedarf fällt für die Schrankeneinheit nicht an. Für das Schrankenterminal wurde nach Bebarmatic Parksysteme GmbH (2020) und Beetronics B.V. (2025b) während der Nutzung eine Leistungs-

aufnahme von 50 W über 2 Sekunden angenommen, während im Stand-By-Betrieb 0,4 W anfallen. Tabelle 10, Tabelle 11 und Tabelle 12 im Anhang zeigen alle für die Modellierung von Schrankeneinheit, Schrankenbaum und Schrankenterminal relevanten Daten.

Serversystem

Das Serversystem dient bei beiden Parkraumbewirtschaftungskonzepten zur Datenspeicherung und Datenverarbeitung. Hier werden Informationen zu Ein- und Ausfahrtszeitpunkt verarbeitet und bspw. der Zahlungsfortschritt dokumentiert. Für die Klimabilanzstudie wurde für die zu vergleichenden Systeme das gleiche Serversystem angesetzt, lediglich die übertragenen und verarbeiteten Datenmengen und damit verbunden der operative Energiebedarf des Serversystems je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang unterscheidet sich zwischen Free-Flow-System und Schranken-System.

Gemäß der gewählten Systemgrenzen wurden auch für das Serversystem, neben dem operativen Energiebedarf (Nutzungsphase), anteilig die Herstellung, Distribution, Installation sowie Verwertung am Ende des Lebenszyklus berücksichtigt. Die Modellierung erfolgte dabei auf Basis von Girard und Neunhoff (2024). In dieser Studie wird für das Serversystem zudem eine gewichtete Lebensdauer von 11,5 Jahren angegeben (2-5 Jahre für IT, 20 Jahre für Kühlsystem, 50 Jahre für Gebäude). Zudem wird für ein typisches Rechenzentrum in Deutschland ein jährlicher Energiebedarf von 6 Millionen kWh angegeben. Auf Basis des operativen Energiebedarfs des Serversystems je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang wurde zusammen mit dem Energiebedarf über die Lebensdauer der Zuweisungsfaktor für Herstellung, Distribution, Installation und Verwertung für beide Parkraumbewirtschaftungskonzepte separat berechnet. Da hierbei, neben dem operativen Energiebedarf für die Datenverarbeitung auf dem Server, auch ein Energiebedarf für die Datenübertragung berücksichtigt wurde, wird über den Zuweisungsfaktor ebenfalls der Klimawirkung aus Herstellung und Verwertung der Datenübertragungsinfrastruktur näherungsweise Rechnung getragen. Als Region für die Herstellung der Komponenten wurde für die Klimabilanzstudie Europa angenommen und der Standort für den Betrieb ist Deutschland.

Der operative Energiebedarf des Serversystems wurde wiederum über einen Bottom-Up-Ansatz auf Basis einer Abschätzung zu den je System übertragenen und verarbeiteten Datenmengen bestimmt. Berücksichtigt wurden dabei anteilig die Datenmengen, welche zwischen Server und System zur Kennzeichenerfassung bzw. Schrankenanlage sowie den Kassenautomaten übertragen und entsprechend verarbeitet werden. Während für die Größe der über den Router übertragenen Bilddateien der Kameras beim Free-Flow-Systems Primärdaten der fair parken GmbH vorliegen, wurden die übrigen Datenmengen bei beiden Systemen konservativ abgeschätzt. Bei Free-Flow-System wurden weiterhin die zwischen dem Kraftfahrtbundesamt und der fair parken GmbH übertragenen und verarbeiteten Datenmengen zur Halterermittlung im Falle einer Vertragsstrafe berücksichtigt. Auch hierfür liegen Primärdaten vor. Zur Umrechnung der übertragenen und verarbeiteten Datenmengen in einen entsprechenden Energiebedarf, wurde auf die Daten von Wholegrain Digital Scamper Ltd (2024a) zurückgegriffen. Da

beim Free-Flow-System neben einer Zahlung der Parkgebühr vor Ort am Kassenautomat auch eine nachträgliche Zahlung der Parkgebühr im Internet möglich ist, musste auch der für diesen Anteil anfallende Energiebedarf berücksichtigt werden. Alle für die Modellierung des Serversystems relevanten Daten und Annahmen sind in Tabelle 15 und Tabelle 16 im Anhang dokumentiert.

Kassenautomaten

Die Kassenautomaten sind in beiden Systemen ebenfalls Teil des Bewirtschaftungskonzepts. Beim Free-Flow-System wird der Bezahlvorgang durch die Eingabe des Kennzeichens mittels Bedienfeld gestartet. Beim Schranken-System wird der Bezahlvorgang wiederum durch das Einführen des Parktickets eingeleitet. In beiden Fällen ist sowohl die Zahlung mit Bargeld als auch digital per Karte möglich.

Für den Vergleich der beiden Parkraumbewirtschaftungskonzepte wurde von nahezu baugleichen Kassenautomaten ausgegangen. Lediglich für das Schranken-System wird zusätzlich die Ticketnehmer/-geber-Einheit berücksichtigt, welche im Falle des Free-Flow-Systems wegfällt. Durch die zusätzliche Option der nachträglichen Onlinezahlung beim Free-Flow-System kann hier die Anzahl an zu installierenden Kassenautomaten reduziert werden. Für den im Rahmen der Klimabilanzstudie gewählten, repräsentativen Parkraum mit 500 Stellplätzen werden nach Experteneinschätzung der fair parken GmbH 4 Kassenautomaten beim Schranken-System installiert. Beim Free-Flow-System reichen hingegen 3 Automaten für diese Stellplatzkapazität aus. Konkrete Angaben zur typischen Lebensdauer der Kassenautomaten konnten in technischen Datenblättern der Hersteller nicht identifiziert werden. Die Veröffentlichungen von Haimerl (2016), Bezirksamt Mitte von Berlin (2024), Glumm (2023), Veranstaltergemeinschaft Lokalfunk Essen e.V. (2022) und Verlag Der Tagesspiegel GmbH (2017) weisen auf eine Lebensdauer von 15 bis 30 Jahren hin. Im Sinne eines konservativen Ansatzes wurde in der Klimabilanzstudie mit einer Lebensdauer von 15 Jahren gerechnet. Auf Basis von Primärdaten wird als Herstellungsland auch hier Deutschland angesetzt.

Die Modellierung der Herstellung des Kassenautomaten sowie dessen Verwertung am Ende des Lebenszyklus basiert auf Daten aus verschiedenen technischen Datenblättern und Herstellerangaben. Das Kartenlesegerät, welches zur Kartenzahlung genutzt werden kann, wurde auf Basis von Girard und Neunhoff (2024) separat modelliert. Für die Installation vor Ort wurde je Kassenautomat erneut ein Energieeinsatz von 2 kWh angesetzt. Zudem wurde ein LKW-Transport von 500 km innerhalb von Deutschland berücksichtigt. Der entsprechende Zuweisungsfaktor je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang wurde unter Einbezug der Lebensdauer sowie der Anzahl an Parkvorgängen über diesen Zeitraum berechnet. Zur Bestimmung des Energiebedarfs der Kassenautomaten konnte auf Primärdaten der fair parken GmbH zurückgegriffen werden. So liegt der jährliche Energiebedarf der eingesetzten Kassenautomaten bei jeweils 64 kWh. Auch hier kann anhand der Anzahl an installierten Automaten sowie der Anzahl an Parkvorgängen pro Jahr der Energieeinsatz je Bewirtschaftungs- und Abrech-

nungsvorgang über einen Top-Down-Ansatz bestimmt werden. Da beim Schrankensystem der Automat zusätzlich über die Ticketnehmer/-geber-Einheit verfügt, wurde hier ein zusätzlicher Energiebedarf nach Bebarmatic Parksysteme GmbH (2020) und Beetrionics B.V. (2025b) berücksichtigt. Die Tabelle 13 und Tabelle 14 im Anhang dokumentieren die für die Kassenautomaten herangezogenen Daten, die getroffenen Annahmen sowie die verwendeten Hintergrunddatensätze.

Finanztransaktion, Onlinezahlung und Abwicklung einer Vertragsstrafe

Durch die Finanztransaktion wird die geldwerte Forderung des Parkraumbetreibers gegenüber dem Parkraumnutzer beglichen. Die Finanztransaktion in Bezug auf das Zahlen der Parkgebühr kann am Kassenautomaten entweder als Barzahlung oder als digitale Zahlung mit Karte durchgeführt werden. Beim Free-Flow-System besteht darüber hinaus die Möglichkeit der nachträglichen Onlinezahlung, außerdem kann hier im Falle einer Vertragsstrafe ebenfalls eine nachträgliche Zahlung stattfinden. In Bezug auf die zugehörige Finanztransaktion wurde dabei im Rahmen der Klimabilanzstudie stets von einer digitalen Zahlung (bspw. mit digitaler Karte) ausgegangen. Die fair parken GmbH gibt den Anteil der Barzahlung an den eigenen Automaten mit 48,95 % an, während die digitale Zahlung am Kassenautomaten einen Anteil von 41,95 % hat. Die nachträgliche Onlinezahlung macht hingegen aktuell einen Anteil von 9,10 % aus. In rund 1 % der Fälle bleibt beim Free-Flow-System die ordnungsgemäße Zahlung der Parkgebühr aus (Vertragsstrafe). Der effektive Anteil der digitalen Finanztransaktionen liegt für das Free-Flow-System folglich bei 51,54 % und die Transaktion mit Bargeld kommt effektiv auf 48,46 %. Für das Schranken-System wurden die Anteile zwischen Barzahlung und digitaler Zahlung unter Berücksichtigung von ausschließlich der Verteilung am Kassenautomaten übernommen. Hier machen digitale Transaktionen entsprechend einen Anteil von 46,15 % aus und die Transaktionen mit Bargeld liegen bei einem Anteil von 53,85 %.

Die Modellierung der potenziellen Klimawirkung einer Finanztransaktion mit Bargeld sowie einer digitalen Finanztransaktion erfolgte nach Girard und Neunhoff (2024). Dabei gilt es zu beachten, dass aufgrund des abweichenden Untersuchungsrahmens in der benannten Studie, in Bezug auf die Treibhausgasemissionen nicht die nach der ISO 14067 geforderte detaillierte Kategorisierung abgeleitet bzw. zur Verfügung gestellt werden konnte. Konservativ wurden an dieser Stelle ausschließlich Treibhausgasemissionen aus fossilen Rohstoffen angenommen. Weiterhin musste zur Vermeidung von Doppelzählungen eine Korrektur der übernommenen Werte für die Klimabilanzstudie vorgenommen werden. Konkret wurde die Herstellung, Distribution und Verwertung des Kartenlesegeräts (digitale Transaktion) sowie dessen Strombedarf während der Nutzung bei der Modellierung des Kassenautomaten bereits berücksichtigt und anteilig auf einen Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang umgelegt. Auch der Druck einer Zahlungsquittung war in der Bilanzierung bereits enthalten. Die aus der Studie von Girard und Neunhoff (2024) übernommenen Werte wurden entsprechend um diese Teilaspekte korrigiert. Die für eine digitale Finanztransaktion angesetzte potenzielle Klimawirkung beträgt folglich 1,96 g CO₂-Äquivalente, während die potenzielle Klimawirkung einer Transaktion mit Bargeld bei 17,70 g CO₂-Äquivalenten liegt.

Im Falle einer nachträglichen Onlinezahlung beim Free-Flow-System über die Website der fair parken GmbH wird statt dem Kassenautomaten zusätzlich ein Endgerät genutzt. Im Rahmen der Klimabilanzstudie wurde hierbei die Nutzung eines Smartphones angenommen. Für die Modellierung der Herstellung, Distribution und Verwertung von diesem wurde auf Hintergrunddatensätze aus der Ecoinvent-Datenbank zurückgegriffen. Der Zuweisungsfaktor je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang ergibt sich hierbei aus der Lebensdauer, der benötigten Zeit für die Onlinezahlung sowie dem prozentualen Anteil der nachträglichen Zahlung im Internet. Dabei wurde nach Paiano et al. (2013) und Prabhu N und Majhi (2023) eine Lebensdauer des Smartphones von 2 Jahren angesetzt. Zur Bestimmung des Energiebedarfs während der Nutzung wurde auf die Daten von Wholegrain Digital Scamper Ltd (2024a) sowie Wholegrain Digital Scamper Ltd (2024b) zurückgegriffen. Tabelle 18 im Anhang dokumentiert alle im Zusammenhang mit der Onlinezahlung angesetzten Daten sowie getroffenen Annahmen im Detail.

Im Falle einer nicht fristgerechten und ordnungsgemäßen Zahlung der Parkgebühr liegt ein Vertragsverstoß vor und eine Vertragsstrafe wird eingeleitet. Dazu wird auf Basis des erfassten Kennzeichens eine Halterermittlung beim Kraftfahrtbundesamt angefragt. Die dabei übertragenen und verarbeiteten Datenmengen wurden bereits im Zusammenhang mit dem Serversystem adressiert. Weiterhin fällt Aufwand auf Seite des Kraftfahrtbundesamts an. Um die daraus resultierende potenzielle Klimawirkung abzuschätzen wurde der Ecoinvent-Datensatz »*operation, computer, desktop, with liquid crystal display, active mode (Europe without Switzerland)*« verwendet. Der im Anschluss versendete Brief zur Vertragsstrafe wurde im Rahmen der Bilanz ebenfalls adressiert. Dabei wurde eine Zustellentfernung von 300 km innerhalb von Deutschland angenommen. Tabelle 19 im Anhang zeigt die Datengrundlage und den Modellierungsansatz für die Abwicklung der Vertragsstrafe.

Signalanlage zur Zugangsbeschränkung

Die Signalanlagen zur Zugangsbeschränkung werden bei beiden Parkraumbewirtschaftungskonzepten dafür eingesetzt, im Falle einer vollständigen Belegung des Parkraums Fahrzeuge am Befahren des Parkraums zu hindern. Bei Schranken-System werden diese ergänzend zur Schrankenanlage verwendet, um längere Wartezeiten vor der Schranke zu verhindern. Beim Free-Flow-System kann durch die Signalanlagen der Parksuchverkehr reduziert werden.

Im Rahmen der Klimabilanzstudie wurden für beide zu vergleichende Systeme jeweils eine einzelne identische Signalanlage im Einfahrtsbereich berücksichtigt. Nach Lamp Shining Manufacturing CO., LTD. (2024) wird eine klassische Signalanlage für rund 114.000 Betriebsstunden ausgelegt. Das entspricht für den gewählten repräsentativen Parkraum einer Lebensdauer von 24 Jahren. Als Herstellungsland wurde in Anlehnung an Lamp Shining Manufacturing CO., LTD. (2024) China angesetzt.

Nach den gewählten Systemgrenzen umfasste die Modellierung im Rahmen der Klimabilanzstudie anteilig sowohl die Herstellung, Distribution und Verwertung

der Signalanlage als auch den Energiebedarf während der Nutzung. Die gesamte Modellierung basiert auf Lamp Shining Manufacturing CO., LTD. (2024). Der Zuweisungsfaktor für Herstellung, Distribution und Verwertung je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang wurde auf Basis der angegebenen Lebensdauer sowie den Betriebsstunden des repräsentativen Parkraums bestimmt. Die Distribution erfasst 300 km LKW-Transport in China (Vorlauf), 22.000 km Transport mit dem Containerschiff (Shanghai – Hamburg) und weitere 400 km LKW-Transport innerhalb von Deutschland. In Bezug auf den Energiebedarf während der Nutzung wird in Lamp Shining Manufacturing CO., LTD. (2024) eine elektrische Leistungsaufnahme von 60 W angegeben. Zur Berechnung des resultierenden Energiebedarfs je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang wurden schließlich erneut die jährlichen Betriebsstunden des repräsentativen Parkraums sowie die Anzahl an Parkvorgängen über diese Zeit verwendet. Tabelle 17 im Anhang fasst die Sachbilanzdaten zur Modellierung der Signalanlage zusammen.

Parktickets

Der Einsatz von Parktickets ist im konkreten Anwendungsfall lediglich für das Schrankensystem relevant. Dabei wird bei der Einfahrt auf den Parkraum ein Parkticket gezogen und später zur Zahlung am Kassensystem sowie zum Öffnen der Schranke bei der Ausfahrt verwendet. Für jede Parkraumnutzung wurde entsprechend die Herstellung, Distribution und Verwertung eines Parktickets berücksichtigt. Als Herstellungsland wurde dabei Deutschland angenommen. Ein Parkticket besteht im Wesentlichen aus Thermopapier, welches im Schrankenterminal mittels Thermodruck bedruckt wird. Der dabei anfallende Energiebedarf wurde im Rahmen des Schrankenterminals bereits abgebildet. Die Modellierung des Herstellprozesses sowie der Verwertung der Tickets am Ende des Lebenszyklus erfolgte nach Eckardt et al. (2020) sowie eigenen Messungen. Dabei wurde angenommen, dass der elektrische Energiebedarf im Herstellungsprozess durch die verwendeten Ecoinvent-Datensätze zur Bereitstellung der Vorprodukte bereits ausreichend abgebildet wird. Weiterhin wurde ein LKW-Transport über 500 km innerhalb von Deutschland angesetzt. Tabelle 21 im Anhang fasst die Datenbasis und Annahmen im Zusammenhang mit der Modellierung der Parktickets zusammen.

Zahlungsquittung

Der Druck der Zahlungsquittung ist wiederum bei beiden Parkraumbewirtschaftungskonzepten relevant. Beim Bezahlen am Kassensystem kann diese nach Abschluss der Zahlung für den Parkraumnutzer ausgedruckt werden. Nach YouGov PLC (2019) nehmen 49 % der Kunden in deutschen Geschäften die Quittung nach dem Einkauf mit nach Hause. Da speziell für Parkräume keine spezifischen Zahlen ermittelt werden konnten, wurde dieser Wert in der vorliegenden Studie für den Ausdruck der Quittungen angesetzt. Beim Free-Flow-System wurde der Wert zusätzlich um den Anteil der Onlinezahlungen korrigiert. Gemäß der gewählten Systemgrenzen mussten sowohl Herstellung und Distribution als auch die Verwertung einer Zahlungsquittung am Ende des Lebenszyklus berücksichtigt

werden. Ähnlich wie die Parktickets, besteht die Quittung im Wesentlichen aus Thermopapier und wird mittels Thermodruck im Kassensystem bedruckt. Auch hier wurde der dabei anfallende Energiebedarf bereits im Rahmen der Modellierung zum Kassensystem abgebildet. Herstellung und Verwertung der Quittung wurden analog zu den Parktickets nach Eckardt et al. (2020) sowie eigenen Messungen modelliert. Deutschland wurde auch hier als Herstellungsland gewählt. Entsprechend wurde ein LKW-Transport über 500 km innerhalb von Deutschland berücksichtigt. Die relevanten Sachbilanzdaten werden in Tabelle 20 im Anhang dargestellt.

PKW-Fahrt im Ein- und Ausfahrtsbereich

Die Modellierung der PKW-Fahrt im Ein- und Ausfahrtsbereich des Parkraums diente im Rahmen der Klimabilanzstudie dazu, den Einfluss des Parkraumbewirtschaftungskonzepts auf den Verkehrsfluss bei Ein- und Ausfahrt und damit verbunden insbesondere auf die Treibhausgasemissionen durch den Kraftstoffverbrauch/Energiebedarf der PKW zu adressieren. Hierzu wurden unterschiedliche Szenarien ausgewertet und dabei stets nur der durch das Bewirtschaftungskonzept beeinflusste Teil der PKW-Fahrt berücksichtigt.

Als Basis für die Abschätzung der aus der PKW-Fahrt resultierenden Treibhausgasemissionen je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang dienten Hintergrund-Datensätze aus der Ecoinvent-Datenbank. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die verwendeten Datensätze. Diese berücksichtigen neben dem Kraftstoffverbrauch/Energiebedarf unter anderem bspw. auch anteilig die Fahrzeugherstellung und -wartung.

Tabelle 1: Verwendete Ecoinvent-Datensätze zur Modellierung der potenziellen Klimawirkung aus der PKW-Fahrt im Ein- und Ausfahrtsbereich eines Parkraums (ecoinvent Association o. J.).

Fahrzeugklasse	Datensatz
Benzin, klein	transport, passenger car, small size, petrol, EURO 5 (RER); market for petrol, low-sulfur (Europe without Switzerland);
Benzin, mittel	transport, passenger car, medium size, petrol, EURO 5 (RER); market for petrol, low-sulfur (Europe without Switzerland);
Benzin, groß	transport, passenger car, large size, petrol, EURO 5 (RER); market for petrol, low-sulfur (Europe without Switzerland)
Diesel, klein	transport, passenger car, small size, diesel, EURO 5 (RER) market for diesel, low-sulfur (Europe without Switzerland)
Diesel, mittel	transport, passenger car, medium size, diesel, EURO 5 (RER); market for diesel, low-sulfur (Europe without Switzerland)
Diesel, groß	transport, passenger car, large size, diesel, EURO 5 (RER); market for diesel, low-sulfur (Europe without Switzerland)
Elektro, klein	transport, passenger car, electric (GLO); market for electricity, low voltage (DE)
Elektro, mittel	transport, passenger car, electric (GLO); market for electricity, low voltage (DE)
Elektro, groß	transport, passenger car, electric (GLO); market for electricity, low voltage (DE)

Im Rahmen der Klimabilanzstudie wurde für alle Szenarien der aktuelle deutsche Fahrzeugflottenmix nach Kraftfahrtbundesamt (2024) und Statista GmbH (2024a) näherungsweise abgebildet. Dabei wurden drei unterschiedliche Antriebskonzepte sowie jeweils drei unterschiedliche Größenklassen unterschieden. Abbildung 4 zeigt den berücksichtigten Fahrzeugflottenmix für die aktuelle Situation in Deutschland. Unter der Kategorie »Elektro« werden neben rein elektrisch betriebenen PKW auch Hybrid-Fahrzeuge zusammengefasst, da diese insbesondere bei niedrigen Geschwindigkeiten oftmals ausschließlich den elektrischen Antrieb nutzen.

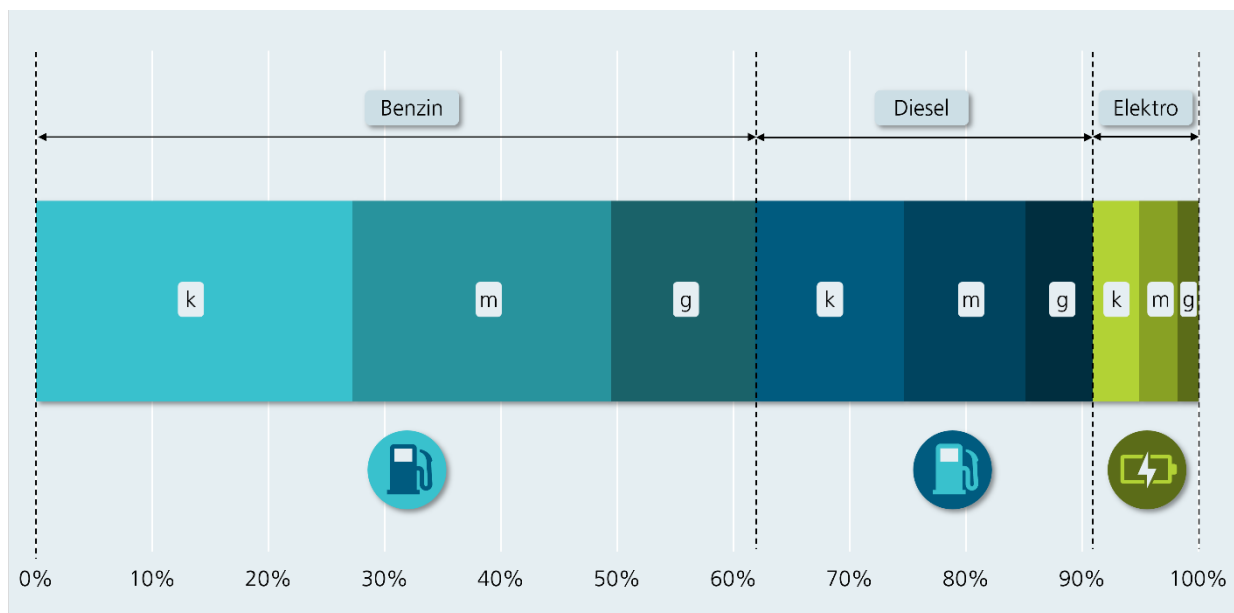


Abbildung 4: Berücksichtigter Fahrzeug-Flottenmix für die Situation in Deutschland 2024. (k: klein, m: mittel, g: groß)

In den verwendeten Ecoinvent-Datensätzen ist dabei je Fahrzeugklasse ein durchschnittlicher, statischer Kraftstoffverbrauch/Energiebedarf hinterlegt. Dieser ist in der Realität allerdings stark abhängig von den gefahrenen Fahrzyklen und kann bspw. bei Stausituationen im städtischen Umfeld um rund 175 % ansteigen (Michelin 2022). Da die Quantifizierung dieses Effekts ein wesentlicher Bestandteil der Klimabilanzstudie war, wurde der Kraftstoffverbrauch/Energiebedarf in den Datensätzen parametrisiert und entsprechend der Verkehrssituation je Szenario und Bewirtschaftungskonzept angepasst.

Aufgrund fehlender, konkreter Literaturwerte zum Kraftstoffverbrauch/Energiebedarf von PKW in Stausituationen (Stop-and-Go-Verkehr), wurde dieser für die definierten Szenarien vereinfacht auf Grundlage der mechanischen und chemischen Zusammenhänge berechnet. Entsprechende Zusammenhänge und Annahmen wurden dabei von Schöffl (2015), Lohse und Schnabel (2011) sowie Breuer und Rohrbach-Kerl (2015) übernommen. Treiber et al. (2008) haben einen ähnlichen Ansatz angewendet. In Anlehnung an Schöffl (2015) sowie Lohse und Schnabel (2011) wird zudem angenommen, dass ein PKW im Stau ein Intervall bestehend aus den vier Phasen Beschleunigung, Konstantfahrt, Abbremsen

und Halten wiederholt gleichermaßen durchfährt. Der Kraftstoffverbrauch/Energiebedarf wurde dabei für jede Phase separat bestimmt und für ein Intervall aufsummiert. Der Ansatz ist in Abbildung 5 schematisch dargestellt. Die Anzahl der durchfahrenen Intervalle ist dabei abhängig von der Länge des Staus. Es wurde angenommen, dass die vor einer Schranke im Stau stehenden PKW mit Durchfahren eines Intervalls stets gleichmäßig auf die Position des jeweils vorausfahrenden PKW vorrücken. Nach eigenen Messungen sowie den Angaben von Srisakda et al. (2022) wird dabei stets eine Distanz von 7 m zurückgelegt. Die Anzahl der durchfahrenen Intervalle je PKW entspricht somit der sich zwischen Schranke und betrachtetem PKW im Stau befindenden Fahrzeuge. Der Gesamtverbrauch/-bedarf je PKW ergibt sich anschließend aus der Anzahl durchfahrener Intervalle.

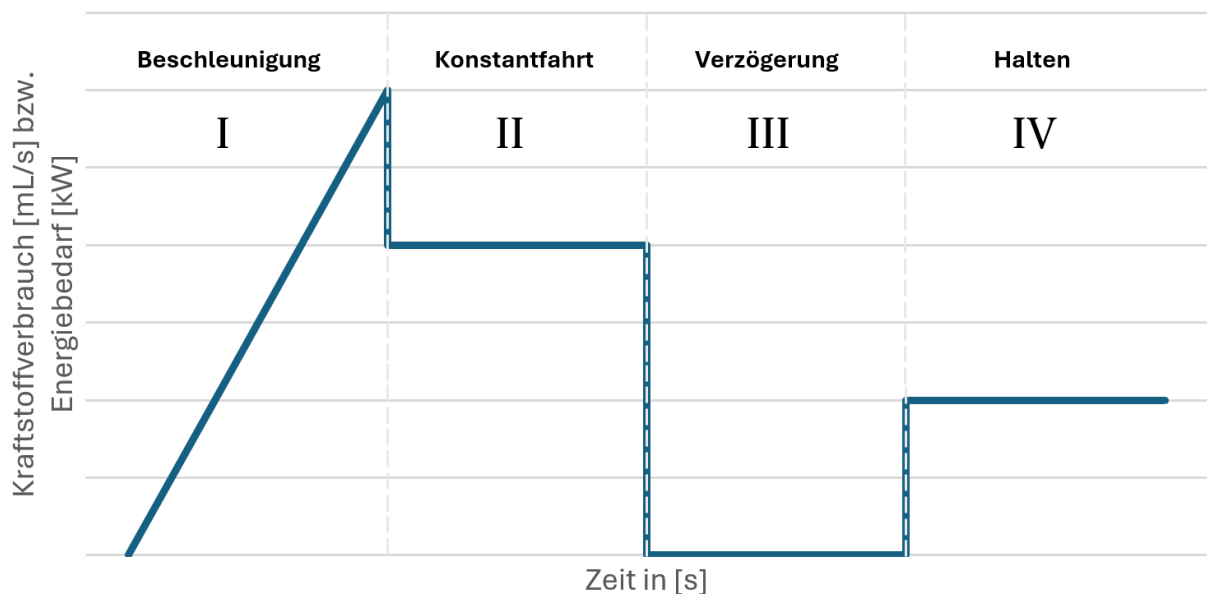


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Berechnung von Kraftstoffverbrauch/Energiebedarf über die vier Phasen je Intervall

Um einen fairen Vergleich sicherzustellen, wurde für die Modellierung des Kraftstoffverbrauchs/Energiebedarf der PKW beim Free-Flow-System eine Fahrt mit konstanter, reduzierter Geschwindigkeit über die gleiche Distanz (Staulänge) angenommen und berücksichtigt. Je nach Szenario und somit Staulänge wurden dabei unterschiedliche Durchschnittsgeschwindigkeiten angesetzt. Die verwendeten Modellparameter für die einzelnen Phasen der Stausituation beim Schranken-System sowie für die Konstantfahrt beim Free-Flow-System werden in Tabelle 4 und Tabelle 5 im Anhang dargestellt.

Grundlegend wurde der Kraftstoffverbrauch/Energiebedarf für jede Phase auf Basis der benötigten Energiemenge, dem Energiegehalt des Kraftstoffs (Heizwert) sowie dem Wirkungsgrad des Antriebsstrangs berechnet. Um die benötigte Energiemenge zu bestimmen, wurden die auf den PKW wirkenden Kräfte aus dem Luftwiderstand, Rollwiderstand, Hangabtrieb und der Trägheit angesetzt. Die Kräfte wurden nach Multiplikation mit der entsprechenden Geschwindigkeit,

ausgedrückt durch die (konstante) Beschleunigung und die Beschleunigungsdauer, über die Zeit integriert, um die benötigte Energiemenge je Phase zu bestimmen. Zudem wurde der Mindestleistungsbedarf zur Versorgung elektrischer Nicht-Antriebs-Verbraucher (bspw. Lichtanlage, Lüftung, Klimatisierung, Infotainmentsystem etc.) berücksichtigt (Schöffl 2015; Treiber et al. 2008). Dabei wurden sowohl für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor auf Basis von Lohse und Schnabel (2011) als auch für elektrisch betriebene PKW auf Basis von Helms et al. (2022) konservative Werte² für den Mindestleistungsbedarf angesetzt, um den Kraftstoffverbrauch/Energiebedarf insbesondere in der Stausituation nicht zu überschätzen. In Bezug auf den Wirkungsgrad wurden die Werte von TÜV Nord AG (o. J.) bzw. BMUV (2021) als »*Tank-to-Wheel*« Wirkungsgrade angesetzt. Diese werden dabei als konstant und somit unabhängig vom anliegenden Motordrehmoment und der Motordrehzahl angenommen. Der für Elektrofahrzeuge verwendete Wirkungsgrad umfasst sowohl den Wirkungsgrad des Antriebsstrangs als auch mögliche Ladeverluste.

² Ein konservativer Ansatz oder eine konservative Annahme ist im vorliegenden Bericht stets auf den möglichen Klimavorteil des Free-Flow-Systems bezogen. Mit »*konservativ*« ist in diesem Bericht somit gemeint, dass der mögliche Klimavorteil des Free-Flow-Systems tendenziell eher unterschätzt wird.

Die Berechnung des Kraftstoffverbrauchs in der Beschleunigungsphase erfolgte auf Basis von Breuer und Rohrbach-Kerl (2015), Schöffl (2015) sowie Lohse und Schnabel (2011) nach Formel (1):

$$B_a = \frac{1}{\eta \cdot w_0} * \left(P_0 * t_a + \frac{1}{2} * m * v_0^2 + (c_r * \cos(\alpha) + \sin(\alpha)) * m * g * s_a + \frac{1}{4} * c_w * \rho * A * v_0^2 * s_a \right) \quad (\text{Formel 1})$$

Dabei gilt:

B_i : Kraftstoffverbrauch in der Phase i in [mL]

η : Motorwirkungsgrad

w_0 : Energiedichte des Kraftstoffs in [$\frac{J}{mL}$]

P_0 : Mindestleistungsbedarf in [W]

t_i : Dauer der Phase i in [s]

m : Masse des Fahrzeugs in [kg]

v_0 : maximale Geschwindigkeit in [$\frac{m}{s}$]

c_r : Rollwiderstandbeiwert

g : Erdbeschleunigung in [$\frac{m}{s^2}$]

s_i : Zurückgelegte Strecke in der Phase i in [m]

c_w : Luftwiderstandbeiwert

ρ : Dichte der Luft bei Standardbedingungen in [$\frac{kg}{m^3}$]

A : Stirnfläche des Fahrzeugs in [m²]

Für die Berechnung des Kraftstoffverbrauchs bei der Konstantfahrt wurde Formel (2) genutzt, während für die Haltephase Formel (3) angesetzt wurde:

$$B_c = \frac{1}{\eta \cdot w_0} * \left(P_0 * t_c + (c_r * \cos(\alpha) + \sin(\alpha)) * m * g * s_c + \frac{1}{2} * c_w * \rho * A * v_0^2 * s_c \right) \quad (\text{Formel 2})$$

$$B_h = \frac{1}{\eta \cdot w_0} * (P_0 * t_h) \quad (\text{Formel 3})$$

In Deutschland und Europa ist der Großteil der Neuwagen mit Verbrennungsmotor inzwischen mit einer Start-Stopp-Automatik ausgerüstet (B.I.G - Batterie-Industrie-Germany GmbH o. J.; Banner GmbH o. J.; Girgo 2024). Hierbei wird der Motor im Stand automatisch abgeschaltet, um Kraftstoff einzusparen (ADAC 2024b). Verschiedene Studien konnten bereits zeigen, dass durch eine solche Technologie je nach betrachtetem Fahrzyklus zwischen 6 % und 15 % Kraftstoff gespart werden können (ADAC 2024b; Sodiqovich und Shukhratullaevich 2021; Santos et al. 2020; Fonseca et al. 2011). Empirische Daten zu Verbreitung der Technologie in der Bestandsflotte von Deutschland oder Europa existieren zum aktuellen Zeitpunkt nicht. Nach Schätzungen aus der Branche der Batteriehersteller ist die Technologie bei 70 % bis 95 % aller Neuwagen standardmäßig verbaut und über den gesamten Fahrzeugbestand hinweg verfügen zwischen

25 % und 50 % der Fahrzeuge über eine Start-Stopp-Automatik (B.I.G - Batterie-Industrie-Germany GmbH o. J.; Clarios Deutschland GmbH & Co. KG o. J.; Banner GmbH o. J.). Das Kraftfahrtbundesamt gibt das Durchschnittsalter deutscher PKW für 2024 mit 10,3 Jahren an (Kraftfahrtbundesamt 2024). Vor diesem Hintergrund erscheinen die oben genannten Werte realistisch. Auch über die tatsächliche Nutzung der Technologie in der Realität existieren keine empirischen Daten. Der ADAC berichtet, dass Autobesitzer das Start-Stopp-System aus Sorge vor erhöhtem Verschleiß vermehrt dauerhaft abschalten (ADAC 2023a). Um die Effekte der Start-Stopp-Automatik auf den Kraftstoffverbrauch in Stausituationen im Rahmen der Studie berücksichtigen zu können, wurde konservativ die Nutzung einer solchen Technologie bei einem Anteil von 50 % der Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor angesetzt. Für diesen Anteil wird der Kraftstoffverbrauch während der Haltephase auf 0 gesetzt.

In Bezug auf die Abbremsphase wurde angenommen, dass durch die Schubabschaltung der Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor kein Kraftstoff verbraucht wird. Elektrofahrzeuge können in der Abbremsphase Energie durch Rekuperation zurückgewinnen. Entsprechende Rekuperationswerte fallen jedoch unterschiedlich aus und hängen von verschiedenen Fahrzeugparametern ab (ADAC 2024a). Zur Vereinfachung wurde für die Elektrofahrzeuge angenommen, dass die rekuperierte Energie genau zur Deckung des Mindestleistungsbedarfs ausreicht und der Gesamtenergiebedarf in dieser Phase folglich auch auf 0 gesetzt.

Zur Berechnung des Energiebedarfs elektrisch betriebener PKW wurden die Formeln (1) bis (3) analog angesetzt. Dabei wurde die Energiedichte des Kraftstoffs entsprechend aus den Formeln eliminiert. Da bei Elektrofahrzeugen die Versorgung elektrischer Nicht-Antriebs-Verbraucher (Mindestleistungsbedarf) nicht über den Motor, sondern direkt über Akku abläuft, wurde für die entsprechenden Energiemengen zudem ein angepasster Wirkungsgrad verwendet, um lediglich mögliche Ladeverluste zu berücksichtigen. Dieser weicht vom angesetzten Gesamtwirkungsgrad der Elektrofahrzeuge ab und wurde in Anlehnung an Helms et al. (2022) auf 0,8 gesetzt.

Die für die einzelnen Fahrzeugklassen und Antriebskonzepte zur Berechnung verwendeten Modellparameter Werte sind in Tabelle 6 im Anhang zusammengefasst. Tabelle 2 zeigt die berechneten und in der Klimabilanzstudie angesetzten Werte zum Kraftstoffverbrauch/Energiebedarf je Szenario.

Tabelle 2: Zusammenfassung des berechneten Kraftstoffverbrauchs/Energiebedarfs der PKW je Fahrzeugklasse und Szenario.

		Benzin, klein	Benzin, mittel	Benzin, groß	Diesel, klein	Diesel, mittel	Diesel, groß	Elektro, klein	Elektro, mittel	Elektro, groß
		[l/ 100 km]	[l/ 100 km]	[l/ 100 km]	[l/ 100 km]	[l/ 100 km]	[l/ 100 km]	[kWh/ 100 km]	[kWh/ 100 km]	[kWh/ 100 km]
»Basis«- Szenario	Free- Flow-Sys- tem	9,61	9,79	10,01	8,91	9,13	9,28	14,72	15,75	17,27
	Schran- ken-Sys- tem	21,84	22,47	23,12	19,65	20,37	20,86	49,39	52,89	57,73
»Dichter- Ver- kehr«- Szenario	Free- Flow-Sys- tem	6,93	7,12	7,36	6,26	6,47	6,64	12,56	13,59	15,23
	Schran- ken-Sys- tem	21,84	22,47	23,12	19,65	20,37	20,86	49,39	52,89	57,73
»Groß- veran- stal- tung«- Szenario	Free- Flow-Sys- tem	6,93	7,12	7,36	6,26	6,47	6,64	12,56	13,59	15,23
	Schran- ken-Sys- tem	21,84	22,47	23,12	19,65	20,37	20,86	49,39	52,89	57,73

5 Wirkungsabschätzung und Beitragsanalyse

Unter Berücksichtigung der Ziele der Studie, des zuvor beschriebenen methodischen Ansatzes sowie der gewählten Systemgrenzen und getroffenen Annahmen, werden im folgenden Kapitel die Ergebnisse in Bezug auf den Vergleich der potenziellen Klimawirkung je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang bei der Parkraumbewirtschaftungskonzepten dargestellt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung, also die CO₂-Äquivalente, die potenzielle Klimawirkung anzeigen und keine tatsächlichen Wirkungen auf Wirkungsendpunkte, Grenzwertüberschreitungen von Schwellenwerten, Sicherheitsspannen oder Gefahren voraussagen (ISO 14040).

5.1 »Basis«-Szenario

Im »Basis«-Szenario zeigt das Free-Flow-System Vorteile gegenüber dem Schranken-System in Bezug auf die potenzielle Klimawirkung je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang. Das Szenario repräsentiert in Bezug auf die Beeinflussung der PKW-Fahrt im Ein- und Ausfahrbereich eine konservative Abschätzung und stellt im Hinblick auf das potenzielle Einsparpotenzial des Free-Flow-Systems eine untere Grenze dar. Das Szenario wurde als Basis für die Bewertung gewählt, da im Rahmen der Klimabilanzstudie keine empirischen Daten zur Häufigkeit einer schrankenbedingten Staubbildung ermittelt werden konnten. Im »Basis«-Szenario ergibt sich der Unterschied zwischen den beiden Konzepten in Bezug auf die PKW-Fahrt folglich durch einen einzelnen Halte- und Anfahrvorgang vor der Schranke (sowohl bei Einfahrt als auch bei Ausfahrt), während beim Free-Flow-System im gleichen Bereich von einer Konstantfahrt mit reduzierter Geschwindigkeit (hier 10 km/h über 2-mal 7 m) ausgegangen wird.

Unter den genannten Annahmen ergibt sich das Einsparpotenzial für das Free-Flow-System im »Basis«-Szenario je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang zu rund 7,8 g CO₂-Äquivalenten. Gegenüber dem Schranken-System entspricht das einer Einsparung an Treibhausgasemissionen von rund 31 %. Abbildung 6 zeigt die Gegenüberstellung der potenziellen Klimawirkung in beiden Systemen.

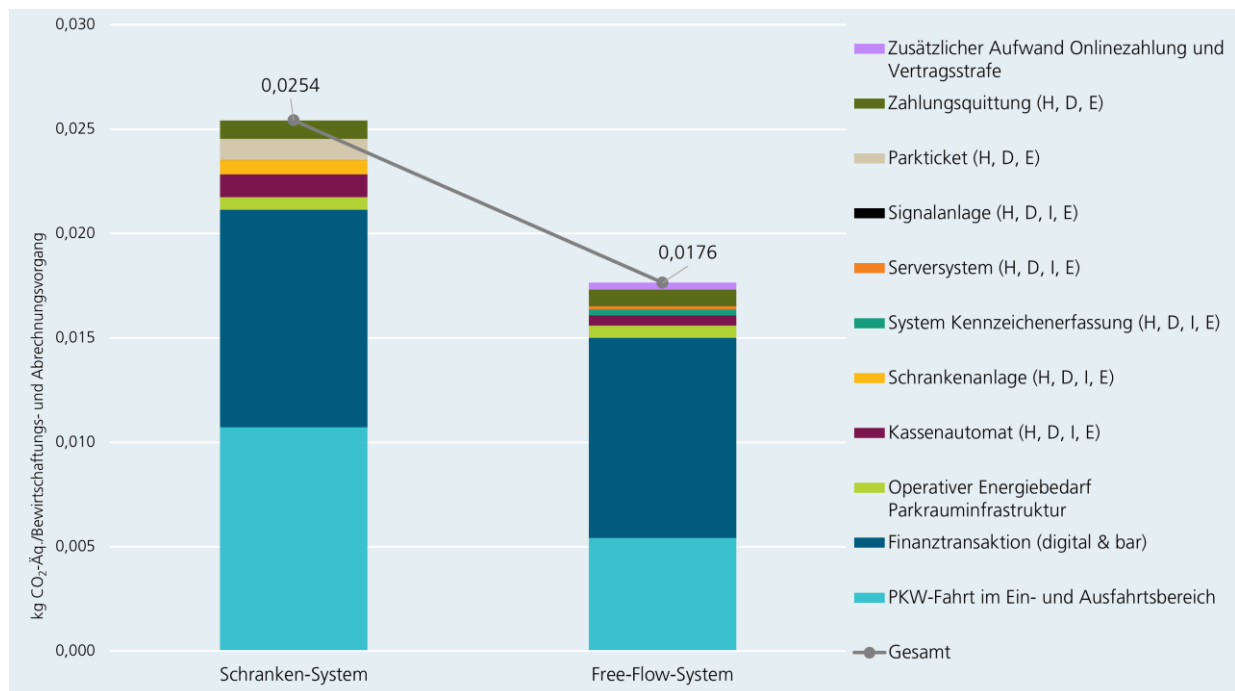


Abbildung 6: Gegenüberstellung der potenziellen Klimawirkung je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang für beide Parkraumbewirtschaftungskonzepte im »Basis«-Szenario (H: Herstellung, D: Distribution, I: Installation, E: End of Life).

Es wird deutlich, dass die Klimawirkung für beide Parkraumbewirtschaftungskonzepte im Wesentlichen durch die berücksichtigte PKW-Fahrt im Ein- und Ausfahrtsbereich sowie die Abwicklung der Finanztransaktion bestimmt wird. Im Hinblick auf die Finanztransaktion leistet dabei der Anteil der Barzahlung den größten Beitrag. Dies ist insbesondere auf die Herstellung des Bargelds sowie die Bargeldlogistik zurückzuführen. Da sich der Anteil von Finanztransaktionen mit Bargeld sowie der Anteil von digitalen Zahlungen bei beiden Konzepten nur geringfügig unterscheiden, ist auch der aus der Finanztransaktion resultierende Unterschied in Bezug auf die Klimawirkung lediglich im Bereich von 0,8 g CO₂-Äquivalenten. Trotz des hohen Beitrags der Finanztransaktion zur absoluten Klimawirkung ist diese folglich weniger relevant für den identifizierten Unterschied zwischen den beiden Konzepten.

Die PKW-Fahrt im Ein- und Ausfahrtsbereich hat an der Klimawirkung je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang einen relativen Anteil von 42 % im Fall des Schranken-Systems und einen Anteil von 31 % beim Free-Flow-System. Dies ist vor allem durch den im Flottenmix berücksichtigten Anteil an Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor (rund 91 %) und die mit der Verbrennung fossiler Kraftstoffe einhergehenden Treibhausgasemissionen zu begründen. Bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor entfallen über alle Fahrzeugklassen und beide Systeme hinweg zwischen 54 % und 68 % der Treibhausgasemissionen auf die Verbrennung des Kraftstoffs selbst. Bei der Verbrennung dominieren fossile CO₂-Emissionen mit rund 99 % die Klimawirkung. Zwischen 18 % und 23 % der Emissionen stammen weiterhin aus Kraftstoffbereitstellung. Hier dominiert so-

wohl für Diesel als auch für Benzin die Erdölförderung die Klimabilanz. Die übrigen Emissionen werden durch die anteilige Berücksichtigung von Fahrzeugherstellung, -verwertung und -wartung sowie Straßenbaumaßnahmen bedingt.

Durch die Vermeidung des Halte- und Anfahrvorgangs vor der Schranke kann der Kraftstoffverbrauch der PKW je nach Fahrzeugklasse zwischen 55 % und 57 % reduziert werden (Energiebedarf der Elektrofahrzeuge kann um rund 70 % reduziert werden). Das daraus resultierende Einsparpotenzial des Free-Flow-Systems liegt bei rund 5,3 g CO₂-Äquivalenten je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang. Es lässt sich schlussfolgern, dass die potenziellen Vorteile des Free-Flow-Systems in Bezug auf die Klimawirkung im »Basis«-Szenario vor allem auf die Optimierung des Verkehrsflusses im Ein- und Ausfahrtbereich des Parkraums zurückzuführen sind.

Der Beitrag zur Klimawirkung aus der Bereitstellung des operativen Energiebedarfs der Parkrauminfrastruktur ist mit 2,4 % bzw. 3,6 % vergleichsweise klein. Zur Vollständigkeit wird in Abbildung 7 dennoch die Verteilung des Energiebedarfs auf die einzelnen Komponenten für beide Systeme gegenübergestellt. Der operative Energiebedarf je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang fällt für das Free-Flow-System dabei insgesamt leicht kleiner aus. Grund hierfür ist unter anderem der niedrigere Energiebedarf des Systems zur Kennzeichenerfassung gegenüber der Schrankenanlage. Auch für die Kassenautomaten fällt der Energiebedarf beim Schranken-System höher aus. Dies ist zum einen durch die größere Anzahl an installierten Automaten zu begründen (der zu berücksichtigende Anteil des Stand-By-Energiebedarfs fällt höher aus) und zum anderen durch den höheren Anteil von Zahlung vor Ort am Automaten (Onlinezahlung fällt beim Schranken-System weg). Weiterhin fällt auf, dass der Energiebedarf für die Datenübertragung und -verarbeitung (Serversystem) beim Free-Flow-System den größten Anteil des Energiebedarfs ausmacht, während der entsprechende Energiebedarf beim Schranken-System sehr gering ausfällt. Dies ist auf den deutlich höheren Datenumfang beim Free-Flow-System zurückzuführen (Übertragung und Verarbeitung von Bilddateien).

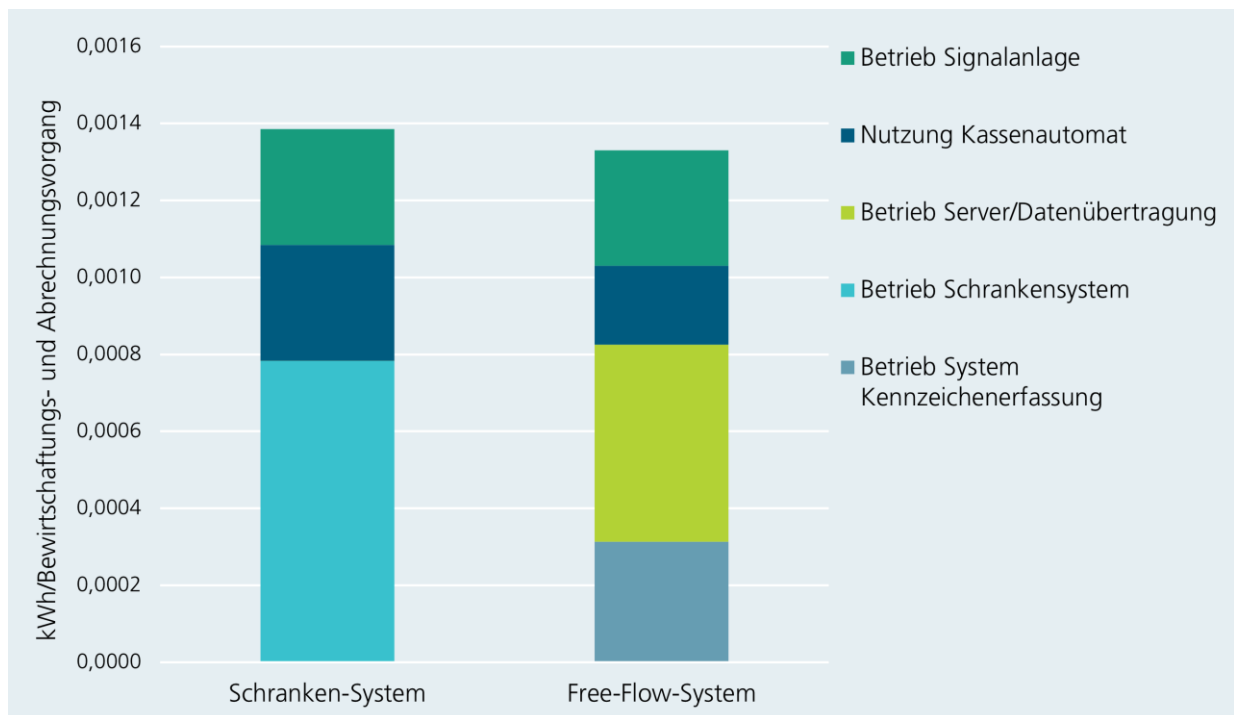


Abbildung 7: Gegenüberstellung des operativen Energiebedarfs für die Parkrauminfrastruktur.

Die Herstellung, Distribution, Installation und Verwertung der relevanten Infrastrukturkomponenten, wurde im Rahmen der Klimabilanzstudie anteilig berücksichtigt. Der daraus resultierende Beitrag zur Klimawirkung ist mit rund 7 % (Schranken-System) bzw. 5 % (Free-Flow-System) ebenfalls eher klein. Den größten Anteil hat bei beiden Systemen der Kassenautomat. Dies ist insbesondere auf die Anzahl der auf dem repräsentativen Parkraum installierten Automaten zurückzuführen. Beim Schranken-System hat die Herstellung, Distribution, Installation und Verwertung der Schrankenanlage weiterhin einen Anteil von rund 2,7 % an der Klimawirkung je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang. Analog hat das System zur Kennzeichenerfassung einen Anteil von 1,7 % an der Klimawirkung beim Free-Flow-System. Sowohl bei den Kassenautomaten als auch bei der Schrankenanlage bzw. dem System zur Kennzeichenerfassung fällt die Herstellung der benötigten elektronischen Komponenten besonders ins Gewicht.

Wie Abbildung 6 zeigt, führt auch der Verzicht auf den Einsatz von Parktickets zu Einsparungen in der Klimabilanz. Je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang ist die Herstellung, Distribution und Verwertung des Parktickets mit Treibhausgasemissionen in Höhe von rund 1,0 g CO₂-Äquivalenten verbunden. Diese können im Falle des Free-Flow-Systems eingespart werden. Da im konventionellen System für jeden Nutzungsvorgang ein Parkticket benötigt wird, ist dieser Effekt nicht zu vernachlässigen. Auf der anderen Seite fallen beim Free-Flow-System zusätzliche Aufwendungen für die Onlinezahlung (anteilig) sowie das Bearbeiten möglicher Vertragsstrafen (anteilig) an. Wie die Auswertung zeigt, sind die daraus resultierenden zusätzlichen Treibhausgasemissionen mit rund 0,3 g CO₂-Äquivalenten je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang jedoch kleiner.

als bspw. die Einsparungen durch den Verzicht auf Parktickets. Die spezifischen Beiträge von Finanztransaktion, PKW-Fahrt, Energiebereitstellung, Infrastrukturkomponenten sowie Verbrauchsmaterialien sind in Tabelle 22 und Tabelle 23 im Anhang dargestellt.

Insgesamt zeigt sich, dass die Klimawirkung für beide Parkraumbewirtschaftungskonzepte vor allem durch Treibhausgasemissionen aus fossilen Rohstoffen bedingt wird. Insbesondere fossile CO₂-Emissionen sind bei beiden Alternativen für mehr als 92 % der Klimawirkung verantwortlich. Fossile Methanemissionen leisten demgegenüber einen Beitrag von rund 5,6 % bzw. 4,2 %. Eine detaillierte Auflistung der Unterteilung nach emittierten und der Atmosphäre entzogenen Treibhausgasnettomengen aus fossilen und biogenen Rohstoffen, aus der Luftfahrt sowie infolge der direkten Landnutzungsänderung, wie in ISO 14067 gefordert, kann Tabelle 22 und Tabelle 23 im Anhang entnommen werden. Eine Auflistung der einflussreichsten Treibhausgasemissionen (Beitrag >1 %) ist für das »Basis«-Szenario in Tabelle 24 im Anhang aufgeführt.

5.2 »Dichter-Verkehr«-Szenario

Im Rahmen des »Dichter-Verkehr«-Szenarios wurde der Vergleich zwischen den beiden Parkraumbewirtschaftungskonzepten für eine Situation mit erhöhtem Verkehrsaufkommen durchgeführt. Für eine solche Situation ist es laut den Experten der fair parken GmbH üblich, dass mehrere Nutzer/Fahrzeuge den Parkraum gleichzeitig befahren möchten. Dabei kann es im Falle des Schranken-Systems aufgrund der Öffnungs- und Schließzeiten (Abfertigungsrate) der Schranke zu kurzen Rückstaus kommen, während beim Free-Flow-System (unter Vernachlässigung anderer, nicht vom Bewirtschaftungskonzept beeinflusster Stauursachen) ein flüssiger Verkehrsfluss bestehen bleibt. Nach Expertenschätzung wurde für das »Dichter-Verkehr«-Szenario repräsentativ eine konstante Staulänge von 4 Fahrzeugen angesetzt. Im Falle des Schranken-Systems hat somit jeder neu eintreffende bzw. den Parkraum verlassende PKW in dieser Situation durchschnittlich 3 weitere Fahrzeuge vor sich und muss im Anschluss den Schrankenbereich passieren. Das Intervall aus Abbremsen, Halten und Beschleunigen wird entsprechend bei der Einfahrt und der Ausfahrt jeweils 4-mal durchfahren. Je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang wurde folglich eine PKW-Fahrt im Stop-and-Go-Verkehr über 56 m (2-mal 28 m) berücksichtigt. Beim Free-Flow-System befahren/verlassen die PKW den Parkraum hingegen hintereinander mit reduzierter, konstanter Geschwindigkeit. Auch hier wurde eine Fahrt über 56 m berücksichtigt. Im Vergleich zum »Basis«-Szenario ist somit der zu berücksichtigende Anteil der PKW-Fahrt gestiegen.

Die Auswertung zeigt auch im »Dichter-Verkehr«-Szenario erneut Vorteile für das Free-Flow-System in Bezug auf die Klimawirkung auf. Unter den beschriebenen Annahmen ergibt sich das Treibhausgaseinsparpotenzial zu 28,2 g CO₂-Äquivalenten je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang zugunsten des Free-Flow-Systems. Das entspricht einer Einsparung von 49 % gegenüber dem Schranken-System. Abbildung 8 fasst die Ergebnisse in diesem Szenario zusammen. Die spezifischen Beiträge werden aus Tabelle 22 und Tabelle 23 im Anhang ersichtlich.

Wie zu erwarten, steigt der Einfluss der PKW-Fahrt auf die Klimabilanz bei beiden Systemen, während der relative Beitrag der Finanztransaktion, des operativen Energiebedarfs sowie der Herstellungs-, Distributions-, Installations- und Verwertungsprozesse der relevanten Parkrauminfrastrukturkomponenten und Verbrauchsmaterialien zurückgeht. Wie im »Basis«-Szenario bereits herausgearbeitet wurde, ist insbesondere die Optimierung des Verkehrsflusses und die damit verbundene Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs/Energiebedarfs der PKW für die Treibhausgaseinsparungen beim Free-Flow-System verantwortlich. Durch das höhere Verkehrsaufkommen in diesem Szenario verstärkt sich der Effekt entsprechend. Es kann geschlussfolgert werden, dass der Vorteil des Free-Flow-Systems in Bezug auf die Klimawirkung je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang unter den getroffenen Annahmen mit wachsendem Verkehrsaufkommen ebenfalls steigt.

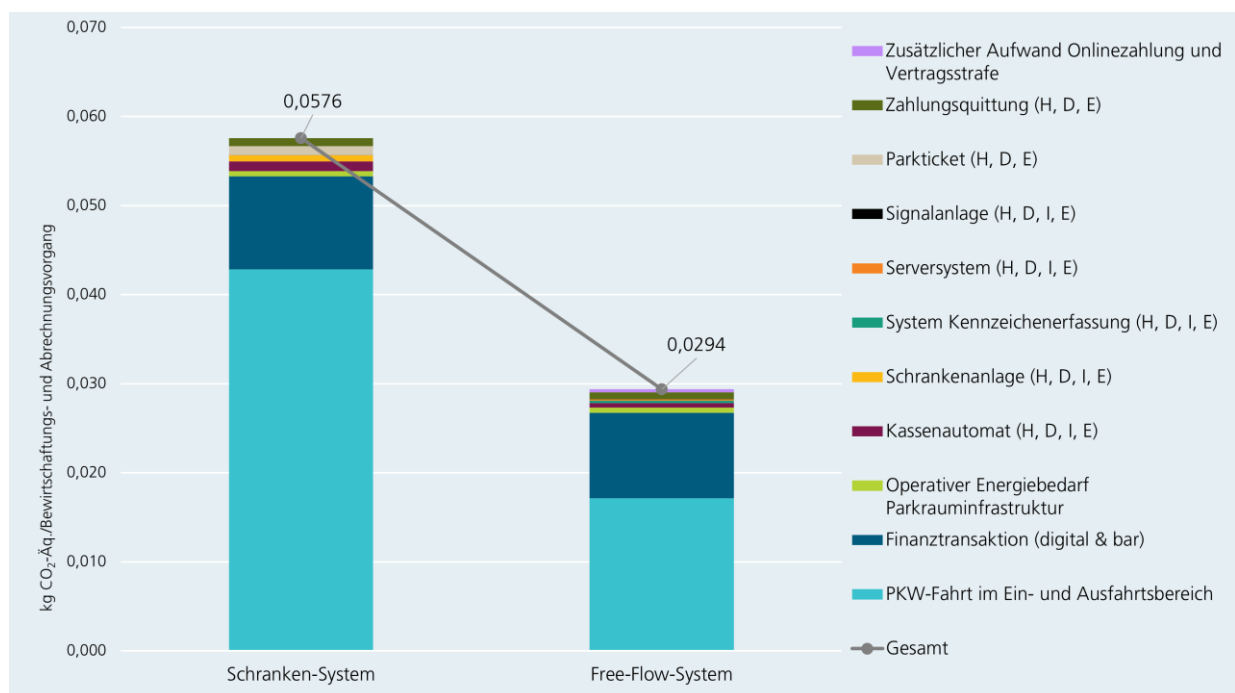


Abbildung 8: Gegenüberstellung der potenziellen Klimawirkung je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang für beide Parkraumbewirtschaftungskonzepte im »Dichter-Verkehr«-Szenario.

In Bezug auf die Unterscheidung nach emittierten und entzogenen Treibhausgasnettomengen aus fossilen und biogenen Rohstoffen, aus der Luftfahrt sowie infolge der direkten Landnutzungsänderung ergeben sich keine wesentlichen Unterschiede im Vergleich zum »Basis«-Szenario. Auch hier wird die Klimabilanz für beide Alternativen durch fossile CO₂-Emissionen mit einem Beitrag von über 90 % dominiert. Tabelle 22 und Tabelle 23 im Anhang zeigen die Unterteilung der Emissionen für dieses Szenario, während Tabelle 24 im Anhang die wesentlichen Treibhausgasemissionen (Beitrag >1 %) auflistet.

5.3 »Großveranstaltung«-Szenario

Im »Großveranstaltung«-Szenario wurde die potenzielle Klimawirkung je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang zwischen den beiden Parkraumbewirtschaftungskonzepten für eine Extremsituation mit sehr hohem Verkehrsaufkommen verglichen. Im Falle des beschränkten Parkens wird dazu eine Referenzsituation angenommen, bei welcher sich jedes Fahrzeug schrankenbedingt sowohl beim Befahren des Parkraums als auch beim Verlassen des Parkraums durchschnittlich 30 min im Stau befindet. Das entspricht nach den Modellparametern jeweils einer Staudistanz von 994 m. Für das Free-Flow-System wurde analog eine Fahrt mit der konstanten Geschwindigkeit von 15 km/h über die gleiche Distanz angenommen.

Die Gegenüberstellung der resultierenden, potenziellen Klimawirkung je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang beider Konzepte zeigt ein Einsparpotenzial von rund 60 % (0,92 kg CO₂-Äq.) für das Free-Flow-Konzept (siehe Abbildung 9). Wie zu erwarten, dominiert der Einfluss der PKW-Fahrt die Treibhausgasemissionen stärker als bei den vorherigen Szenarien (für beide Alternativen > 98 %), während für eine solche Situation die Treibhausgasemissionen aus Finanztransaktion, operativem Energiebedarf sowie der Herstellung-, Distribution, Installation und Verwertung der relevanten Parkrauminfrastrukturkomponenten und Verbrauchsmaterialien vernachlässigbar sind (siehe Tabelle 22 und Tabelle 23 im Anhang).

Die Auswertung dieses Szenarios weist eher eine Obergrenze in Bezug auf das Einsparpotenzial von Treibhausgasemissionen für eine Umstellung auf das Free-Flow-System aus. Es wird deutlich, dass bei extremen Situationen mit einem sehr hohen Verkehrsaufkommen Emissionen im Bereich von 1 kg CO₂-Äquivalenten je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang eingespart werden können. Dabei gilt zu berücksichtigen, dass es sich hierbei um eine Ausnahmesituation handelt, welche nicht den täglichen Regelbetrieb auf den meisten Parkräumen widerspiegelt. Zwar sind solche Szenarien laut den Experten der fair parken GmbH realistisch und lassen sich ebenfalls durch Praxisberichte bestätigen (Google-Rezensionen 2024), allerdings muss davon ausgegangen werden, dass entsprechende Situationen in der Praxis eher selten vorkommen und sich lediglich auf Großveranstaltungen beschränken. Weiterhin kann bei einem solchen Verkehrsaufkommen der Effekt anderer Stauursachen, wie bspw. Parksuchverkehr oder verkehrstechnische Anbindung des Parkraums, verstärkt werden. Solche Ursachen sind zwar nicht auf das Parkraumbewirtschaftungskonzept zurückzuführen, dennoch können die ausgewiesenen Vorteile des Free-Flow-Systems dann niedriger ausfallen.

Auch für dieses Szenario ergibt sich kein Unterschied in Bezug auf Verteilung der emittierten und entzogenen Treibhausgasnettomengen aus fossilen und biogenen Rohstoffen, aus der Luftfahrt sowie infolge der direkten Landnutzungsänderung im Vergleich zu den beiden bereits beschriebenen Szenarien. Fossile CO₂-Emissionen sind erneut in beiden Fällen für einen Beitrag zur Klimawirkung von rund 89 % verantwortlich. Tabelle 22 und Tabelle 23 im Anhang zeigen die Unterteilung der Emissionen für dieses Szenario, während Tabelle 24 im Anhang die wesentlichen Treibhausgasemissionen (Beitrag >1 %) auflistet.

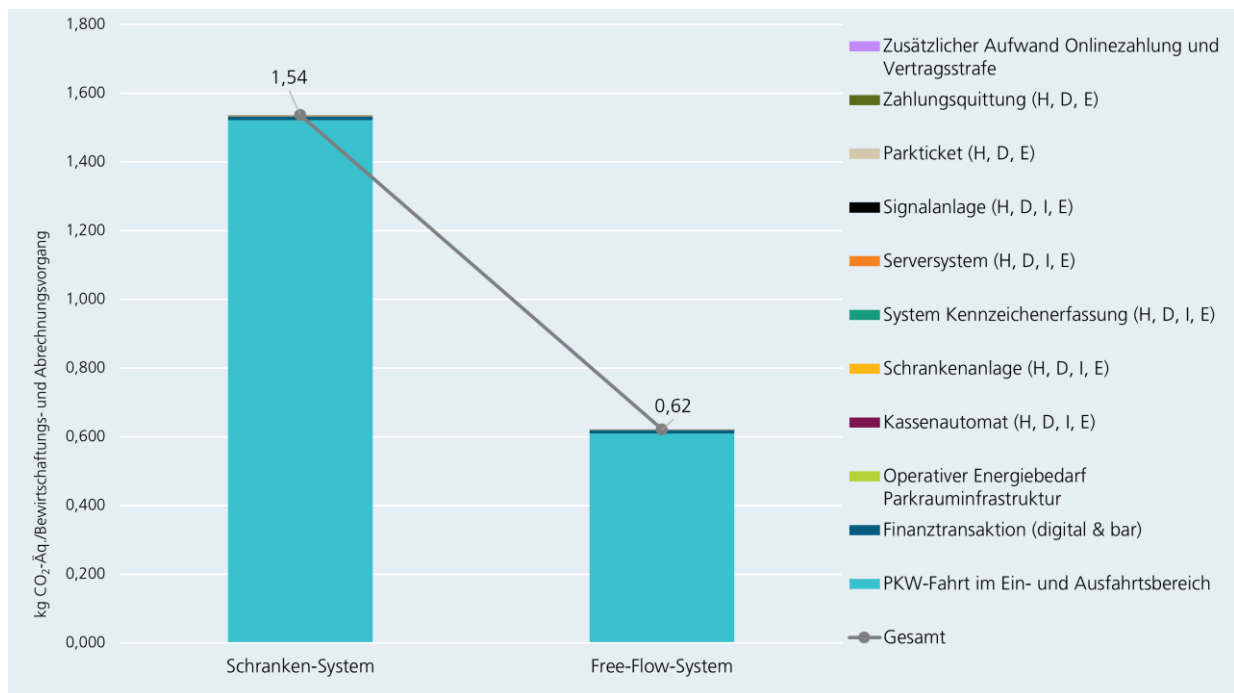


Abbildung 9: Gegenüberstellung der potenziellen Klimawirkung je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang für beide Parkraumbewirtschaftungskonzepte im »Großveranstaltung«-Szenario.

5.4 »Digitale-Zahlung«-Szenario

Neben der PKW-Fahrt im Ein- und Ausfahrbereich und dem damit verbundenen Kraftstoffverbrauch/Energiebedarf leistet auch die Finanztransaktion im »Basis«-Szenario einen hohen Beitrag zur Klimawirkung. Es gilt, je niedriger das Verkehrsaufkommen, desto höher der relative Beitrag aus der Finanztransaktion. Trotz des insgesamt hohen Beitrags ist die Finanztransaktion weniger entscheidend für den Unterschied zwischen den beiden Parkraumbewirtschaftungskonzepten in Bezug auf die Klimabilanz. Da die Klimawirkung der Finanztransaktion jedoch insbesondere durch den Anteil der Bargeldzahlung dominiert wird und dieser Anteil in Zukunft voraussichtlich stetig sinken wird, lohnt sich an dieser Stelle dennoch eine weitere Sensitivitätsanalyse. Hierbei wurde die Klimawirkung je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang für beide Systeme unter der Annahme von ausschließlich digitalen Zahlungen bestimmt. In der Praxis würde das bedeuten, dass an den Kassenautomaten eines Parkraums lediglich mit der Karte bezahlt werden kann bzw. die Möglichkeit einer nachträglichen Zahlung im Internet besteht (Free-Flow-System). Als Referenz wurde dabei das »Basis«-Szenario angesetzt. Die übrigen Parameter wurden somit von diesem übernommen.

Die Ergebnisse zeigen erwartungsgemäß, dass sich durch eine solche Maßnahme die Treibhausgasemissionen bei beiden Parkraumkonzepten senken lassen. Für das Schranken-System ergibt sich eine Reduzierung der Emissionen auf 16,9 g CO₂-Äquivalente (Rückgang von rund 33 %). Beim Free-Flow-System sinkt die Klimawirkung je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang um rund 43 % auf 10,0 g CO₂-Äquivalente. Auch für dieses Szenario ergeben sich entsprechend Vorteile für das Free-Flow-Konzept in Bezug auf die Klimabilanz. Da im Vergleich

zum Basis Szenario außer der Finanztransaktion alle übrigen Parameter gleich geblieben sind, steigt insgesamt der relative Ergebniseinfluss der PKW-Fahrt im Ein- und Ausfahrtsbereich sowie der Einfluss von Energiebedarf, Parkrauminfrastruktur und Verbrauchsmaterialien. Wie Abbildung 10 zeigt, macht die von der Kraftstoffverbrennung dominierte PKW-Fahrt nun einen Anteil von 63 % bzw. 54 % aus. Die Finanztransaktion liegt bei 12 % bzw. 20 %, während die Parkrauminfrastruktur (Herstellung, Distribution, Installation und Verwertung) in beiden Systemen gemeinsam jeweils einen Anteil von 10 % ausmacht.

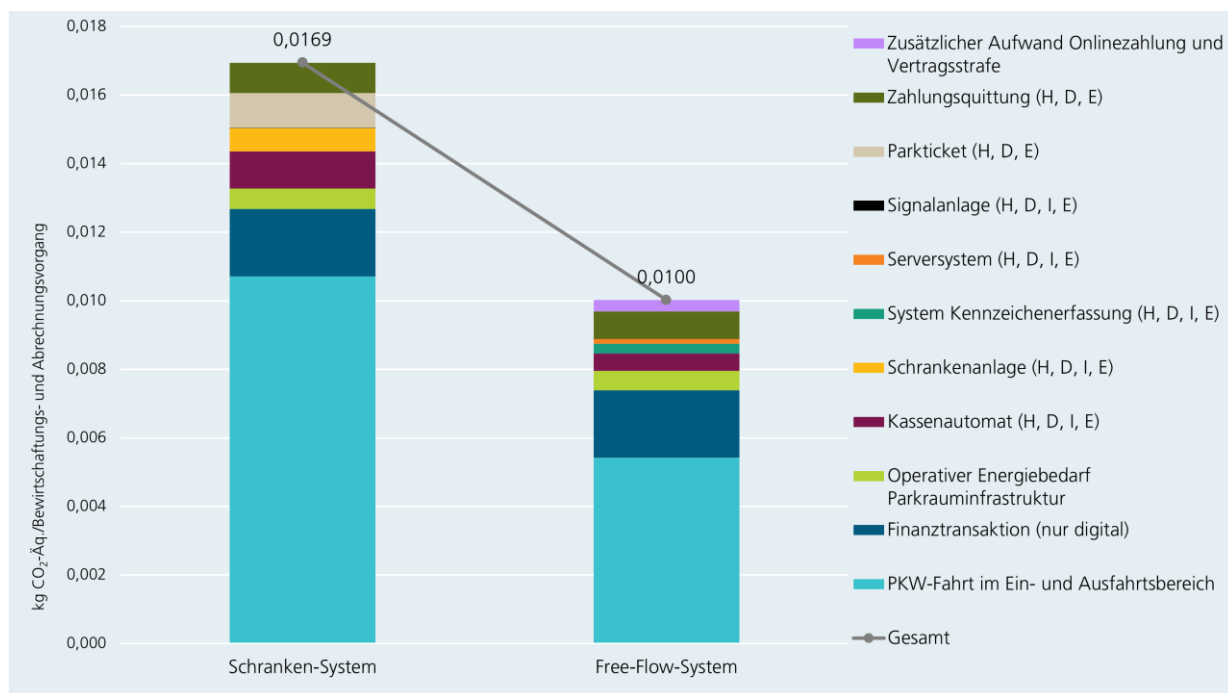


Abbildung 10: Gegenüberstellung der potenziellen Klimawirkung je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang für beide Parkraumbewirtschaftungskonzepte im »Digitale-Zahlung«-Szenario.

In Bezug auf die Kategorisierung der Treibhausgasemissionen ergeben sich keine signifikanten Unterschiede. So wird die Klimabilanz weiterhin zu mehr als 89 % durch fossile CO₂-Emissionen bestimmt. Eine entsprechende Übersicht wird in Tabelle 22 und Tabelle 23 im Anhang bereitgestellt. Die Beitragsanalyse kann anhand von Tabelle 24 im Anhang nachvollzogen werden.

6 Interpretation und Diskussion der Ergebnisse

Die zuvor beschriebenen Ergebnisse zeigen in jedem der untersuchten Szenarien in Bezug auf die potenzielle Klimawirkung je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang Vorteile für das Free-Flow-System gegenüber dem Schranken-System. Für die aktuelle Situation in Deutschland ist dies maßgeblich auf den reduzierten Kraftstoffverbrauch/Energiebedarf der PKW während Befahren bzw. Verlassen des Parkraums zurückzuführen. Weiterhin ergibt sich beim Free-Flow-System ein leicht reduzierter operativer Energiebedarf der relevanten Parkrauminfrastruktur, außerdem ergeben sich Einsparungen, durch die Möglichkeit zur Reduzierung der zu installierenden Kassenautomaten und durch einen höheren Anteil an digitalen Zahlungen. Der erhöhte Aufwand für die Datenübertragung und -verarbeitung sowie der zusätzliche Aufwand für die Onlinezahlung und die Abwicklung einer Vertragsstrafe fallen nur geringfügig ins Gewicht. Unter der Annahme, dass ein Free-Flow-Parkraumbewirtschaftungskonzept den Verkehrsfluss beim Befahren und Verlassen von Parkräumen optimiert und dabei Stausituationen mit häufigen An- und Abbremsvorgängen sowie Haltephasen reduzieren kann, zeigt sich bei wachsendem Verkehrsaufkommen ein steigendes Einsparpotenzial für Treibhausgasemissionen.

Eine zunehmende Elektrifizierung des Verkehrs und der Ausbau erneuerbarer Energien könnten zukünftig dazu führen, dass ein wesentlicher Faktor für die Vorteile des Free-Flow-Systems in Bezug auf die Klimabilanz zunehmend wegfällt und sich beide Systeme in der Bewertung annähern. Hier würden die Treibhausgasemissionen bei beiden Alternativen signifikant zurückgehen.

6.1 Einordnung der Ergebnisse

Zur Veranschaulichung der ermittelten Vorteile des Free-Flow-Systems in Bezug auf die potenzielle Klimawirkung in der aktuellen Situation für Deutschland, lässt sich die Einsparung der Treibhausgasemissionen in Vergleichswerte umrechnen. Für den im Rahmen dieser Studie gewählten, repräsentativen Parkraum wurde mit 3.000 Parkvorgängen pro Tag gerechnet (500 Stellplätze mit 6 Parkvorgängen pro Stellplatz und Tag). Nimmt man nach dem »Basis«-Szenario konservativ an, dass sich die Parkraumnutzung gleichmäßig über alle 15 Betriebsstunden eines Tages verteilt, kommt es in beiden Systemen zu keiner Staubildung (Ankunftsrate ist kleiner als Abfertigungsrate). In Bezug auf die PKW-Fahrt im Ein- und Ausfahrtsbereich ergibt sich der einzige Unterschied zwischen den untersuchten Bewirtschaftungskonzepten durch einen Abbrems-, Halte- und Beschleunigungsvorgang beim Schrankensystem, während der Ein- und Ausfahrtsbereich beim Free-Flow-System mit konstanter, reduzierter Geschwindigkeit durchfahren wird. Diese Situation stellt somit einen guten Ausgangspunkt für die Bewertung dar, da sie in Bezug auf eine mögliche Staubildung die unterste Grenze repräsentiert. Für die Umsetzung eines Free-Flow-Parkraumbewirtschaftungskonzepts auf dem repräsentativen Parkraum ergibt sich unter diesen Annahmen entsprechend ein jährliches Einsparpotenzial für Treibhausgasemissionen von rund 7,3 t CO₂-Äquivalenten. Dies entspricht bspw.

- dem jährlichen CO₂-Fußabdruck von rund 0,7 deutschen Bürgern (BMUV 2024),
- den Emissionen aus der Strombereitstellung für rund 666.000 Smartphone-Ladevorgänge (Öko-Institut e.V. 2020),
- der CO₂-Menge, die rund 0,7 Hektar Waldfläche pro Jahr speichern (Niedersächsische Landesforsten 2018).

Da sich die Parkraumnutzung in der Realität nicht gleichmäßig über alle Betriebsstunden verteilt und in Abhängigkeit von der Tageszeit Peaks nach oben und unten auftreten, kann die Ankunftsrate beim Schrankensystem in gewissen Situationen höher sein als die Abfertigungsrate. Hier kommt es dann zu Rückstaus sowohl bei der Einfahrt als auch bei der Ausfahrt. Im Rahmen der Klimabilanzstudie konnte die Häufigkeit einer Staubildung über einen Tag verteilt auf und vor Parkräumen nicht empirisch untersucht werden. Aus diesem Grund können über die zuvor skizzierte untere Grenze hinaus keine weiteren Werte zum Einsparpotenzial abschließend berechnet werden. Um sich einer Situation in der Realität jedoch zu nähern und das Einsparpotenzial für diese abzuschätzen, kann bspw. angenommen werden, dass bei 20 % aller Nutzungsvorgänge eines Tages die Situation aus dem »Dichter-Verkehr«-Szenario vorherrscht und es bei den übrigen Nutzungsvorgängen zu keiner Stausituation kommt (»Basis«-Szenario). Für einen solchen Fall liegt das jährliche Einsparpotenzial für Treibhausgasemissionen beim Free-Flow-System bei rund 11 t CO₂-Äquivalenten. Umgerechnet in die zuvor verwendeten Vergleichswerte entspricht diese Einsparung

- dem jährlichen CO₂-Fußabdruck von rund einem deutschen Bürger (BMUV 2024),
- den Emissionen aus der Strombereitstellung für rund 1 Millionen Smartphone-Ladevorgänge (Öko-Institut e.V. 2020),
- der CO₂-Menge, die rund ein Hektar Waldfläche pro Jahr speichert (Niedersächsische Landesforsten 2018).

Es gilt zu berücksichtigen, dass es sich hierbei um eine fiktive Situation handelt, welche zur Veranschaulichung der Größenordnung des Einsparpotenzials dienen soll. Weiterhin gelten die Werte nur für die direkt vom Bewirtschaftungskonzept beeinflussten Stauursachen. Falls es bspw. zu einer Staubildung auf dem Parkraum durch eine Ampel auf der angrenzenden öffentlichen Straße kommt, so ist dies nicht auf das Parkraumbewirtschaftungskonzept zurückzuführen. Dennoch würde es in einem solchen Fall voraussichtlich auch beim Free-Flow-System zu einer Staubildung und folglich zu einem höheren Treibhausgasausstoß kommen. Die Ergebnisse des »Basis«-Szenarios gelten jedoch auch in einer solchen Situation weiterhin, da hier lediglich der Bereich direkt um die Schrankenanlage betrachtet wird und die Beschränkung den Verkehrsfluss neben der externen Quelle zusätzlich behindern würde.

Neben der Abschätzung des jährlichen Einsparpotenzials für Treibhausgasemissionen bei einer Umstellung des Bewirtschaftungskonzepts für einen einzelnen Parkraum, ist auch eine Einordnung gegenüber der gesamten Treibhausgasemis-

sionen beim Parken interessant. Auf diese Weise könnten Aussagen über die tatsächliche Relevanz einer solchen Umstellung für die Klimawirkung eines gesamten Parkvorgangs abgeleitet werden. Da jedoch hierzu keine Werte in der Literatur identifiziert werden konnten und eine eigene Modellierung der Klimabilanz für den gesamten Parkvorgang im Rahmen dieser Studie weder vorgesehen war noch umgesetzt werden konnte, bleibt an dieser Stelle nur die Möglichkeit einer qualitativen Abschätzung.

Auf Basis der Ergebnisse dieser Klimabilanzstudie ist zu erwarten, dass die Klimabilanz je Parkvorgang ebenfalls maßgeblich durch die Treibhausgasemissionen aus der Verbrennung von Kraftstoff dominiert wird. Die auf dem Parkraum nach der Einfahrt bzw. vor der Ausfahrt zurückgelegten Distanzen fallen im Vergleich zu dem durch den Ein- bzw. Ausfahrtsbereich beeinflussten Teil der PKW-Fahrt regelmäßig größer aus. Zudem kann es bei hohem Verkehrsaufkommen auch beim Parksuchverkehr auf dem Parkraum selbst zu Stausituationen mit erhöhtem Kraftstoffverbrauch und folglich erhöhten Emissionen kommen. Für eine Bilanzierung des gesamten Parkvorgangs müssten zudem weitere Infrastrukturkomponenten, wie bspw. Gebäude, Stellplätze, Beleuchtung, Überwachung oder die Klimatisierung, berücksichtigt werden. Auf diese Weise würde die Bedeutung des Parkraumbewirtschaftungskonzepts für die Klimabilanz eines gesamten Parkvorgangs weiter sinken. Eine finale Aussage zum Beitrag des Bewirtschaftungskonzepts ist an dieser Stelle aufgrund der Datenlage nicht möglich. Grundsätzlich lässt sich schlussfolgern, dass die Bedeutung der Treibhausgaseinsparung aus der optimalen Wahl des Parkraumbewirtschaftungskonzepts für den gesamten Parkvorgang mit steigender Größe und Auslastung des Parkraums eher sinkt. Grund sind die im Schnitt längeren Distanzen, welche auf dem Parkraum zurückgelegt werden müssen, sowie möglicher Stop-and-Go-Verkehr während der Parkplatzsuche bei hoher Auslastung.

Zur weiteren Einordnung der berechneten Einsparungen für Treibhausgasemissionen durch die Einführung von Free-Flow-Bewirtschaftungskonzepten ist eine Abschätzung des Potenzials für Deutschland als geografischer Bezugsraum der Klimabilanzstudie interessant. Konkrete Angaben zur Anzahl, Stellplatzkapazität und täglicher Nutzung beschränkter Parkräume in Deutschland konnten im Rahmen der Studie nicht ermittelt werden. Entsprechende Daten zur Parkraumlandschaft werden aktuell nicht zentral erfasst oder veröffentlicht. Aus diesem Grund ist eine gesamtheitliche Bewertung des möglichen Beitrags von Free-Flow-Bewirtschaftungskonzepten zur Erreichung von Klimaschutzzielen bspw. im Verkehrssektor nur schwer möglich und kann nur grob abgeschätzt werden.

Nach eigenen Angaben hat die fair parken GmbH zum aktuellen Zeitpunkt (Dezember 2024) 100 Parkräume mit Free-Flow-Bewirtschaftungskonzept umgesetzt. Die betreuten Objekte haben dabei im Schnitt eine Kapazität von 417 Stellplätzen und eine Nutzungsrate von durchschnittlich 5,57 Parkvorgängen pro Tag und Stellplatz. Auf Basis der Ergebnisse dieser Studie werden hier im Vergleich zu Schranken-Systemen bereits pro Jahr rund 565 t CO₂-Äquivalente eingespart (unter der Annahme von 312 Betriebstagen pro Jahr). Im Sinne eines konservativen Ansatzes wurden bei dieser Abschätzung die Ergebnisse aus dem »Basis«-Szenario zugrunde gelegt.

Um ein jährliches Einsparpotenzial des Free-Flow-Konzepts für Deutschland abzuschätzen, können verschiedene Literaturdaten herangezogen werden. Am 01.01.2024 waren in Deutschland rund 49 Millionen PKW zugelassen (Kraftfahrtbundesamt 2024). Ein durchschnittlicher PKW wird für zwei Fahrten pro Tag eingesetzt, wobei rund zwei Fünftel des PKW-Bestandes an einem durchschnittlichen Tag nicht bewegt werden (Kampker und Heimes 2024). Das entspricht rund 1,2 Fahrten pro PKW und Tag und 8,4 Fahrten pro PKW und Woche. Pro Tag ist ein durchschnittlicher PKW dabei rund 3,2 % der Zeit in Bewegung, während er rund 84,4 % der Zeit zuhause, rund 7,1 % der Zeit auf der Arbeit und rund 5,3 % beim Einkaufen oder sonstigen Standorten geparkt ist (Nobis und Kuhnimhof 2018). Wird angenommen, dass 10 % der Parkvorgänge für Einkaufen und Sonstiges auf einem beschränkten und kostenpflichtigen Parkraum stattfinden und die durchschnittliche Parkdauer dabei ca. 30 Minuten beträgt, entspricht das pro Jahr rund 4,6 Milliarden Parkvorgängen für solche Parkräume in Deutschland. Wird dieser Wert wiederum auf die Anzahl an zugelassenen PKWs in Deutschland bezogen, entspricht das rund 94 Parkvorgängen pro PKW und Jahr (ca. 2-mal pro Woche).

Auf der anderen Seite haben Betreiber von Parkhäusern und Parkplätzen in Deutschland im Jahr 2022 einen Umsatz von 1,41 Milliarden Euro erzielt (Statista GmbH 2024b). Die durchschnittliche Parkgebühr für Kurzzeitparken liegt in deutschen Städten dabei im Schnitt bei 1,49 € pro Stunde (Statista GmbH 2023). Wird dieser Wert für die Parkhäuser und Parkplätze der oben benannten Betreiber übernommen, ergibt sich eine jährliche Gesamtnutzungsdauer von rund 946 Millionen Stunden für solche Parkräume. Wird für die kostenpflichtigen Parkhäuser und Parkplätze ein Anteil von 50 % für Schranken-Systeme angesetzt und die Annahme der durchschnittlichen Parkdauer von 30 Minuten von oben übernommen, ergibt sich ein Wert von 946 Millionen Parkvorgängen auf den beschränkten Parkflächen. Das entspricht rund 19 Parkvorgängen je zugelassenem PKW und Jahr (ca. 1-mal in drei Wochen).

Während der abgeschätzte Wert von 4,6 Milliarden Parkvorgängen auf beschränkten Parkräumen eher optimistisch erscheint, wirkt ein Wert von 946 Millionen Parkvorgängen eher konservativ. Hier können nun jeweils die Ergebnisse aus dem »Basis«-Szenario angesetzt werden, um eine erste ebenfalls konservative Einschätzung zur Größenordnung und Spannbreite des Klimaschutzpotenzials für die aktuelle Situation in Deutschland abzuleiten. Nach den zuvor dargestellten Annahmen könnten durch eine Umstellung von Schranken-Systemen auf Free-Flow-Systeme Treibhausgasemissionen zwischen rund 35.880 t CO₂-Äq. (4,6 Milliarden Parkvorgänge pro Jahr, »Basis«-Szenario) und 7.380 t CO₂-Äq. (946 Millionen Parkvorgänge pro Jahr, »Basis«-Szenario) pro Jahr in Deutschland eingespart werden. Die Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors lagen in Deutschland im Jahr 2022 bei ca. 150 Millionen Tonnen (Umweltbundesamt 2024). Der Anteil der berechneten Einsparungen für eine Umstellung von Schranken-Systemen auf Free-Flow-Systeme würde hier somit zwischen 0,024 % und 0,005 % liegen. Nach der Studie von Schmaus et al. (2023) könnte die Einführung eines Tempolimits auf deutschen Autobahnen und Landstraßen unter Berücksichtigung von Nachfrage- und Routenwahleffekten beispielsweise zu Treibhausgaseinsparungen in Höhe von rund

8 Millionen t CO₂-Äquivalenten führen (5,1 % der Emissionen des Straßenverkehrs). In Bezug auf den gesamten Verkehrssektor lässt sich somit ableiten, dass ein flächendeckender Umstieg von Schranken-Systemen zu Free-Flow-Bewirtschaftungskonzepten in Deutschland insgesamt zwar nicht vernachlässigt werden sollte, zur Erreichung von Klimaschutzzielen in diesem Sektor jedoch eher von nachrangiger Bedeutung zu sein scheint.

Bei diesen Ergebnissen und Aussagen müssen zwingend die Unsicherheiten in Bezug auf die zuvor dargestellten Annahmen beachtet werden. Da insbesondere die Anzahl der Parkvorgänge pro Jahr auf beschränkten Parkflächen im Off-Street-Bereich in Deutschland nicht bekannt ist, sollten die in diesem Abschnitt berechneten Einsparpotenziale nicht zur Kommunikation genutzt und keinesfalls als gegeben betrachtet werden. Die Berechnungen dienen an dieser Stelle lediglich einer ersten Abschätzung der Größenordnung möglicher Einspareffekte.

6.2 Datenqualität und Limitationen

Eine zentrale Herausforderung bei vergleichenden Bewertungen besteht darin, dass sich oftmals die Datenqualität zwischen den untersuchten Systemen unterscheidet, da das Wissen über die zu vergleichenden Systeme unterschiedlich ist. In dieser Studie lag derselbe Detaillierungsgrad sowohl für das Schranken-System als auch das Free-Flow-System vor. Das bedeutet, dass die Datenunsicherheit aufgrund der Granularität der Daten beider Parkraumkonzeptvarianten ähnlich war und die Ergebnisse des Vergleichs dementsprechend robust sind.

In den folgenden Abschnitten wird eine qualitative Bewertung der Datenqualität vorgenommen. Dabei sind zwei Arten von Daten zu unterscheiden: 1. Vordergrunddaten (Primärdaten) und 2. Hintergrunddaten (Sekundärdaten). Die Qualität der Primärdaten hängt hauptsächlich davon ab, wie die Daten erhoben wurden. Im besten Fall sind die Daten verifiziert und stammen aus Messungen. Im schlechtesten Fall werden die Daten ohne jegliche Begründung geschätzt. Zu den relevanten Primärdaten zählen im konkreten Anwendungsfall der zu berücksichtigende Kraftstoffverbrauch/Energiebedarf der PKW, der Energiebedarf der berücksichtigten Parkrauminfrastruktur, sowie Daten zu den Herstellungs-, Distributions- und Verwertungsprozessen der Infrastrukturkomponenten und Verbrauchsmaterialien.

Berechnungsmodell Kraftstoffverbrauch/Energiebedarf

Wie in Kapitel 4 beschrieben, basiert die Modellierung der PKW-Fahrt im Ein- und Ausgangsbereich des Parkraums auf Hintergrunddatensätzen aus der Ecoinvent-Datenbank. In Abhängigkeit der spezifischen Fahrsituation wurde dabei der Kraftstoffverbrauch/Energiebedarf der Fahrzeuge angepasst. Die entsprechenden Daten zum Kraftstoffbedarf/Energiebedarf beruhen wiederum auf einem mathematischen Berechnungsmodell, dessen Parameter auf Basis von Literaturwerten, eigenen Messungen und Expertenschätzungen bestimmt wurden (siehe Tabelle 4, Tabelle 5 und Tabelle 6 im Anhang). Eine reale Messung des Kraftstoffverbrauchs/Energiebedarfs der PKW wurde nicht vorgenommen. Allgemein gilt, dass mögliche Vereinfachungen und Einschränkungen des Modells für beide

Alternativen gleichermaßen zutreffen und die Vergleichbarkeit somit nicht eingeschränkt wird.

Das Berechnungsmodell selbst basiert auf physikalischen Zusammenhängen und wurde in Anlehnung an die Veröffentlichungen von Breuer und Rohrbach-Kerl (2015), Schöffl (2015) sowie Lohse und Schnabel (2011) übernommen. Dallmeyer et al. (2012) legen in ihrer Studie zur Modellierung des Kraftstoffverbrauchs bei Fahrten im städtischen Umfeld ein identisches Modell zu Grunde. Auch Treiber et al. (2008) haben ein ähnliches Berechnungsmodell verwendet. Hier besteht der einzige Unterschied darin, dass zusätzliche Effekte durch die spezifische Gangwahl berücksichtigt wurden. Auch bei Ben-Chaim et al. (2013) lässt sich das in dieser Klimabilanzstudie verwendete Berechnungsmodell für den Kraftstoffverbrauch/Energiebedarf in unterschiedlichen Fahrsituation wiederfinden. Dabei berücksichtigen die Autoren zusätzlich die Abhängigkeit des Motorwirkungsgrades vom anliegenden Motordrehmoment und der Motordrehzahl. Auf der anderen Seite wird der Kraftstoffverbrauch/Energiebedarf im während der Haltephase in der benannten Studie vernachlässigt.

Das gewählte Berechnungsmodell stellt die realen Wirkmechanismen insgesamt vereinfacht dar, wird von den Autoren dieser Studie jedoch als ausreichend genau für das Ziel der Studie angesehen. Wie zuvor dargelegt, wird eine identische bzw. ähnliche Berechnungsgrundlage in verschiedenen anderen Studien breitflächig eingesetzt, um den Kraftstoffverbrauch/Energiebedarf von PKW in unterschiedlichen Fahrsituationen abschätzen zu können. Einschränkungen ergeben sich in dieser Klimabilanzstudie dabei durch die Annahme eines konstanten, durchschnittlichen »*Tank-to-Wheel*« Motorwirkungsgrads. Dieser beschreibt das Verhältnis von umgesetzter kinetischer Energie des Fahrzeugs zu chemischem Energiegehalt im Kraftstoff. Die Effizienz von Verbrennungsmotoren nimmt bei niedrigen Lastzuständen und Motordrehzahlen klassischerweise ab (Lohse und Schnabel 2011; Breuer und Rohrbach-Kerl 2015). Für eine Fahrt im Stop-and-Go-Verkehr kann somit angenommen werden, dass der reale Wirkungsgrad regelmäßig unter dem angesetzten Durchschnitt liegt. Durch das entsprechende Unterschätzen des Kraftstoffverbrauchs/Energiebedarfs in der Stausituation wird in Bezug auf diesen Zusammenhang auch der Vorteil des Free-Flow-Systems tendenziell unterschätzt (konservativer Ansatz).

Da die physikalischen Zusammenhänge bis heute gleichermaßen gelten, wird auch die Aktualität des gewählten Berechnungsmodells als ausreichend bewertet. Für die Parameter Motorwirkungsgrad, Energiedichte des Kraftstoffs, Rollwiderstandsbeiwert, Mindestleistungsbedarf und Masse des PKW wurden Daten aus den Jahren 2020 bis 2024 verwendet (siehe Tabelle 6 im Anhang). Hier werden die Aktualität und Repräsentativität der Daten als gut angesehen. In Bezug auf den angesetzten Mindestleistungsbedarf für PKW mit Verbrennungsmotor wurde auf Basis der von Lohse und Schnabel (2011) angegebenen Spannweite ein kleinerer Wert übernommen. Auch in Bezug auf elektrisch betriebene Fahrzeuge wurde auf Basis von Helms et al. (2022) nur der Mindestleistungsbedarf für den stationären Betrieb der elektrischen Nicht-Antriebs-Verbraucher angesetzt. Energiemengen für das einmalige Aufheizen des Fahrgastraums oder Temperieren des Akkus beim Fahrzeugstart (instationärer Betrieb) würden hier noch

dazu kommen (Helms et al. 2022). Für Elektrofahrzeuge erscheint der verwendete Mindestleistungsbedarf bspw. auch beim Vergleich mit den Werten von Schweizer et al. (2023) oder ADAC (2021) eher klein. Durch die verringerte Geschwindigkeit und längere Standzeiten würden sich höhere Werte für den Mindestleistungsbedarf insbesondere auf den Kraftstoffverbrauch/Energiebedarf in der Stausituation signifikant auswirken. Es ist somit davon auszugehen, dass ein gesteigerter Mindestleistungsbedarf somit den Vorteil des Free-Flow-Systems tendenziell erhöhen würde. Die Daten für die Stirnfläche der PKW stammen aus einer Veröffentlichung aus dem Jahr 2014. Auch wenn davon ausgegangen wird, dass sich die durchschnittliche Stirnfläche von PKW nicht signifikant geändert hat, ist an dieser Stelle die Aktualität der Daten eingeschränkt. Die Bestimmung der benannten Parameter erfolgte möglichst repräsentativ entsprechend der Einteilung in die Fahrzeugklassen klein, mittel und groß mit den entsprechenden Antriebskonzepten Benzin, Diesel und Elektro. Die berücksichtigte Verteilung der einzelnen Fahrzeugklassen basiert wiederum auf aktuellen Zahlen von Kraftfahrtbundesamt (2024) sowie Statista GmbH (2024a). Die Repräsentativität der Einteilung in Fahrzeugklassen wird somit als ausreichend für die Zielsetzung der Studie angenommen.

Berechnete Werte zum Kraftstoffverbrauch/Energiebedarf

Wie die Ergebnisse der Klimabilanzstudie zeigen, haben die mit dem Modell berechneten Kraftstoffverbräuche/Energiebedarfe einen wesentlichen Einfluss auf die Klimabilanz je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang. Ein Abgleich mit Referenzwerten aus der Literatur ist daher notwendig, um die Ergebnisrobustheit hier zu überprüfen.

Wie in Tabelle 2 dargestellt, liegen die für die Klimabilanzstudie berechneten Verbrauchswerte im Bereich zwischen 19,7 und 23,1 l/100 km bzw. 49,4 und 57,7 kWh/100 km für den Stop-and-Go-Verkehr (Durchschnittsgeschwindigkeit 2 km/h) sowie 6,3 und 10,0 l/100 km bzw. 12,6 und 17,3 kWh/100 km für die Fahrt mit konstanter, reduzierter Geschwindigkeit je nach Szenario (10 bzw. 15 km/h). Der Kraftstoffverbrauch der PKW erhöht sich durch die Stausituation entsprechend um 120 bis 131 % im Vergleich zu einer Konstantfahrt mit 10 km/h und um 214 bis 216 % im Vergleich zu einer Fahrt mit der konstanten Geschwindigkeit von 15 km/h. In Michelin (2022) wird für Stausituationen im städtischen Umfeld eine Steigerung des Kraftstoffverbrauchs von 175 % angegeben. Die im Rahmen der Klimabilanzstudie ermittelten Werte liegen im Vergleich zu dieser Angabe somit in einer realistischen Größenordnung.

Pelkmans et al. (2005) geben in ihrer Studie an, dass der Kraftstoffverbrauch bei Fahrzyklen bis zu einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 20 km/h zwischen 7,0 und 9,0 l/100 km liegt. Zudem wird deutlich, dass für niedrigere Geschwindigkeiten ein exponentieller Anstieg des Verbrauchs zu erwarten ist und bei einer Geschwindigkeit von 5 km/h bspw. im Bereich von 20 l/100 km liegt. Die Größenordnung der im Rahmen dieser Klimabilanzstudie berechneten Kraftstoffverbräuche in unterschiedlichen Geschwindigkeitsbereichen deckt sich folglich mit den Angaben aus der benannten Studie.

Auch Treiber et al. (2008) beschreiben ein starkes Ansteigen des Kraftstoffverbrauchs bei niedrigen Geschwindigkeiten. In einer Darstellung des Kraftstoffverbrauchs über die Geschwindigkeit ist zu erkennen, dass der Verbrauch für Geschwindigkeiten im Bereich von 10 km/h bei rund 15 bis 20 l/100 km liegt. Bei Geschwindigkeiten unter 5 km/h können sogar Verbräuche von 40 bis 60 l/100 km abhängig vom betrachteten Fahrzeug erreicht werden. Für einen vollständigen Fahrzyklus mit dichtem Verkehr haben die Autoren einen durchschnittlichen Gesamtverbrauch von 14,7 l/100 km berechnet. Dabei gilt zu berücksichtigen, dass im zugrunde liegenden Fahrzyklus teilweise Geschwindigkeiten von bis zu 54 km/h erreicht werden. Insgesamt erscheinen die in dieser Klimabilanzstudie angesetzten Werte für den Kraftstoffverbrauch im Vergleich zu dem Werten aus Treiber et al. (2008) eher konservativ. Unterschiede lassen sich möglicherweise durch die zeitliche Differenz zwischen den Studien erklären, wobei sich der technische Fortschritt bspw. in einer besseren Motoreffizienz widerspiegelt.

Li et al. (2014) konnten zeigen, dass es beim Anstieg von Verkehrsszillationen entlang von Fahrzeugen im dichten Verkehr zu einer Steigerung der Kraftstoffverbrauchsrate von 0,13 l/km auf 0,23 bis 0,26 l/km kommen kann. Im Vergleich dazu wurde auf Basis des verwendeten Berechnungsmodells im Rahmen der Klimabilanzstudie eine Änderung der Verbrauchsrate von rund 0,1 l/km (Konstantfahrt mit 10 km/h) auf 0,20 bis 0,23 l/km für den Stop-and-Go-Verkehr (Schranken-System) berechnet. Auch bei diesem Vergleich bewegen sich die angesetzten Werte in einer realistischen Größenordnung und erscheinen konsistent mit der Literatur.

Für eine Fahrt mit einer konstanten Geschwindigkeit von 10 km/h geben Srisakda et al. (2022) den durchschnittlichen Verbrauch konventioneller PKW mit 0,40 ml/s an. Für eine Konstantfahrt im Geschwindigkeitsbereich zwischen 10 und 20 km/h liegt der Verbrauch laut den Autoren bei rund 0,68 ml/s. Im Vergleich dazu wurden im Rahmen der Klimabilanzstudie Verbräuche von rund 0,28 l/s für eine konstante Fahrt mit 10 km/h berechnet, während für die Konstantfahrt mit 15 km/h 0,31 ml/s angesetzt wurden. Im Vergleich zu den Literaturwerten erscheinen die in der Klimabilanzstudie angesetzten Werte an dieser Stelle eher konservativ.

Bei Jereb et al. (2018) wird für eine Beschleunigung von 0 auf 50 km/h ($1,33 \text{ m/s}^2$) ein durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch von 0,22 ml/m für PKW angegeben. Die aus der Beschleunigung resultierenden Kraftstoffverbräuche liegen nach dem in der Klimabilanzstudie verwendeten Modell und den Modellparametern zwischen 0,29 ml/m und 0,39 ml/m. Trotz der niedrigeren Beschleunigung von $1,13 \text{ m/s}^2$ ergibt sich somit ein höherer Beschleunigungsverbrauch im Vergleich zu Jereb et al. (2018). Zu erklären ist dies durch den deutlich niedrigeren Geschwindigkeitsbereich im Stop-and-Go-Verkehr. Über das jeweilige Beschleunigungsintervall liegt die Durchschnittsgeschwindigkeit in der Klimabilanzstudie mit 4,05 km/h (Maximalgeschwindigkeit 8,10 km/h) deutlich unter der Durchschnittsgeschwindigkeit in der benannten Studie (25 km/h). Somit ist die je Meter durchschnittlich benötigte Zeit im vorliegenden Fall höher (0,88 s/m vs. 0,14 s/m). Folglich muss je zurückgelegtem Meter der Mindestleistungsbedarf,

welcher nicht vom zurückgelegten Weg abhängig ist, für eine längere Zeit gedeckt werden. Werden nun zur zusätzlichen Verifizierung die Parameter der Fahrsituation aus der benannten Studie (Beschleunigung über 72 m in 10,4 Sekunden) in das Berechnungsmodell der vorliegenden Klimabilanzstudie übertragen, so ergibt sich für die Beschleunigungsphase ein Verbrauch von 13,93 bis 26,29 l/100km bzw. 0,14 bis 0,26 ml/m. Diese Werte decken sich gut mit den Angaben aus der benannten Studie und unterstreichen die Korrektheit des verwendeten Modells. Auch Srisakda et al. (2022) geben den durchschnittlichen Kraftstoffverbrauch herkömmlicher PKW während der Beschleunigungsphase in unterschiedlichen Geschwindigkeitsbereichen an. Für Beschleunigungen bis 10 km/h liegt der Verbrauch dabei im Bereich von 1,95 ml/s. Für Beschleunigungen im Geschwindigkeitsbereich von 10 bis 20 km/h geben die Autoren einen Verbrauch von rund 1,24 ml/s an. Demgegenüber erscheinen die in der Klimabilanzstudie angesetzten Werte mit 0,32 bis 0,44 ml/s bei einer Beschleunigung von 0 auf 8,10 km/h erneut konservativ. Lohse und Schnabel (2011) geben den Zyklusmehrverbrauch von diesel- und benzinbetriebenen PKW durch einen einmaligen Halt und die anschließende Beschleunigung auf die ursprüngliche Geschwindigkeit gegenüber einer Fahrt mit entsprechend gleichbleibender Geschwindigkeit an. Nach den Angaben der Autoren würde sich durch das Abbremsen und anschließende Beschleunigen auf 8,1 km/h (Maximalgeschwindigkeit im Stop-and-Go-Verkehr beim Schranken-System) ein Zyklusmehrverbrauch von 1,7 ml für einen benzinbetriebenen PKW ergeben. Dabei ist unklar, ob hier die Haltephase selbst enthalten ist. Auf Basis der im Rahmen der Klimabilanzstudie berechneten und angesetzten Werte ergibt sich der entsprechende Zyklusmehrverbrauch für diese Situation zu 0,6 bis 0,8 ml (inklusive Haltevorgang). Bei diesem Vergleich erscheinen die in der Klimabilanzstudie herangezogenen Verbrauchswerte eher konservativ.

Saboohi et al. (2009) haben den Leerlaufverbrauch von PKW in der Haltephase untersucht. Für eine Leerlaufdrehzahl von 500 bis 700 1/min wird hier ein Kraftstoffverbrauch von 1,7 l/h angegeben, während der Verbrauch in einem Drehzahlbereich von 900 bis 1200 1/min bei 2,8 l/h liegt. Im Gegensatz dazu wurde im Rahmen der Klimabilanzstudie stets ein Leerlaufverbrauch von rund 0,8 l/h auf Basis von Lohse und Schnabel (2011) für alle Fahrzeugklassen angesetzt. Srisakda et al. (2022) geben den Leerlaufverbrauch bei PKW mit durchschnittlich 0,9 l/h an, während bei Michelin (2022) ein Wert von 0,8 l/h genannt wird. Bei Matsuura et al. (2004) wird ein Leerlaufverbrauch von 0,17 bis 0,18 ml/s bzw. 0,62 bis 0,64 l/h angegeben. Eine Steigerung des Verbrauchs über die letzten Jahre könnte bspw. durch den gesteigerten Energiebedarf der elektrischen Nicht-Antriebs-Verbraucher erklärt werden (bspw. Infotainment, Klimatisierung etc.). Der ADAC nennt für den Kraftstoffverbrauch im Stand einen Bereich von 0,5 bis 1,0 l/h (ADAC 2023b). Im Vergleich zu den Literaturwerten liegt der in der Klimabilanzstudie angesetzte Verbrauch in der Haltephase somit insgesamt eher im unteren Bereich, was einem konservativen Ansatz entspricht. Zusätzlich wurde in der Klimabilanzstudie anteilig die Verwendung einer Start-Stopp-Automatik berücksichtigt, was den Kraftstoffverbrauch in dieser Phase rechnerisch weiter reduziert. Hierbei wurde angenommen, dass im Falle einer Start-Stopp-Automatik kein Kraftstoff während der Haltephase verbraucht wird. Wie jedoch

bspw. Matsuura et al. (2004) zeigen, wird auch beim erneuten Starten des Motors zusätzlich Kraftstoff verbraucht, sodass ein Abschalten des Motors erst ab einer Haltezeit von mindestens 7 Sekunden sinnvoll sei. Auch in Bezug auf diesen Zusammenhang ist der verwendete Berechnungsansatz in der Klimabilanzstudie eher konservativ und unterschätzt den Kraftstoffverbrauch im Stop-and-Go-Verkehr tendenziell.

In Abhängigkeit des Modells geben van Gijlswijk et al. (2020) für Elektrofahrzeuge einen durchschnittlichen Energiebedarf von 16,2 bis 29 kWh/100 km an. Bei dieser Angabe handelt es sich um den tatsächlichen empirisch ermittelten Durchschnitt für den Energiebedarf eines Fahrzeugmodells zwischen unterschiedlichen Ladevorgängen. Entsprechend wird hier keine spezifische Fahrsituation abgebildet, sondern ein Durchschnitt über alle im Betrachtungszeitraum durchgeführten Fahrten ermittelt. Hier können bspw. auch Autobahnfahrten enthalten sein. Ein Vergleich mit den in der Klimabilanzstudie berechneten Energiebedarfen ist aus diesem Grund nur bedingt möglich. Im Falle des Schranken-Systems (Stop-and-Go-Verkehr) liegt der abgesetzte Energiebedarf deutlich über den Literaturwerten, während der Energiebedarf beim Free-Flow-System (Konstantfahrt) unter dem angegebenen Durchschnitt liegt. Generell sind diese Abweichungen nach oben und unten durch die spezifische Verkehrssituation zu erklären. Aufgrund der Abbrems- und Anfahrvorgänge erhöht sich der Energiebedarf der Elektrofahrzeuge im Stop-and-Go-Verkehr, während bei einer gleichmäßigen Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit der Energiebedarf minimiert werden kann. Auf Basis der Literaturwerte schätzt das Projektteam die im Rahmen der Klimabilanzstudie angesetzten Werte für den Energiebedarf von Elektrofahrzeugen in unterschiedlichen Fahrsituationen als realistisch ein. Eine abschließende Bewertung der Repräsentativität kann an dieser Stelle nicht erfolgen.

Nicht zuletzt können neben den Angaben zum Kraftstoffverbrauch/Energiebedarf in den unterschiedlichen Verkehrssituationen selbst auch Angaben zu den daraus resultierenden Treibhausgasemissionen zur Verifizierung herangezogen werden. Bspw. geben Barth und Boriboonsomsin (2009) die durchschnittlichen direkten Treibhausgasemissionen von PKW in Abhängigkeit der Durchschnittsgeschwindigkeit einer PKW-Fahrt an. Für Fahrten im Bereich von 5 km/h liegen die direkten Emissionen dabei je Kilometer im Bereich von 680 g CO₂-Äquivalenten/km. Für den Stop-and-Go-Verkehr beim Schranken-System (bzw. für das wiederholte Durchfahren des Intervalls aus Abbremsen, Halten, Beschleunigen) ergeben sich im Rahmen der Klimabilanzstudie für die Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor insgesamt Emissionen von rund 535 g CO₂-Äquivalenten/km (Durchschnittsgeschwindigkeit 2 km/h). Auch bei Schmaus et al. (2023) werden Angaben zu den direkten Treibhausgasemissionen von PKW in Stausituationen gemacht. Für extreme Stausituationen geben die Autoren dabei einen Bereich von rund 428 bis 501 g CO₂-Äquivalente/km an. Im dabei zugrunde liegenden Fahrzyklus sind die Geschwindigkeiten überwiegend unter 10 km/h. Vereinzelt werden jedoch auch höhere Werte zwischen 20 und 50 km/h erreicht. Die Durchschnittsgeschwindigkeit liegt bei diesem Fahrzyklus bei 4,5 km/h. Für den im Rahmen der Klimabilanzstudie berücksichtigten Stop-and-Go-Verkehr (Schranken-System) sind die Geschwindigkeiten stets unter 8,1

km/h und die Durchschnittsgeschwindigkeit liegt bei 2 km/h. Es ist somit zu erwarten, dass die aus der Stausituation bzw. aus dem beim Schrankensystem angesetzten Intervall aus Abbremsen, Halten und Beschleunigen resultierenden Emissionen in der Klimabilanzstudie etwas höher ausfallen als bei Schmaus et al. (2023). Grund dafür sind die niedrigere Durchschnittsgeschwindigkeit mit häufigeren Beschleunigungsvorgängen und längeren Haltephasen. Dennoch bewegen sich die berechneten direkten Treibhausgasemissionen in einem sehr ähnlichen Bereich wie in der benannten Literatur und erscheinen unter Berücksichtigung der spezifischen Situation sogar eher konservativ.

Insgesamt zeigt der Vergleich des berechneten Kraftstoffverbrauchs/Energiebedarfs der PKW bzw. der daraus resultierenden Treibhausgasemissionen eine gute Konsistenz mit den Referenzwerten aus der Literatur. Teilweise erscheinen die hier angesetzten Werte sogar eher konservativ, was eine Unterschätzung der Bedeutung des Kraftstoffverbrauchs/Energiebedarfs und somit des Vorteils für das Free-Flow-System zur Folge hätte. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass Abweichungen insbesondere auf Unterschiede in den spezifischen Testbedingungen sowie auf die getroffenen Annahmen zurückgeführt werden können. Die Ergebnisse in Bezug auf die PKW-Fahrt im Ein- und Ausgangsbereich werden entsprechend als ausreichend robust gewertet.

Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass der Kraftstoffverbrauch/Energiebedarf der Fahrzeuge in einer Stausituation vom individuellen Anfahr- und Abbremsverhalten abhängt. Während das Fahrverhalten in der Realität stark variiert, wurde im Rahmen der Klimabilanzstudie ein auf Schätzungen und eigenen Messungen basierendes, durchschnittliches Fahrverhalten angesetzt. Aus Sicht des Projektteams bildet dieses weder besonders hohe noch besonders niedrige Beschleunigungen ab. Dennoch gilt an dieser Stelle zu berücksichtigen, dass die Repräsentativität der angesetzten Daten ggf. eingeschränkt ist. In zukünftigen Studien sollte das durchschnittliche Fahrverhalten in Stausituationen durch weitere Messungen untersucht und validiert werden. In Bezug auf das Verkehrsaufkommen, wurden auf Basis von Expertenschätzungen verschiedene Szenarien untersucht. Die Szenarien bilden entsprechend der Einschätzung von Experten der fair parken GmbH realistische Situationen ab. Dennoch gilt zu berücksichtigen, dass hier keine empirisch ermittelten Daten zugrunde liegen und die Repräsentativität eingeschränkt ist. Im Zweifelsfall sollten stets die Ergebnisse des konservativen »Basis«-Szenarios als untere Grenze herangezogen werden.

Finanztransaktion

Die aus der Finanztransaktion resultierenden Treibhausgasemissionen leisten insbesondere beim »Basis«-Szenario und beim »Dichter-Verkehr«-Szenario einen wesentlichen Beitrag zum Gesamtergebnis. Die entsprechenden Werte zu den Treibhausgasemissionen je Transaktion wurden sowohl für die digitale Kartenzahlung als auch die Zahlung mit Bargeld aus der Studie von Girard und Neunhoff (2024) übernommen. An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass auch die benannte Studie verschiedene Unsicherheiten aufweist, welche sich entsprechend auf die Ergebnisse dieser Klimabilanzstudie übertragen. Insbesondere die

Annahmen zu PKW-Fahrten zum Zwecke der Bargeldabhebung haben einen signifikanten Ergebniseinfluss und werden im Rahmen der benannten Studie als unsicher eingestuft. Weiterhin muss beachtet werden, dass die benannte Studie durch eine Interessensvereinigung für bargeldloses Zahlen beauftragt wurde. Da es sich hierbei dennoch um eine aktuelle und unabhängig geprüfte Studie handelt, werden die übernommen Werte für die Zielsetzung dieser Klimabilanzstudie als ausreichend robust eingestuft.

Weitere Einschränkungen ergeben sich im Hinblick auf die Einteilung von Treibhausgasemissionen nach den von der ISO 14067 vorgegeben Kategorien. Da in der benannten Studie die Ergebnisse nicht in dem geforderten Detaillierungsgrad vorliegen und ebenfalls nicht nachträglich bereitgestellt werden können, wurden im Rahmen der Klimabilanzstudie konservativ Emissionen aus fossilen Rohstoffen angenommen. Da die Finanztransaktion insbesondere bei den Szenarien mit geringem Verkehrsaufkommen einen großen Anteil an der Klimawirkung je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang ausmacht, ergeben sich an diesen Stellen Unsicherheiten im Hinblick auf die Kategorisierung der gesamten Treibhausgasemissionen. Für das Endergebnis der Studie sowie die abgeleiteten Kernaussagen und Schlussfolgerungen haben diese Unsicherheiten allerdings keine Relevanz.

Parkrauminfrastruktur

Zur Modellierung der Herstellung, Distribution, Installation und Verwertung der Komponenten der Parkrauminfrastruktur sowie Abschätzung deren Lebensdauer wurden im wesentlichen technische Datenblätter und Herstellerangaben (Literatur, Internet) aus den Jahren 2010 bis 2025 herangezogen. An einigen Stellen wurden diese durch Annahmen und Expertenschätzungen ergänzt. Die Aktualität und Repräsentativität der Daten ist somit bei einzelnen Komponenten eingeschränkt. Weiterhin wurden Hintergrunddatensätze aus der Ecoinvent-Datenbank insbesondere dazu verwendet die Bereitstellung der Vorprodukte, Hilfsstoffe und Energie im Herstellungsprozess zu modellieren sowie die Emissionen aus Transporten, Installation und Verwertung am Ende des Lebenszyklus.

Zur Ermittlung des Energiebedarfs der Komponenten während der Nutzung standen für das System zur Kennzeichenerfassung sowie für die Kassenautomaten Primärdaten der fair parken GmbH zur Verfügung. Hier werden die Aktualität und Repräsentativität als hoch eingestuft. Für den Energiebedarf der Signalanlage, des Serversystems sowie der Schrankenanlage wurden Literaturwerte bzw. Herstellerangaben aus den Jahren 2018 bis 2025 verwendet. Insbesondere im Falle des Serversystems weist der angesetzte Energiebedarf für Datenübertragung und -verarbeitung Unsicherheiten auf, da dieser auf Schätzungen hinsichtlich der übertragenen und verarbeiteten Datenmengen beruht. Lediglich für die Größe der beim Free-Flow-System übertragenen Bilddateien lagen Primärdaten der fair parken GmbH vor.

Da sowohl die Herstellung, Distribution, Installation und Verwertung der Parkrauminfrastrukturkomponenten als auch deren Energiebedarf insgesamt einen

eher kleinen Ergebniseinfluss haben, wird die Datenqualität trotz der zuvor beschriebenen Einschränkungen insgesamt als ausreichend für die Zielstellung der Studie eingestuft. Details zu den angesetzten Daten können der Tabelle 7 bis Tabelle 17 im Anhang entnommen werden.

Verbrauchsmaterialien

Zu den im Rahmen der Klimabilanzstudie berücksichtigten Verbrauchsmaterialien zählen zum einen das Parkticket (nur beim Schranken-System relevant) sowie die Zahlungsquittung. Die Modellierung des Herstellungsprozesses basiert dabei in beiden Fällen auf Eckardt et al. (2020), wobei eigene Messungen zur Bestimmung der jeweiligen Gesamtmasse durchgeführt wurden. Die verwendeten Daten im Vordergrundsystem werden dabei als ausreichend repräsentativ und aktuell eingestuft. Die Bereitstellung der Vorprodukte sowie Transporte, und die Verwertung nach der Nutzung wurden auch hier mit Hilfe der Ecoinvent-Datenbank modelliert. Dabei wird die Herstellung von Farbentwicklern und Sensibilisatoren durch die Hintergrunddatensätze lediglich vereinfacht abgebildet. Nach Einschätzung der Autoren dieser Studie ist jedoch eine ausreichende Repräsentativität für die Zielsetzung der Studie gegeben.

Weitere Daten

Für die Durchführung der nachträglichen Onlinezahlung beim Free-Flow-System wurde die Nutzung eines Smartphones angenommen. Der entsprechende Zuweisungsfaktor je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang wurde auf Basis der Lebensdauer sowie der Bediendauer für die Onlinezahlung ermittelt. Während die Bediendauer empirisch von der fair parken GmbH ermittelt wurde, basiert die angesetzte Lebensdauer von 2 Jahren auf Literatur aus den Jahren 2013 und 2023. Die Modellierung der Herstellung, Distribution und Verwertung des Smartphones wurde erneut mit Hintergrunddatensätzen aus der Ecoinvent-Datenbank umgesetzt. Während der Energiebedarf im Hintergrund für den Aufruf der Website und die zugehörige Datenübertragung bereits im Zusammenhang mit dem Serversystem berücksichtigt wurde, basiert der angesetzte Energiebedarf für die Bedienung des Smartphones selbst auf Wholegrain Digital Scamper Ltd (2024a) und Wholegrain Digital Scamper Ltd (2024b). Da auch hier der Ergebniseinfluss sehr gering ausfällt, wird die Repräsentativität und Aktualität der Daten als ausreichend eingestuft.

Für die Abwicklung einer möglichen Vertragsstrafe beim Free-Flow-System wurde zum einen der Aufwand für die Halterermittlung beim Kraftfahrtbundesamt abgeschätzt sowie die Herstellung und Zustellung des zugehörigen Briefs über die Vertragsstrafe. Während für die übertragenen Datenmengen Primärdaten der fair parken GmbH vorlagen, wurden für die Dauer der Halterermittlung sowie die Zustellentfernung Annahmen getroffen. An dieser Stelle ist somit die Repräsentativität der angesetzten Daten eingeschränkt. Auf der anderen Seite wurden zur Modellierung der Herstellung und Verwertung des Briefs sowie dessen Zustellung Hintergrunddatensätze aus der Ecoinvent-Datenbank verwendet. Da der Einfluss dieses Teilsystems auf die Klimawirkung je Bewirtschaftungs- und

Abrechnungsvorgang beim Free-Flow-System ebenfalls eher gering ist, werden die an dieser Stelle resultierenden Unsicherheiten als vernachlässigbar eingestuft.

Insgesamt wird die Datenqualität im Vordergrundsystem trotz einiger oben skizzierter Einschränkungen in Bezug auf die technische, zeitliche und geografische Repräsentativität als ausreichend gut sowie gleich zwischen beiden Systemen bewertet und somit als passend eingestuft. Aufgrund des großen Ergebniseinflusses sollten zukünftig insbesondere empirische Daten zur Staubbildung bei beiden Parkraumbewirtschaftungskonzepten sowie dem zugehörigen Kraftstoffverbrauch/Energiebedarf der PKW ermittelt und mit den in dieser Studie angesetzten Daten verglichen werden.

Hintergrunddatensätze der Ecoinvent-Datenbank

Die zur Modellierung des Hintergrundsystems verwendeten Datensätze aus der Ökobilanzdatenbank »ecoinvent 3.10, allocation, cut-off by classification« weisen in Bezug auf die Vollständigkeit, Aktualität und Datenqualität Unterschiede und teilweise Einschränkungen auf. In Bezug auf die in dieser Studie untersuchte Klimawirkung, gelten die Ecoinvent-Datensätze dabei als vergleichsweise vollständig und robust. Die vergleichenden Aussagen zu beiden Parkraumbewirtschaftungskonzepten werden hierdurch ohnehin nur geringfügig beeinflusst, da bei der Modellierung beider Alternativen, soweit möglich, die gleichen Datensätze verwendet wurden.

Insbesondere die verwendeten Datensätze zur Modellierung der mit der Bereitstellung und Verbrennung von Kraftstoff verbundenen Treibhausgasemissionen haben einen signifikanten Ergebniseinfluss. Hier ist die Passfähigkeit somit von besonderer Bedeutung. Die entsprechenden Datensätze wurden bereits in Tabelle 1 aufgelistet. In der Datenbank werden neben den beiden Kraftstoffarten Benzin und Diesel drei Größenklassen und die drei Abgasnormen EURO 3, EURO 4 und EURO 5 unterschieden, sodass eine spezifische Auswahl der technisch, geografisch und zeitlich repräsentativsten Datensätze erfolgen konnte. Um die Emissionen aus der Verbrennung von Kraftstoff nicht zu überschätzen, wurden im Rahmen der Studie konservativ nur die Datensätze für die Abgasnorm EURO 5 verwendet. Die in den Datensätzen hinterlegten Daten zu Emissionen stammen dabei aus dem Jahr 2012 und weisen somit eine eingeschränkte Aktualität auf. Da jedoch auch Anfang 2024 weiterhin mehr als die Hälfte aller in Deutschland angemeldeten Fahrzeuge nur die Abgasnorm EURO 5 oder schlechter erfüllt (Kraftfahrtbundesamt 2024), sind die zugrundeliegenden Daten zu Treibhausgasemissionen aus Sicht der Autoren dieser Studie ausreichend repräsentativ.

Darüber hinaus wird für das Laden der Elektro-PKW sowie den Betrieb der berücksichtigten Parkrauminfrastrukturelemente elektrische Energie aus dem deutschen Strommix benötigt. Dieser verändert sich durch die Umstellung von fossilen auf erneuerbare Energieträger fortlaufend. Der hierfür verwendete Datensatz aus der Ecoinvent-Datenbank spiegelt die Situation in Deutschland für das Jahr 2020 wider. Dieser zeitliche Unterschied von 4 Jahren zum Jahr der Studie könnte die Studienergebnisse beeinflussen. Letztlich betrifft diese Einschränkung

jedoch auch hier beide Alternativen gleichermaßen (Schranken-System und Free-Flow-System), so dass ein Vergleich weiterhin robust ist.

Die im Zusammenhang mit der Herstellung, Distribution, Installation und Entsorgung bzw. Verwertung der Infrastrukturkomponenten und Verbrauchsmaterialien verwendeten Ecoinvent-Datensätze sind in Tabelle 1 sowie Tabelle 7 bis Tabelle 21 im Anhang dokumentiert. Die Datensätze wurden stets in Abhängigkeit ihrer geografischen Repräsentativität ausgewählt. An einigen Stellen ist diese jedoch aufgrund der in den Datensätzen abgebildeten generischen Marktmixe eingeschränkt. Aufgrund des eher geringen Ergebniseinflusses von Infrastruktur und Verbrauchsmaterialien, wird auch hier die durch die verwendeten Datensätze induzierte Unsicherheit als vernachlässigbar eingestuft.

Weitere Limitationen

Neben der zuvor skizzierten Datenbasis gehen das Studiendesign, der gewählte Untersuchungsrahmen, das methodische Vorgehen und folglich auch die Ergebnisse der Klimabilanzstudie mit einigen Limitationen einher, welche es bei der Interpretation und Kommunikation der Studienergebnisse zu beachten gilt. Diese Limitationen werden im Folgenden zusammengefasst.

Gemäß der Zielstellung der Studie wird ausschließlich die potenzielle Klimawirkung je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang betrachtet. Daher können keine Aussagen über allgemeine ökologische Vorteile bzw. Nachteile der verschiedenen Parkraumbewirtschaftungskonzepte gemacht werden. Es ist denkbar in Zukunft weitere Umweltwirkungskategorien zu bewerten, sofern die Datengrundlage dies erlaubt. An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Europäische Kommission die Klimawirkung aktuell als die relevanteste Umweltwirkung einstuft (Sala et al. 2018).

Im Anschluss an die Studie wurde in Anlehnung an die in ISO 14040 und ISO 14044 eine kritische Prüfung durch einen unabhängigen Sachverständigen beauftragt und durchgeführt. Diese befasst sich mit der Passfähigkeit von Ziel und Umfang der Studie, den methodischen Rahmenbedingungen, der Bewertung von Umweltwirkungen sowie der Interpretation der Ergebnisse. Die Durchführung einer kritischen Prüfung durch einen unabhängigen Sachverständigen dient allgemein dazu die Verlässlichkeit und Glaubwürdigkeit einer LCA-Studie bzw. Klimabilanzstudie zu steigern. In diesem Zusammenhang wird darauf hingewiesen, dass die ISO 14044 für vergleichende Ökobilanzstudien (und Klimabilanzstudien) eine kritische Prüfung durch einen Ausschuss von interessierten Kreisen vorsieht. An dieser Stelle weist die vorliegende Studie entsprechend eine Einschränkung gegenüber den benannten Normen auf. In diesem Zusammenhang wird angemerkt, dass die Untersuchung dazu diente, die unternehmensinterne Ausrichtung der fair parken GmbH auf das Free-Flow-System als Bestandteil der Parkraumbewirtschaftung hinsichtlich seiner möglichen Klimavorteile zu untersuchen. Der Vergleich der Klimabilanzstudie wurde dazu auf einem generischen Level durchgeführt. Ein Vergleich mit der konkreten Lösung eines anderen Marktteilnehmers war nicht Ziel oder Gegenstand der Klimabilanzstudie. Zudem

würde der Aufwand für eine kritische Prüfung durch einen Ausschuss interessierter Kreise vermutlich unverhältnismäßig gegenüber dem Untersuchungsumfang der initialen Studie sein. Aus den genannten Gründen sehen wir abweichend von der benannten ISO-Norm eine Einzelprüfung durch einen unabhängigen Sachverständigen als ausreichend an.

Weiterhin wurde der Vergleich der Klimawirkung für einen fiktiven, aber repräsentativen Parkraum durchgeführt. Die spezifische Auslegung eines Parkraums variiert in der Realität und ist insbesondere von der geplanten Stellplatzkapazität sowie der erwarteten Auslastung abhängig. Für eine höhere Kapazität könnten bspw. mehrere Zu- und Ausfahrten vorgesehen werden. Auch die Anzahl an aufgestellten Kassenautomaten wird in Abhängigkeit der genannten Faktoren festgelegt. In Bezug auf den Vergleich der Klimawirkung würde sich durch eine höhere Anzahl von Zu- und Ausfahrten bzw. Kassenautomaten der Beitrag Infrastrukturkomponenten sowie deren Energiebedarf zu den Treibhausgasemissionen je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang erhöhen. Da die Parkrauminfrastruktur jedoch nur einen geringen Einfluss auf das Ergebnis hat, ist davon auszugehen, dass sich die herausgearbeiteten Kernaussagen problemlos auf Parkräume mit abweichenden Dimensionen übertragen lassen.

In Bezug auf das Verkehrsaufkommen wurden unterschiedliche Szenarien ausgewertet. Dabei wurde der Einfluss des Parkraumbewirtschaftungskonzepts auf den Verkehrsfluss sowie der daraus resultierende Effekt auf den Kraftstoffverbrauch/Energiebedarf der PKW abgeschätzt. Eine Staubildung bspw. durch Parksuchverkehr oder durch die verkehrstechnische Anbindung des Parkraums (Ausfahrt direkt auf Hauptverkehrsstraße) ist nicht mit der Wahl des Bewirtschaftungskonzepts in Zusammenhang zu bringen und bleibt für den Vergleich folglich unberücksichtigt. Dennoch sei an dieser Stelle angemerkt, dass eine Vielzahl weiterer Faktoren den Verkehrsfluss auf Parkräumen beeinflussen kann. Meist entstehen dabei dynamische Wechselwirkungen zwischen diesen Faktoren, so dass keine isolierte Betrachtung des Verkehrseinflusses eines gewählten Bewirtschaftungskonzepts mehr möglich ist. Eine Simulation der Staubildung auf und vor Parkräumen wurde nicht durchgeführt und war nicht Gegenstand der vorliegenden Studie. Insbesondere im Hinblick auf das »Dichter-Verkehr«-Szenario sowie das »Großveranstaltung«-Szenario kann die Repräsentativität der Ergebnisse dadurch eingeschränkt sein. Das »Basis«-Szenario bleibt davon eher unberührt und stellt aus diesem Grund eine robuste untere Grenze in der Bewertung dar. Aufgrund des starken Ergebniseinflusses des Kraftstoffverbrauchs/Energiebedarfs der Fahrzeuge sollten die Annahmen dieser Studie dennoch für beide Parkraumbewirtschaftungskonzepte durch reale Messungen oder dynamische Simulationen überprüft und validiert werden. Im Rahmen solcher Messungen bzw. Simulationen können zudem die Wechselwirkungen unterschiedlicher Einflussfaktoren auf die Staubildung bei beiden Alternativen untersucht werden.

Es gilt weiterhin zu beachten, dass eine optimierte Parkraumgestaltung mit reduzierter Staubildung und einer erhöhten Kundenzufriedenheit die Häufigkeit der Parkraumnutzung bzw. die Nutzung von PKWs allgemein erhöhen könnte. Eine Analyse von solchen indirekten Rebound-Effekten durch eine mögliche

Nachfrageänderung wurde im Rahmen dieser Klimabilanzstudie nicht umgesetzt, da eine entsprechend komplexe Untersuchung den Umfang der Studie deutlich erweitert hätte. Dennoch wird angemerkt, dass eine erhöhte PKW-Nutzung den Vorteil des Free-Flow-Systems in Bezug auf die Klimawirkung reduzieren und ggf. sogar aufheben kann. Allerdings wäre es aus gesellschaftspolitischer Sicht und im Sinne der Akzeptanz von Umweltschutz sinnvoller das Verkehrsaufkommen nicht durch Behinderung des Verkehrsflusses, sondern durch andere Maßnahmen, die weniger indirekt wirken, zu regulieren. Gleichwohl sollten zukünftige Studien den Einfluss solcher indirekter Rebound-Effekte durch das verbesserte Kundenerlebnis auf Basis der Ergebnisse dieser Klimabilanzstudie untersuchen.

Die Einteilung der Fahrzeugflotte in drei Größenklassen und drei Antriebskonzepte stellt eine weitere Vereinfachung dar. Auf Basis einer detaillierteren Einteilung in der Literatur wurde die Zuordnung zu den benannten Fahrzeugklassen vom Projektteam abgeschätzt. Die Berechnungen zeigen, dass der Einfluss der Fahrzeuggrößenklassen für niedrige Geschwindigkeiten (Stausituation) weniger relevant ist. Es ist somit davon auszugehen, dass der durch die Vereinfachung bedingte Fehler vernachlässigt werden kann.

Auch mögliche Effekte der Kaltstartphase wurden im Rahmen der vorliegenden Studie zur Vereinfachung nicht adressiert. Durch einen ineffizienten Verbrennungsvorgang ist der Kraftstoffverbrauch in der Kaltstartphase üblicherweise erhöht. Da im Fall einer Stausituation die Dauer dieser Phase erhöht wird, ist davon auszugehen, dass eine zusätzliche Berücksichtigung den Vorteil des Free-Flow-Systems in Bezug auf die Klimawirkung steigern würde.

7 Fazit und Empfehlungen

Die durchgeführte Klimabilanzstudie zeigt für das Free-Flow-Parkraumbewirtschaftungskonzept Vorteile gegenüber dem konventionellen Schranken-System in Bezug auf die potenzielle Klimawirkung je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang. Die Hauptvorteile ergeben sich aus dem verbesserten Verkehrsfluss im Ein- und Ausfahrtbereich des Parkraums durch den Wegfall der Schranke und dem damit einhergehenden reduzierten Kraftstoffverbrauch/Energiebedarf der Fahrzeuge. Neben der PKW-Fahrt im Ein- und Ausfahrtbereich leistet die Finanztransaktion insbesondere bei niedrigem Verkehrsaufkommen einen relevanten Beitrag zur Klimawirkung. Die anteilig berücksichtigte Herstellung, Distribution, Installation und Verwertung der relevanten Infrastrukturkomponenten des Bewirtschaftungskonzepts sowie deren Energiebedarf während der Nutzung fallen weniger ins Gewicht. Auch die verwendeten Verbrauchsmaterialien, wie bspw. Parktickets, haben einen kleineren Anteil am Gesamtergebnis. Im »Basis«-Szenario weist das Free-Flow-System ein Einsparpotenzial von 7,8 g CO₂-Äquivalenten je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang auf. Bei den Szenarien mit höherem Verkehrsaufkommen und längeren Rückstaus beim Schranken-System steigt die Einsparung auf 28,2 g CO₂-Äquivalente (»Dichter-Verkehr«-Szenario) und im Extremfall auf bis zu 0,9 kg CO₂-Äquivalente je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang (»Großveranstaltung«-Szenario). Da auch insbesondere die Finanztransaktionen mit Bargeld einen hohen Beitrag zur Klimabilanz eines Bewirtschaftungskonzepts leisten, kann die Erhöhung des Anteils digitaler Zahlungen mit Karte die Treibhausgasemissionen in beiden Systemen senken. Wie das »Digitale-Zahlung«-Szenario zeigt, weist das Free-Flow-System auch im Falle von ausschließlich digitalen Zahlungen eine niedrigere potenzielle Klimabilanz auf. Das relative Einsparpotenzial des Free-Flow-Systems gegenüber dem konventionellen Schranken-System liegt je nach betrachtetem Szenario dabei zwischen 31 % im »Basis«-Szenario und 60 % »Großveranstaltung«-Szenario. Da letzteres eher eine Ausnahmesituation abbildet, werden entsprechend hohe Einsparungen in der Praxis vermutlich eher selten erzielt.

Eine quantitative Einordnung der Bedeutung von Treibhausgaseinsparungen aus der optimalen Wahl des Bewirtschaftungskonzepts in Bezug auf die Klimabilanz eines gesamten Parkvorgangs konnte im Rahmen der Studie nicht vorgenommen werden. Dennoch lässt sich schlussfolgern, dass die Bedeutung des Parkraumbewirtschaftungskonzepts für die Klimabilanz beim Parken mit steigender Größe und Auslastung des Parkraums sinkt. Grund hierfür sind die größeren Distanzen, welche auf dem Parkraum zurückgelegt werden müssen (bspw. Parksuchverkehr), sowie ggf. zusätzlicher Stop-and-Go-Verkehr während der Parkplatzsuche bei hoher Auslastung. Das weitere Einsparpotenzial einer Umstellung beschränkter Parkflächen auf Free-Flow-Parkflächen in Deutschland lässt sich nur grob schätzen. Erste Abschätzungen auf Basis der Ergebnisse dieser Klimabilanzstudie weisen jedoch auf eine eher kleinere Bedeutung des Einsparpotenzials im Vergleich zu den gesamten Treibhausgasemissionen des deutschen Verkehrssektors hin. Um einen signifikanten Beitrag zum Erreichen von Klimazielen im Verkehrssektor zu erreichen, sind somit weitere Maßnahmen zur Emissionsreduktion notwendig. Das Free-Flow-Bewirtschaftungskonzept könnte dabei als Beispiel für

weitere Maßnahmen zur Optimierung des Verkehrsflusses dienen, welche dann gemeinsam durchaus einen relevanten Umfang erreichen könnten. Dabei sollten allerdings gleichzeitig Strategien zur Vermeidung von Rebound-Effekten entwickelt werden.

In Bezug auf die Belastbarkeit der Ergebnisse müssen einige Limitationen der Studie beachtet werden. Insbesondere ist hier die fehlende empirische Fundierung der Staubildung auf und vor Parkräumen in den Szenarien mit erhöhtem Verkehrsaufkommen zu nennen. Das »Basis«-Szenario ist davon weniger betroffen und bietet aus diesem Grund eine robuste untere Grenze in der Bewertung, Dies sollte insbesondere bei einer Kommunikation der Ergebnisse berücksichtigt werden. Auch die Beschränkung auf die Umweltwirkungskategorie Klimawandel sowie die Vernachlässigung von möglichen negativen sowie positiven Rebound-Effekten seien an dieser Stelle angemerkt.

Empfehlungen:

1. **Implementierung und Ausbau des Free-Flow-Systems:** Aufgrund der potenziellen Klimavorteile sollte die Implementierung des Free-Flow-Bewirtschaftungskonzepts in bestehenden und neuen Parkräumen weiter vorangetrieben werden.
2. **Zusätzliche Verkehrsflussoptimierung:** Um das Potenzial des Free-Flow-Konzepts weiter zu maximieren, sollten zusätzliche Maßnahmen zur Verkehrsflussoptimierung in Betracht gezogen werden, wie die Integration von Verkehrsleitsystemen oder eine optimierte verkehrstechnische Anbindung der Parkräume.
3. **Untersuchung von indirekten Rebound-Effekten:** Mögliche Auswirkung einer Umstellung von Parkraumbewirtschaftungskonzepten auf die Häufigkeit der Parkraumnutzung wurden im Rahmen dieser Studie nicht untersucht. Eine gesteigerte Nutzerfreundlichkeit könnte jedoch eine Steigerung der Nachfrage und entsprechend eine Steigerung verkehrsbedingter Treibhausgasemissionen zur Folge haben. Dies könnte den potenziellen Vorteil des Free-Flow-Systems in Bezug auf die Klimawirkung reduzieren oder aufheben. Aus diesem Grund wird empfohlen solche indirekten Effekte auf Basis der Ergebnisse dieser Studie in zukünftigen Untersuchungen zu analysieren.
4. **Einfluss auf den Verkehrsfluss:** Aufgrund des hohen Ergebniseinflusses sollten zukünftige Studien weiterhin die dynamische Staubildung sowohl bei Schranken-Systemen als auch bei Free-Flow-Systemen unter Berücksichtigung der verschiedenen Einflussfaktoren und deren Wechselwirkung im Detail untersuchen. Hier kommen Nutzerbefragungen, Messungen vor Ort sowie Simulationen in Frage.
5. **Erweiterung der Bewertung:** Zukünftige Studien sollten auch andere Umweltwirkungskategorien wie bspw. die Feinstaubbildung einbeziehen, um ein umfassenderes Bild der ökologischen Wirkung zu erhalten.

6. **Berücksichtigung sozialer und wirtschaftlicher Faktoren:** Neben ökologischen Aspekten sollten auch Nutzerfreundlichkeit und wirtschaftliche Auswirkungen bei der Bewertung von Parkraumbewirtschaftungskonzepten einbezogen werden, um eine ausgewogene Entscheidungsgrundlage zu schaffen.

Zusammenfassend bietet das Free-Flow-System eine vielversprechende Alternative zu traditionellen Parkraumbewirtschaftungskonzepten, da es klimafreundlichere Parklösungen vorantreibt. Das Konzept sollte zukünftig weiterentwickelt und die erreichbaren Einsparpotenziale durch vertiefende und auch empirische Analysen verifiziert werden.

Anhang: Datenbasis und Annahmen

Tabelle 3: Daten und Annahmen zum Parkraumdesign sowie relevante Daten zum Bezahlvorgang.

Parameter	Einheit	Wert Free-Flow- System	Wert Schraken- System	Quelle
Parkraum allgemein				
Parkplatzkapazität	[Stück]	500,00	500,00	Annahme/Experten- schätzung
Parkvorgänge je Tag und Stellplatz	[Stück/Tag]	6,00	6,00	Annahme/Experten- schätzung
Anzahl Zufahrtmöglichkeiten	[Stück]	1,00	1,00	Annahme/Experten- schätzung
Anzahl Ausfahrtmöglichkeiten	[Stück]	1,00	1,00	Annahme/Experten- schätzung
Betriebsstunden pro Tag	[h/Tag]	15,00	15,00	Annahme/Experten- schätzung
Betriebstage pro Jahr	[Tage/a]	312,00	312,00	Annahme/Experten- schätzung
System Kennzeichenerfassung				
Anzahl Kameras	[Stück]	4,00	-	Primärdaten fair parken GmbH
Anzahl Schaltschrank inklusive Router	[Stück]	2,00	-	Primärdaten fair parken GmbH
Anzahl Masten	[Stück]	1,00		Primärdaten fair parken GmbH 50% Freifläche, 50% Parkhaus
Schrakenanlage				
Anzahl Schrankeneinheiten	[Stück]	-	2,00	Annahme/Experten- schätzung
Anzahl Schrankenbaum	[Stück]	-	2,00	Annahme/Experten- schätzung
Anzahl Schrankenterminals	[Stück]	-	2,00	Annahme/Experten- schätzung
Zahlungssystem				
Anzahl Kassenautomaten	[Stück]	3,00	4,00	Annahme/Experten- schätzung
Anteil Bezahlvorgänge am Kassenautomat bar	[%]	48,95	53,85	Primärdaten fair parken GmbH bzw. berechnet
Anteil Bezahlvorgänge am Kassenautomat digital	[%]	41,95	46,15	Primärdaten fair parken GmbH bzw. berechnet
Anteil Bezahlvorgänge online über Website	[%]	9,10	-	Primärdaten fair parken GmbH
Anteil Ausdruck der Quittung (bei Bezahlung vor Ort)	[%]	49,00	49,00	(YouGov PLC 2019)
Anteil Vertragsstrafen	[%]	1,00	-	Primärdaten fair parken GmbH

Tabelle 4: Angesetzte Modellwerte je Phase eines Intervalls zur Modellierung des Stop-and-Go-Verkehrs (Schraken-System).

Phasen eines Intervalls	Dauer in [s]	Länge in [m]	Beschleunigung in $\frac{m}{s^2}$	Max. Geschwindigkeit in $\frac{m}{s}$	Steigung in [°]
Beschleunigung	2,00	2,25	1,13	2,25	0,00
Konstantfahrt	0,00	0,00	-	-	0,00
Abbremsen	4,22	4,75	-0,53	-	0,00
Halten	6,50	-	-	-	-
Summe je Intervall	12,72	7,00	-	-	-

Tabelle 5: Annahmen zur Konstantfahrt (ohne Stau) beim Free-Flow-System für unterschiedliche Szenarien¹.

Konstantfahrt (Free-Flow)	Dauer in [s]	Länge in [m]	Beschleunigung in $\frac{m}{s^2}$	Durchschnittliche Geschwindigkeit in $\frac{m}{s}$	Steigung in [°]
»Basis«-Szenario	5,04	14,00	-	2,78	0,00
»Dichter-Verkehr«-Szenario	13,44	56,00	-	4,17	0,00
»Großveranstaltung«-Szenario	477,12	1.988,00	-	4,17	0,00
»Digitale-Zahlung«-Szenario	5,04	14,00	-	2,78	0,00

¹ Je Szenario wird stets der Teil der PKW-Fahrt im Ein- und Ausfahrtsbereich berücksichtigt, der vom Parkraumbewirtschaftungskonzept beeinflusst wird. Die Angaben in der Tabellen umfassen dabei sowohl die Einfahrt als auch die Ausfahrt.

Tabelle 6: Modellparameter zur Berechnung des Kraftstoffverbrauchs/Energiebedarfs für unterschiedliche Fahrzeugklassen.

Modellparameter	Benzin, klein	Benzin, mittel	Benzin, groß	Diesel, klein	Diesel, mittel	Diesel, groß	Elektro, klein	Elektro, mittel	Elektro, groß	Quellen
Gesamtwirkungsgrad η (Angepasster Wirkungsgrad Elektrofahrzeuge zur Versorgung elektrischer Nicht-Antriebs-Verbraucher, nur Ladeverluste)	0,30 (-)	0,45 (-)	0,65 (0,80)							(TÜV Nord AG o. J.; BMUV 2021)
Energiedichte des Kraftstoffs w in $\frac{MJ}{L}$	32,450	35,800	-							(BAFA 2024)
Luftwiderstandsbeiwert c_w	0,32	0,30	0,35	0,32	0,30	0,35	0,32	0,30	0,35	(Bishop et al. 2014; Lohse und Schnabel 2011)
Dichte der Luft bei Raumtemperatur ρ in $\frac{kg}{m^3}$	1,2									
Stirnfläche A in $[m^2]$	1,97	2,16	3,21	1,97	2,16	3,21	1,97	2,16	3,21	(Bishop et al. 2014)
Rollwiderstandsbeiwert c_r	0,012									
Steigungswinkel α in $[\circ]$	0									
Mindestleistungsbedarf P_0 in $[kW]$	2,2	3,6	0,556*							Berechnet auf Basis von (Lohse und Schnabel 2011); (Helms et al. 2022)
Erdbeschleunigung g in $[\frac{m}{s^2}]$	9,81									
Masse des Autos M in $[kg]$	1191	1345	1502	1165	1455	1652	1519	1724	2007	(Jander et al. 2021)
Anteil Start-Stopp-Automatik [%]	50									
	(B.I.G - Batterie-Industrie-Germany GmbH o. J.; Clarios Deutschland GmbH & Co. KG o. J.; Banner GmbH o. J.)									

Tabelle 7: Sachbilanzdaten zur Modellierung von Herstellung, Distribution, Installation, Verwertung und Nutzung der Kamera im Free-Flow-System (System zur Kennzeichenerfassung).

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
Allgemeine Angaben					
Installierte Anzahl	[Stück]	4,00	fair parken GmbH	-	Nur im Free-Flow-System Redundanter Aufbau. 2 Kameras erfassen jeweils Ein- und Ausfahrt
Zuweisungsfaktor je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang	-	3,42E-07	Berechnet	-	Berechnet auf Basis der Lebensdauer und Anzahl der Abrechnungsvorgänge über diesen Zeitraum Installierte Anzahl berücksichtigt
Herkunftsland	-	Schweden	(Axis Communications AB 2025)	-	-
Lebensdauer	[Jahre]	12,50	fair parken GmbH	-	-
El. Leistungsaufnahme bei Kennzeichenerfassung	[W]	10,00	fair parken GmbH	-	Durchschnittliche Leistungsaufnahme, gemessen an Testsystemen
El. Leistungsaufnahme Stand-By	[W]	7,20	fair parken GmbH	-	Nennleistung
Dauer Kennzeichenerfassung	[s]	0,20	fair parken GmbH	-	
Herstellung, Distribution, Installation, Verwertung					
Inputs:					
Kabel	[kg]	4,55E-03	(Hillerström und Troborg 2010)	market for cable, ribbon cable, 20-pin, with plugs (GLO); market for used cable (GLO)	Werte aus Quelle unter Annahme von linearer Proportionalität mittels Gesamtmasse der Kamera berechnet EoL nach Ecoinvent-Datensatz (Kunststoff wird verbrannt, Kupfer wird recycelt)
Aluminium (Gehäuse)	[kg]	0,56	(Hillerström und Troborg 2010)	market for aluminium, cast alloy (GLO); casting, aluminium, lost-wax (CA-CQ); metal working, average for aluminium product manufacturing (RER); aluminium scrap, post-consumer, Recycled Content cut-off (GLO)	Werte aus Quelle unter Annahme von linearer Proportionalität mittels Gesamtmasse der Kamera berechnet EoL: Recycling

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
Glas	[kg]	0,01	(Hillerström und Troborg 2010)	market for flat glass, uncoated (RER); tempering, flat glass (RER); waste packaging glass, unsorted, Recycled Content cut-off (GLO)	Werte aus Quelle unter Annahme von linearer Proportionalität mittels Gesamtmasse der Kamera berechnet EoL: Recycling
Silikon	[kg]	0,01	(Hillerström und Troborg 2010)	market for silicone product (RER); injection moulding (RER); market for waste rubber, unspecified (Europe without Switzerland)	Werte aus Quelle unter Annahme von linearer Proportionalität mittels Gesamtmasse der Kamera berechnet EoL nach Ecoinvent-Datensatz (Verbrennung in MWI)
Stahl	[kg]	0,20	(Hillerström und Troborg 2010)	market for steel, low-alloyed (GLO); metal working, average for steel product manufacturing (RER); ferrous metal, in mixed metal scrap, Recycled Content cut-off (GLO)	Werte aus Quelle unter Annahme von linearer Proportionalität mittels Gesamtmasse der Kamera berechnet EoL: Recycling
ABS	[kg]	0,08	(Hillerström und Troborg 2010)	market for acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer (GLO); injection moulding (RER); market for waste plastic, mixture (DE)	Werte aus Quelle unter Annahme von linearer Proportionalität mittels Gesamtmasse der Kamera berechnet. Annahme Kunststoff besteht zu 50% aus ABS und zu 50% aus PC EoL nach Ecoinvent-Datensatz (im Wesentlichen Verbrennung in MWI)
PC	[kg]	0,08	(Hillerström und Troborg 2010)	market for polycarbonate (RER); injection moulding (RER); market for waste plastic, mixture (DE)	Werte aus Quelle unter Annahme von linearer Proportionalität mittels Gesamtmasse der Kamera berechnet. Annahme Kunststoff besteht zu 50% aus ABS und zu 50% aus PC EoL nach Ecoinvent-Datensatz (im Wesentlichen Verbrennung in MWI)
Batterie (Printed Circuit Board Assembly)	[kg]	7,92E-05	(Hillerström und Troborg 2010)	market for battery, Li-ion, NMC111, rechargeable, prismatic (GLO);	Teil des Printed Circuit Board Assembly. Werte aus Quelle unter

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
				market for used Li-ion battery (GLO)	Annahme von linearer Proportionalität mittels Gesamtmasse der Kamera berechnet EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Kondensator (Printed Circuit Board Assembly)	[kg]	3,27E-03	(Hillerström und Troborg 2010)	market for capacitor, for surface-mounting (GLO); market for used capacitor (GLO)	Teil des Printed Circuit Board Assembly. Werte aus Quelle unter Annahme von linearer Proportionalität mittels Gesamtmasse der Kamera berechnet EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Stecker (Printed Circuit Board Assembly)	[kg]	2,08E-04	(Hillerström und Troborg 2010)	market for electric connector, peripheral component interconnect buss (GLO); market for used cable (GLO)	Teil des Printed Circuit Board Assembly. Werte aus Quelle unter Annahme von linearer Proportionalität mittels Gesamtmasse der Kamera berechnet EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Diode (Printed Circuit Board Assembly)	[kg]	7,43E-04	(Hillerström und Troborg 2010)	market for diode, glass-, for surface-mounting (GLO); market for electronics scrap from control units (GLO)	Teil des Printed Circuit Board Assembly. Werte aus Quelle unter Annahme von linearer Proportionalität mittels Gesamtmasse der Kamera berechnet EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Ferrit (Printed Circuit Board Assembly)	[kg]	7,43E-05	(Hillerström und Troborg 2010)	market for ferrite (GLO); market for electronics scrap from control units (GLO)	Teil des Printed Circuit Board Assembly. Werte aus Quelle unter Annahme von linearer Proportionalität mittels Gesamtmasse der Kamera berechnet EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Integrierte Schaltung (Printed Circuit Board Assembly)	[kg]	1,04E-03	(Hillerström und Troborg 2010)	market for integrated circuit, logic type (GLO); market for electronics scrap from control units (GLO)	Teil des Printed Circuit Board Assembly. Werte aus Quelle unter Annahme von linearer Proportionalität mittels Gesamtmasse der Kamera berechnet

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
					EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Spule (Printed Circuit Board Assembly)	[kg]	2,28E-03	(Hillerström und Troborg 2010))	market for inductor, ring core choke type (GLO); market for electronics scrap from control units (GLO)	Teil des Printed Circuit Board Assembly. Werte aus Quelle unter Annahme von linearer Proportionalität mittels Gesamtmasse der Kamera berechnet EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Printed Circuit Board (Printed Circuit Board Assembly)	[m²]	0,01	(Hillerström und Troborg 2010)	market for printed wiring board, for surface mounting, Pb free surface (GLO); market for used printed wiring boards (GLO)	Teil des Printed Circuit Board Assembly. Werte aus Quelle unter Annahme von linearer Proportionalität mittels Gesamtmasse der Kamera berechnet. Annahme 3 kg/m² EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Widerstand (Printed Circuit Board Assembly)	[kg]	1,24E-04	(Hillerström und Troborg 2010)	market for resistor, surface-mounted (GLO); market for electronics scrap from control units (GLO)	Teil des Printed Circuit Board Assembly. Werte aus Quelle unter Annahme von linearer Proportionalität mittels Gesamtmasse der Kamera berechnet. EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Transformator (Printed Circuit Board Assembly)	[kg]	7,43E-03	(Hillerström und Troborg 2010)	market for transformer, low voltage use (GLO); market for electronics scrap from control units (GLO)	Teil des Printed Circuit Board Assembly. Werte aus Quelle unter Annahme von linearer Proportionalität mittels Gesamtmasse der Kamera berechnet EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Transistor (Printed Circuit Board Assembly)	[kg]	3,56E-04	(Hillerström und Troborg 2010)	market for transistor, surface-mounted (GLO); market for electronics scrap from control units (GLO)	Teil des Printed Circuit Board Assembly. Werte aus Quelle unter Annahme von linearer Proportionalität mittels Gesamtmasse der Kamera berechnet EoL nach Ecoinvent-Datensatz

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
El. Energie Montage Kamera + Montage PCBA	[kg]	2,02	(Hillerström und Troborg 2010))	market for electricity, medium voltage (SE)	Energie für Montage der Kamera sowie Montage PCBA zusammengefasst. Werte aus Quelle unter Annahme von linearer Proportionalität mittels Gesamtmasse der Kamera berechnet
Verpackung	[kg]	-	Annahme		vernachlässigt
Transport (LKW)	[tkm]	1,40	Annahme	transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 (RER)	Annahme: Stockholm - Düsseldorf ca. 1.400 km
Installation vor Ort	[kWh]	2,00	Annahme	diesel, burned in building machine (GLO)	Konservativ abgeschätzt
Outputs:					
Kamera	[Stück]	1,00	(Axis Communication s AB 2025)	-	Masse je Kamera: 1 kg
Emission Aceton	[kg]	3,47E-04	(Hillerström und Troborg 2010)	Acetone (Emission to Air, unspecified)	
Emission Isopropanol	[kg]	2,28E-03	(Hillerström und Troborg 2010)	Isopropanol (Emission to Air, unspecified)	
Nutzungsphase/Energiebedarf					
El. Energiebedarf je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang (Aktiv)	[kWh]	2,22E-06	Berechnet	market for electricity, low voltage (DE)	Berechnet anhand von Dauer der Kennzeichenerfassung, Leistungsaufnahme und Anzahl der Erfassungsvorgänge je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang
El. Energiebedarf je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang (Stand-By)	[kWh]	1,42E-04	Berechnet	market for electricity, low voltage (DE)	Berechnet anhand von Dauer der Kennzeichenerfassung, Leistungsaufnahme und Anzahl der Erfassungsvorgänge je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang

Tabelle 8: Sachbilanzdaten zur Modellierung von Herstellung, Distribution, Installation, Verwertung und Nutzung des Schaltschranks inklusive Router im Free-Flow-System (System zur Kennzeichenerfassung).

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
Allgemeine Angaben					
Installierte Anzahl	[Stück]	2,00	fair parken GmbH		Nur im Free-Flow-System 1 Schaltschrank für je 2 Kameras
Zuweisungsfaktor je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang	-	3,56E-07	Berechnet	-	Berechnet auf Basis der Lebensdauer und Anzahl der Nutzungsvorgänge über diesen Zeitraum Installierte Anzahl berücksichtigt
Herkunftsland	-	Deutschland	fair parken GmbH	-	-
Lebensdauer	[Jahre]	6,00	(ecoinvent Association o. J.)	-	Die fair parken GmbH hat hier 10 Jahre als Lebensdauer angegeben. Es wird konservativ mit der Angabe zur Lebensdauer vom Router aus dem Ecoinvent-Datensatz "market for router, internet (GLO)" gerechnet (6 Jahre)
El. Leistungsaufnahme (Schaltschrank)	[W]	13,00	fair parken GmbH	-	Durchschnittliche Leistungsaufnahme, gemessen an Testsystemen
El. Leistungsaufnahme (Router)	[W]	5,30	fair parken GmbH	-	Nennleistung Welotec TK800 Series, 3,8W (StandBy) & 5,3W (Aktiv), hoher Anteil idle
Herstellung, Distribution, Installation, Verwertung					
Inputs:					
Gehäuse	[kg]	12,10	(Rittal GmbH & Co. KG 2020)	market for steel, low-alloyed (GLO); hot rolling, steel (Europe without Austria); deep drawing, steel, 3500 kN press, automode (RER); ferrous metal, in mixed metal scrap, Recycled Content cut-off (GLO)	Wert aus Quelle übernommen EoL: Recycling
Pulverbeschichtung (Gehäuse)	[m²]	0,78	(Rittal GmbH & Co. KG 2020)	powder coating, steel (RER)	Berechnet über die Maße des Schaltschranks
Geheimhaltungsbedürftige Daten zu elektronischen Komponenten					

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
Geheimhaltungsbedürftige Daten zu elektronischen Komponenten					

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
Geheimhaltungsbedürftige Daten zu elektronischen Komponenten					

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
Verkabelung	[m]	1,00	(Waskönig+Walter Kabel-Werk GmbH u. Co. KG 2017)	market for cable, unspecified (GLO); market for used cable (GLO)	Länge der Verkabelung geschätzt (2 x Höhe). Annahme: 3 x 2,5mm, entspricht nach Quelle 0,158 kg/m EoL nach Ecoinvent-Datensatz
El. Energie Montage (Zusammensetzen der Komponenten)	[kWh]	-	Annahme	-	vernachlässigt
Verpackung	[kg]	-	Annahme	-	vernachlässigt
Transport (LKW)	[tkm]	-	-	-	kein separater Transport des zusammengebauten Schaltschranks, da die Komponenten einzeln bezogen und vor Ort zusammengesetzt werden. Transport der einzelnen Komponenten bereits in Ecoinvent-Datensätzen berücksichtigt
Installation vor Ort	[kWh]	2,00	Annahme	diesel, burned in building machine (GLO)	Konservativ abgeschätzt
Outputs:					
Schaltschrank	[Stück]	1,00	-	-	-
Nutzungsphase/Energiebedarf					
El. Energiebedarf Schaltschrank je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang (Aktiv), ohne Router	[kWh]	1,44E-06	Berechnet	market for electricity, low voltage (DE)	Berechnet anhand von Dauer der Kennzeichenerfassung, Leistungsaufnahme und Anzahl der Erfassungsvorgänge je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang
El. Energiebedarf Router je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang (Aktiv)	[kWh]	5,89E-07	Berechnet	market for electricity, low voltage (DE)	Berechnet anhand von Dauer der Kennzeichenerfassung, Leistungsaufnahme und Anzahl der Erfassungsvorgänge je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang
El. Energiebedarf Schaltschrank je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang (Stand-By), ohne Router	[kWh]	1,29E-04	Berechnet	market for electricity, low voltage (DE)	Berechnet anhand von Dauer der Kennzeichenerfassung, Leistungsaufnahme und Anzahl der Erfassungsvorgänge je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang
El. Energiebedarf Router je	[kWh]	3,76E-05	Berechnet	market for electricity, low voltage (DE)	Berechnet anhand von Dauer der

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang (Stand-By)					Kennzeichenerfassung, Leistungsaufnahme und Anzahl der Erfassungsvorgänge je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang

Tabelle 9: Sachbilanzdaten zur Modellierung von Herstellung, Distribution, Installation, Verwertung und Nutzung des Masts im Free-Flow-System (System zur Kennzeichenerfassung).

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
Allgemeine Angaben					
Installierte Anzahl	[Stück]	1,00	fair parken GmbH	-	Ein Mast wird nur benötigt, wenn es sich um einen Freiflächenparkraum handelt. Annahme: 50% Freifläche, 50% Parkhaus 2 Kameras und 1 Schaltschrank je Mast
Zuweisungsfaktor je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang	-	3,05E-08	Berechnet	-	Berechnet auf Basis der Lebensdauer und Anzahl der Nutzungsvorgänge über diesen Zeitraum Installierte Anzahl berücksichtigt
Herkunftsland	-	Deutschland	Annahme	-	-
Lebensdauer	[Jahre]	35,00	(Tecpoles Sp. z o.o. 2023)	-	-
Herstellung, Distribution, Installation, Verwertung					
Inputs:					
Stahl	[kg]	20,50	(Northcone AB. 2024)	market for steel, low-alloyed, (GLO); hot rolling, steel (Europe, without Switzerland); welding, arc, steel (RER); ferrous metal, in mixed metal scrap, Recycled Content cut-off (GLO)	Daten aus der Quelle anhand der Mastlänge berechnet. Für das Schweißen wird entsprechend der Höhe ein Wert von 4 m angesetzt EoL: Recycling
Zink	[m²]	1,31	(ecoinvent Association o. J.)	zinc coating, coils (RER)	Auf Basis des entsprechenden Ecoinvent Datensatzes berechnet
Verpackung	[kg]	-	Annahme	-	vernachlässigt
Transport (LKW)	[tkm]	10,25	Annahme	transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 (RER)	Annahme: 500 km LKW-Transport innerhalb von Deutschland
Installation vor Ort	[kWh]	2,00	Annahme	diesel, burned in building machine (GLO)	Konservativ abgeschätzt
Outputs:					
Mast	[Stück]	1	-	-	-
Nutzungsphase/Energiebedarf					
-	-	-	-	-	-

Tabelle 10: Sachbilanzdaten zur Modellierung von Herstellung, Distribution, Installation, Verwertung und Nutzung der Schrankeneinheit im Schranken-System (Schrankenanlage).

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
Allgemeine Angaben					
Installierte Anzahl	[Stück]	2,00	fair parken GmbH	-	Jeweils eine Schrankeneinheit bei Ein- und Ausfahrt
Zuweisungsfaktor je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang	-	2,00E-07	Berechnet	-	Berechnet auf Basis der Lebensdauer und Anzahl der Nutzungsvorgänge über diesen Zeitraum Installierte Anzahl berücksichtigt
Herkunftsland	-	Deutschland	Annahme	-	-
Lebensdauer	[Jahre]	10,68	Berechnet auf Basis von (Ernst B. Gausmann GmbH o. J.; Preiser MRT oHG o. J.)	-	Schrankenanlage nach Quellen für bis zu 10 Millionen Zyklen (Öffnen + Schließen) ausgelegt
El. Leistungsaufnahme beim Öffnen/Schließen	[W]	260,83	(Ernst B. Gausmann GmbH 2021; Bebarmatic Parksysteme GmbH 2024; Automatic Systems IER Group 2018; ACOTEC GmbH 2020; Attas GmbH 2023)		Durchschnitt aus Angaben in den genannten Quellen bestimmt
Öffnungs- und Schließzeit	[s]	5,00	(Ernst B. Gausmann GmbH 2021; Bebarmatic Parksysteme GmbH 2024; Automatic Systems IER Group 2018)	-	Bestimmt auf Basis der Quellen 2,5 Sekunden Öffnen, 2,5 Sekunden Schließen
Herstellung, Distribution, Installation, Verwertung					
Inputs:					
Fundament	[kg]	380,00	(Bauer-Systemtechnik GmbH 2025a)	market for concrete block (DE); market for waste concrete, not reinforced (Europe without Switzerland)	Masse aus Quelle übernommen (Fertigblock) EoL nach Ecoinvent-Datensatz.

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
Gehäuse	[kg]	28,14	(Bauer-Systemtechnik GmbH 2025c)	market for steel, low-alloyed (GLO); hot rolling, steel (Europe without Austria); deep drawing, steel, 3500 kN press, automode (RER); ferrous metal, in mixed metal scrap, Recycled Content cut-off (GLO)	Über Maße und Dichte errechnet EoL: Recycling
Pulverbeschichtung Gehäuse	[m²]	1,19	(Bauer-Systemtechnik GmbH 2025c)	powder coating, steel (RER)	Berechnet über Maße des Artikels
Motor/Antrieb	[kg]	8,69	(Bauer-Systemtechnik GmbH 2025c)	market for electric motor, vehicle (GLO); market for used powertrain from electric passenger car, manual dismantling (GLO)	Keine Angabe zu Masse. Auf Basis der Massenangabe zu Schrankenanlage aus Quelle (42,6 kg, inklusive Schrankenbaum und ohne Fundament) lässt sich die Motormasse abschätzen, durch Subtraktion der übrigen Komponenten. Für EoL wird Ecoinvent-Datensatz "market for used powertrain from electric passenger car, manual dismantling" angesetzt, da dieser zum Großteil die Verwertung eines Elektromotors abbildet
Elektronische Komponenten	[kg]	1,50	Annahme	market for electronic component, active, unspecified (GLO); market for electronic component, passive, unspecified (GLO); market for electronics scrap from control units (GLO)	Um den Aufwand für weitere verbaute Elektronik abzuschätzen (bspw. Schrankensteuerung) werden konservativ 1,5 kg elektronische Komponenten angesetzt Da keine genaueren Informationen, werden Durchschnittsdatsätze angesetzt. Dabei wird eine 50/50 Verteilung von aktiven und passiven Komponenten angenommen EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Verkabelung	[m]	2,00	(Bauer-Systemtechnik)	market for cable, unspecified (GLO);	Annahme: Höhe Schrankenanlage x2 für

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
			GmbH 2025c; Waskönig+Walt er Kabel-Werk GmbH u. Co. KG 2017)	market for used cable (GLO)	die Verkabelung der einzelnen Komponenten und Stromversorgung. Annahme: 3x2,5mm, entspricht nach Quelle 0,158 kg/m (0,316 kg) EoL nach Ecoinvent- Datensatz
El. Energie Montage Schrankeneinheit	[kWh]	2,72	Annahme	market for electricity, medium voltage (DE)	El. Energie Montage Schrankenanlage abgeschätzt auf Basis von Ecoinvent-Datensatz "computer production, desktop, without screen (GLO)"
Verpackung	[kg]	-	Annahme	-	vernachlässigt
Transport (LKW)	[tkm]	209,32	Annahme	transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 (RER)	Annahme: 500 km innerhalb von Deutschland
Installation vor Ort	[kWh]	2,00	Annahme	diesel, burned in building machine (GLO)	Konservativ abgeschätzt
Outputs:					
Schrankeneinheit (ohne Schrankenbaum)	[Stück]	1,00	-	-	-
Nutzungsphase/Energiebedarf					
El. Energiebedarf je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang	[kWh]	7,25E-04	-	market for electricity, low voltage (DE)	Berechnet anhand von Öffnungs- und Schließzeiten, Leistungsaufnahme und Anzahl der Öffnungs- und Schließvorgänge je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang (installierte Anzahl berücksichtigt)

Tabelle 11: Sachbilanzdaten zur Modellierung von Herstellung, Distribution, Installation, Verwertung und Nutzung des Schrankenbaums im Schranken-System (Schrankenanlage).

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
Allgemeine Angaben					
Installierte Anzahl	[Stück]	2,00	fair parken GmbH	-	Jeweils ein Schrankenbaum je Schrankeneinheit
Zuweisungsfaktor je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang	-	1,42E-06	Berechnet	-	Berechnet auf Basis der Lebensdauer und Anzahl der Nutzungsvorgänge über diesen Zeitraum Installierte Anzahl berücksichtigt
Herkunftsland	-	Deutschland	Annahme	-	-
Lebensdauer	[Jahre]	1,50	fair parken GmbH	-	Einschätzung der fair parken GmbH: Wechsel alle 1-2 Jahre. Es wird mit 1,5 Jahren gerechnet
Herstellung, Distribution, Installation, Verwertung					
Inputs:					
Aluminium-Profil	[kg]	3,72	(Attas GmbH 2023; ACOTEC GmbH 2020)	market for aluminium, primary, ingot (IAI Area, EU27 & EFTA); section bar extrusion, aluminium (RER); aluminium scrap, post-consumer, Recycled Content cut-off (GLO)	Aus Quellen 1,32 kg/m für Schrankenbaum übernommen. Es wird mit 3 m Länge gerechnet EoL: Recycling
Pulverbeschichtung	[m²]	0,91	(Attas GmbH 2023)	powder coating, aluminium sheet (RER)	Berechnet auf Basis der Angaben zu den Maßen in Quelle
Reflexfolie	[kg]	0,24	(Bohmeyer & Schuster GmbH 2024; ORAFOL Europe GmbH 2015; wenglor sensoric elektronische Geräte GmbH 2023)	market for polyethylene, low density, granulate (GLO); extrusion, plastic film (RER); market for waste polyethylene (DE)	Über Volumen und Masse berechnet EoL nach Ecoinvent-Datensatz
El. Energiebedarf Herstellung Schrankenbaum	[kWh]	-	Annahme	-	Es wird angenommen, dass neben dem durch die Ecoinvent-Datensätze bereits abgedeckten Energiebedarf kein weiterer Energiebedarf bei der Herstellung anfällt
Verpackung	[kg]	-	Annahme	-	vernachlässigt
Transport (LKW)	[tkm]	1,98	Annahme	transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 (RER)	Annahme 500 km innerhalb von Deutschland

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
Installation vor Ort	[kWh]	-	Annahme		Es wird angenommen, dass der Aufwand für die Installation vor Ort bereits über die 2 kWh bei der Schrankeneinheit ausreichend berücksichtigt ist
Outputs:					
Schrankenbaum	[Stück]	1,00			
Nutzungsphase/Energiebedarf					
-	-	-	-	-	-

Tabelle 12: Sachbilanzdaten zur Modellierung von Herstellung, Distribution, Installation, Verwertung und Nutzung des Schrankenterminals im Schranken-System (Schrankenanlage).

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
Allgemeine Angaben					
Installierte Anzahl	[Stück]	2,00	fair parken GmbH	-	Jeweils ein Schrankenterminal bei Ein- und Ausfahrt
Zuweisungsfaktor je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang	-	2,00E-07	Berechnet	-	Berechnet auf Basis der Lebensdauer und Anzahl der Nutzungsvorgänge über diesen Zeitraum Installierte Anzahl berücksichtigt
Herkunftsland	-	Deutschland	Annahme Umsicht	-	-
Lebensdauer	[Jahre]	10,68	Annahme Umsicht	-	Keine separaten Angaben für Schrankenterminal verfügbar. Es wird angenommen, dass diese Einheit stets zusammen mit der Schrankeneinheit ausgetauscht wird. Aus diesem Grund wird die Lebensdauer der Schrankeneinheit für das Terminal übernommen
El. Leistungsaufnahme (während Nutzung)	[W]	50,00	(Bebarmatic Parksysteme GmbH 2020)	-	Laut Quelle: 50 W / max. 300 W inkl. Heizung. Heizleistung wird konservativ vernachlässigt
El. Leistungsaufnahme (Stand-By)	[W]	0,40	(Beetronics B.V. 2025b)	-	0,4 W Energiebedarf (Stand-By) Bildschirm
Herstellung, Distribution, Installation, Verwertung					
Inputs:					
Fundament	[kg]	380,00	(Bauer-Systemtechnik GmbH 2025a)	market for concrete block (DE); market for waste concrete, not reinforced (Europe without Switzerland)	Masse aus Quelle übernommen (Fertigblock) EoL nach Ecoinvent-Datensatz.
Gehäuse	[kg]	34,43	(Bebarmatic Parksysteme GmbH 2020)	market for steel, low-alloyed (GLO); hot rolling, steel (Europe without Austria); deep drawing, steel, 3500 kN press, automode (RER); ferrous metal, in mixed metal scrap, Recycled Content cut-off (GLO)	Maße laut Quelle: 40 x 34 x 139 cm Annahme: Wandstärke 2 mm, Dichte Stahl: 7,85 g/cm ³ EoL: Recycling

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
Pulverbeschichtung	[m²]	2,19	(Bebarmatic Parksysteme GmbH 2020)	powder coating, steel (RER)	Oberfläche berechnet auf Basis der Angaben in Quelle
Einfassung Kommunikationsfeld (Bildschirm, Drucktaster, Ticketausgabe/-eingabe, Lautsprecher)	[kg]	6,96	-	market for polycarbonate (RER); injection moulding (RER); market for waste plastic, mixture (DE)	Masse berechnet auf Basis der Gesamtmasse der Terminals abzüglich der Masse aller übrigen Komponenten EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Bildschirm	[Stück]	0,41	(Bebarmatic Parksysteme GmbH 2020; Beetrionics B.V. 2025b)	market for display, liquid crystal, 17 inches (GLO); market for used liquid crystal display (GLO)	Laut Quelle Display mit 17,7 cm Diagonale (7 Zoll). Ecoinvent Datensatz für 17 Zoll Display angesetzt. Wert entsprechend angepasst. Masse von Referenzbildschirm (siehe Quelle): 0,6 kg EoL nach Ecoinvent Datensatz
Drucktaster	[kg]	0,02	(Metzler GmbH 2025)	market for electronic component, passive, unspecified (GLO); market for steel, low-alloyed (GLO); metal working, average for steel product manufacturing (RER); market for electronics scrap from control units (GLO); ferrous metal, in mixed metal scrap, Recycled Content cut-off (GLO)	Masse laut Quelle 0,02 kg. Annahme 50 % Stahl, 50 % passive elektronische Komponenten EoL elektronische Komponenten nach Ecoinvent Datensatz, EoL Stahl: Recycling
Kommunikation/Lautsprecher	[kg]	0,40	(Thomann GmbH 2025)	market for electronic component, passive, mobile, earpiece and speaker (GLO); market for electronics scrap from control units (GLO)	Masse aus Quelle übernommen EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Dispenser/Ticketdrucker	[kg]	2,15	(E.W.L. Display & Printing Solutions GmbH 2016; Fenix Invico o. J.)	market for electronic component, active, unspecified (GLO); market for electronic component, passive, unspecified (GLO); market for electronics scrap from control units (GLO)	Laut Quellen Masse: 1,3 kg - 3 kg -> Mittelwert: 2,15 kg Für die Modellierung werden Dispenser und Thermodrucker zur Vereinfachung als eine Komponente angenommen

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
					Da keine genaueren Informationen, werden Durchschnittsdatsätze angesetzt. Dabei wird eine 50/50 Verteilung von aktiven und passiven Komponenten angenommen EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Verkabelung	[m]	2,78	(Bebarmatic Parksysteme GmbH 2020; Waskönig+Walter Kabel-Werk GmbH u. Co. KG 2017)	market for cable, unspecified (GLO); market for used cable (GLO)	Annahme: 2 x Höhe Terminal für die Verkabelung der einzelnen Komponenten und Stromversorgung. Annahme 3x2,5mm, entspricht nach Quelle 0,158 kg/m EoL nach Ecoinvent-Datensatz
El. Energie Montage Terminal	[kWh]	2,72	Annahme	market for electricity, medium voltage (DE)	El. Energie Montage Terminal abgeschätzt auf Basis von Ecoinvent-Datensatz "computer production, desktop, without screen (GLO)". Auch ein Desktop-PC besteht aus Gehäuse und elektronischen Komponenten, die darin montiert werden. Es wird angenommen, dass der Aufwand nicht von der Größe abhängt
Verpackung	[kg]	-	Annahme	-	vernachlässigt
Transport (LKW)	[tkm]	212,50	Annahme	transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 (RER)	Annahme: 500 km innerhalb von Deutschland
Installation vor Ort	[kWh]	2,00	Annahme	diesel, burned in building machine (GLO)	Konservativ abgeschätzt
Outputs:					
Schrankterminal	[Stück]	1,00	-	-	-
Nutzungsphase/Energiebedarf					
El. Energiebedarf je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang	[kWh]	5,91E-05	(Bebarmatic Parksysteme GmbH 2020; Beetronics B.V. 2025b)	market for electricity, low voltage (DE)	Berechnet auf Basis der Angaben zur Leistungsaufnahme in Quellen. Heizleistung vernachlässigt. Annahme: 2 Sekunden für Ticketdruck und Ticketausgabe bzw. Ticketeinzug

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
					Installierte Anzahl berücksichtigt

Tabelle 13: Sachbilanzdaten zur Modellierung von Herstellung, Distribution, Installation, Verwertung und Nutzung des Kassenautomaten im Free-Flow-System.

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
Allgemeine Angaben					
Installierte Anzahl	[Stück]	3,00	fair parken GmbH	-	-
Zuweisungsfaktor je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang	-	2,14E-07	-	-	Berechnet auf Basis der Lebensdauer und Anzahl der Nutzungsvorgänge über diesen Zeitraum Installierte Anzahl berücksichtigt
Herkunftsland	-	Deutschland	fair parken GmbH	-	-
Lebensdauer	[Jahre]	15,00	(Haimerl 2016; Bezirksamt Mitte von Berlin 2024; Glumm 2023; Veranstaltergemeinschaft Lokalfunk Essen e.V. 2022; Verlag Der Tagesspiegel GmbH 2017)	-	Die Quellen weisen in Bezug auf die Lebensdauer von Parkscheinautomaten Werte von 15 bis 30 Jahre aus. Konservativ wird mit 15 Jahren gerechnet.
Herstellung, Distribution, Installation, Verwertung					
Inputs:					
Bildschirm	[Stück]	0,88	(abaleo AG 2017; Beetrionics B.V. 2025a)	market for display, liquid crystal, 17 inches (GLO); market for used liquid crystal display (GLO)	Laut Quelle LED-Display mit 38,8 cm Diagonale (15 Zoll). Ecoinvent Datensatz für 17 Zoll Display angesetzt. Wert entsprechend angepasst. Masse von Referenzbildschirm (siehe Quelle): 1 kg EoL nach Ecoinvent Datensatz
Stahl (Münzverarbeitung)	[kg]	2,76	(Bauer-Systemtechnik GmbH 2025b)	market for steel, low-alloyed (GLO); hot rolling, steel (Europe without Austria); deep drawing, steel, 3500 kN press, automode (RER); ferrous metal, in mixed metal scrap, Recycled Content cut-off (GLO)	Gewicht des Gehäuses bestimmt auf Basis der in der Quelle gegebenen Maße: 260 x 160 x 110 mm, 2 mm Oberfläche gesamt: 0,1756 m ² Volumen gesamt: 0,0003512 m ³ -> 2,76 kg (Dichte Stahl: 7,85 g/cm ³)

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
					EoL: Recycling
Elektronische Komponenten (Münzverarbeitung)	[kg]	0,74	(Bauer-Systemtechnik GmbH 2025b)	market for electronic component, active, unspecified (GLO); market for electronic component, passive, unspecified (GLO); market for electronics scrap from control units (GLO)	Annahme: Gesamtmasse (3,5 kg) abzüglich Masse des Gehäuses Da keine genaueren Informationen, werden Durchschnittsdatensätze angesetzt. Dabei wird eine 50/50 Verteilung von aktiven und passiven Komponenten angenommen EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Geldscheinverarbeitung	[kg]	1,50	(Automatenland GmbH 2025)	market for electronic component, active, unspecified (GLO); market for electronic component, passive, unspecified (GLO); market for electronics scrap from control units (GLO)	Masse aus Quelle übernommen Maße: 238 x 94 x 97 mm Da keine genaueren Informationen, werden Durchschnittsdatensätze angesetzt. Dabei wird eine 50/50 Verteilung von aktiven und passiven Komponenten angenommen EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Kommunikation/Lautsprecher	[kg]	0,40	(Thomann GmbH 2025)	market for electronic component, passive, mobile, earpiece and speaker (GLO); market for electronics scrap from control units (GLO)	Masse aus Quelle übernommen; EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Netzanschluss	[Stück]	1,00	(abaleo AG 2017; WSA Electronic GmbH & Co. KG o.J.)	market for power supply unit, for desktop computer (GLO); market for electronics scrap from control units (GLO)	Informationen laut Quellen: 100–230 V, 50 / 60 Hz, 100 W (500 Watt mit Heizung) (abaleo). 230V, keine Infos zur Leistung (WSA) Masse Netzteil laut angesetztem Ecoinvent-Datensatz: 1,23 kg EoL nach Ecoinvent-Datensatz

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
Rechnereinheit	[Stück]	0,16	(TL Electronic GmbH o. J.)	market for computer, desktop, without screen (GLO); market for used desktop computer (GLO)	Rechner aus Ecoinvent-Datensatz hat Masse von 11,3 kg. Laut angegebener Quelle kann Masse von 1,8 kg angesetzt werden. Wert entsprechend angepasst EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Heizungseinheit	[kg]	1,27	(Lm-therm Elektrotechnik AG 2024)	market for aluminium, cast alloy (GLO); metal working, average for aluminium product manufacturing (RER); aluminium scrap, post-consumer, Recycled Content cut-off (GLO)	Keramische Heizscheiben, Aluminiumgehäuse. Da Massenverhältnis nicht bekannt, nur Aluminium in Modellierung berücksichtigt EoL: Recycling
Stahl (Gehäuse)	[kg]	130,35	(abaleo AG 2017)	market for steel, low-alloyed (GLO); hot rolling, steel (Europe without Switzerland); deep drawing, steel, 3500 kN press, automode (RER); ferrous metal, in mixed metal scrap, Recycled Content cut-off (GLO)	Oberfläche des Gehäuses berechnet mit den Maßen aus Quelle: 900 mm x 1900 mm x 450 mm. Ausparungen für Bildschirm, Eingabefeld etc. vernachlässigt. Annahme: 3mm Wandstärke Dichte Stahl: 7,85 g/cm³ EoL: Recycling
Pulverbeschichtung (Gehäuse)	[m²]	5,54	(abaleo AG 2017)	powder coating, steel (RER)	Berechnung der Fläche wie oben
Batterie	[kg]	2,40	(RTB GmbH & Co. KG 2021; V & S Vertriebs- und Service GmbH & Co. KG 2021)	market for battery, lead acid, rechargeable, stationary (GLO); scrap lead acid battery, Recycled Content cut-off (GLO)	Angaben in Quelle: 12 V, 7,2 Ah. Angaben decken sich mit typischen Werten einer Bleibatterie. Masse laut Quelle: 2,5 kg EoL: Recycling
Verkabelung	[m]	3,80	(Waskönig+Walter Kabel-Werk GmbH u. Co. KG 2017)	market for cable, unspecified (GLO); market for used cable (GLO)	Annahme: 2 x Höhe Kassenautomat für die Verkabelung der einzelnen Komponenten und Stromversorgung. Annahme 3x2,5mm, entspricht nach Quelle 0,158 kg/m -> 0,6004 kg EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Netzanschluss (Kartenlesegerät)	[Stück]	0,05	(Girard und Neunhoff 2024)	market for power supply unit, for desktop computer (GLO);	Wert aus Quelle übernommen.

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
				market for electronics scrap from control units (GLO)	Ecoinvent-Datensatz: 1,23 kg/Stück, entspricht hier Masse von 68 g EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Batterie (Kartenlesegerät)	[kg]	0,03	(Girard und Neunhoff 2024)	market for battery cell, Li-ion, NMC111 (GLO); market for used Li-ion battery (GLO)	Wert aus Quelle übernommen EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Polycarbonat - Gehäuse (Kartenlesegerät)	[kg]	0,15	(Girard und Neunhoff 2024)	market for polycarbonate (RER); injection moulding (RER); market for waste plastic, mixture (DE)	Wert aus Quelle übernommen EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Polypropylen - Gehäuse (Kartenlesegerät)	[kg]	5,00E-03	(Girard und Neunhoff 2024)	market for polypropylene, granulate (GLO); injection moulding (RER); market for waste polypropylene (DE)	Wert aus Quelle übernommen EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Glasfaser verstärkter Kunststoff - Gehäuse (Kartenlesegerät)	[kg]	4,15E-03	(Girard und Neunhoff 2024)	market for glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded (GLO); market for waste plastic, mixture (DE)	Wert aus Quelle übernommen EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Versiegelung/Dichtung (Kartenlesegerät)	[kg]	0,02	(Girard und Neunhoff 2024)	market for silicone product (RER); injection moulding (RER); market for waste plastic, mixture (DE)	Wert aus Quelle übernommen EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Display (Kartenlesegerät)	[Stück]	1,96E-03	(Girard und Neunhoff 2024)	market for display, liquid crystal, 17 inches (GLO); market for used liquid crystal display (GLO)	Wert aus Quelle übernommen. Masse laut Quelle: 10 g EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Kupfer (Kartenlesegerät)	[kg]	0,01	(Girard und Neunhoff 2024)	market for copper, cathode (GLO); metal working, average for copper product manufacturing (RER); treatment of used cable copper, cathode (GLO)	Wert aus Quelle übernommen EoL: Recycling
Printed Circuit Board (Kartenlesegerät)	[kg]	0,03	(Girard und Neunhoff 2024)	market for printed wiring board, mounted mainboard, desktop computer, Pb free (GLO);	Wert aus Quelle übernommen EoL nach Ecoinvent-Datensatz

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
				market for used printed wiring boards (GLO)	
Integrierte Schaltung 1 (Kartenlesegerät)	[kg]	2,58E-03	(Girard und Neunhoff 2024)	market for integrated circuit, logic type (GLO); market for electronics scrap from control units (GLO)	Wert aus Quelle übernommen EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Integrierte Schaltung 2 (Kartenlesegerät)	[kg]	3,00E-05	(Girard und Neunhoff 2024)	market for integrated circuit, memory type (GLO); market for electronics scrap from control units (GLO)	Wert aus Quelle übernommen EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Sockel/ Fundament	[kg]	86,88	(abaleo AG 2017)	market for concrete block (DE); market for waste concrete, not reinforced (Europe without Switzerland)	Masse bestimmt aus dem in Quelle gegeben Gesamtgewicht abzüglich aller übrigen Komponenten EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Wärmeenergiebedarf Montage (Kartenlesegerät)	[MJ]	4,82	(Girard und Neunhoff 2024)	market group for heat, district or industrial, natural gas (RER)	Wert aus Quelle übernommen
El. Energiebedarf Montage (Kartenlesegerät + gesamter Kassenautomat)	[kWh]	4,22	Girard & Neunhoff (2024); sowie Annahme	market for electricity, medium voltage (DE)	El. Energiebedarf für Montage Kartenlesegerät aus Quelle übernommen. El. Energiebedarf Montage Kassenautomat abgeschätzt auf Basis von Ecoinvent-Datensatz „computer production, desktop, without screen (GLO)“. Auch ein Desktop-PC besteht aus Gehäuse und elektronischen Komponenten, die darin montiert werden. Es wird angenommen, dass der Aufwand nicht von der Größe abhängt
Verpackung	[kg]	-	Annahme		vernachlässigt
Transport (LKW) Kartenlesegerät	[tkm]	115,64		transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 (RER)	Annahme 500 km innerhalb von Deutschland
Installation vor Ort	[kWh]	2,00	Annahme	diesel, burned in building machine (GLO)	Konservativ abgeschätzt
Outputs:					
Kassenautomat	[Stück]	1,00	ablaleo AG (2017)		Masse eines Kassenautomaten inkl. Sockel: 232 kg

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
Nutzungsphase/Energiebedarf					
El. Energiebedarf Kassensautomat je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang	[kWh]	2,05E-04	fair parken GmbH	market for electricity, low voltage (DE)	Angabe vom Hersteller übermittelt von fair parken GmbH. Herstellerangaben beziehen sich auf Bedarfswerte eines Automaten pro Jahr. Energiebedarf wird hier über einen Top-Down-Ansatz berechnet. (abweichend zum Bottom-Up-Ansatz, bei den übrigen Komponenten). Installierte Anzahl berücksichtigt

Tabelle 14: Sachbilanzdaten zur Modellierung von Herstellung, Distribution, Installation, Verwertung und Nutzung des Kassenautomaten im Schranken-System.

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
Allgemeine Angaben					
Installierte Anzahl	[Stück]	4,00	fair parken GmbH	-	Für gewählten repräsentativen Parkraum 1 Kassenautomat mehr als bei Free-Flow-System, da keine Möglichkeit für Online-Zahlung
Zuweisungsfaktor je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang	-	2,85E-07	-	-	Berechnet auf Basis der Lebensdauer und Anzahl der Nutzungsvorgänge über diesen Zeitraum Installierte Anzahl berücksichtigt
Herkunftsland	-	Deutschland	fair parken GmbH	-	-
Lebensdauer	[Jahre]	15,00	(Haimerl 2016; Bezirksamt Mitte von Berlin 2024; Glumm 2023; Veranstaltergemeinschaft Lokalfunk Essen e.V. 2022; Verlag Der Tagesspiegel GmbH 2017)	-	Die Quellen weisen in Bezug auf die Lebensdauer von Parkscheinautomaten Werte von 15 bis 30 Jahre aus. Konservativ wird mit 15 Jahren gerechnet.
Herstellung, Distribution, Installation, Verwertung					
Inputs:					
Bildschirm	[Stück]	0,88	(abaleo AG 2017; Beetrionics B.V. 2025a)	market for display, liquid crystal, 17 inches (GLO); market for used liquid crystal display (GLO)	Laut Quelle LED-Display mit 38,8 cm Diagonale (15 Zoll). Ecoinvent Datensatz für 17 Zoll Display angesetzt. Wert entsprechend angepasst. Masse von Referenzbildschirm (siehe Quelle): 1 kg EoL nach Ecoinvent Datensatz
Stahl (Münzverarbeitung)	[kg]	2,76	(Bauer-Systemtechnik GmbH 2025b)	market for steel, low-alloyed (GLO); hot rolling, steel (Europe without Austria); deep drawing, steel, 3500 kN press, automode (RER);	Gewicht des Gehäuses bestimmt auf Basis der in der Quelle gegebenen Maße: 260 x 160 x 110 mm, 2 mm Oberfläche gesamt: 0,1756 m ²

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
				ferrous metal, in mixed metal scrap, Recycled Content cut-off (GLO)	Volumen gesamt: 0,0003512 m ³ -> 2,76 kg (Dichte Stahl: 7,85 g/cm ³) EoL: Recycling
Elektronische Komponenten (Münzverarbeitung)	[kg]	0,74	(Bauer-Systemtechnik GmbH 2025b)	market for electronic component, active, unspecified (GLO); market for electronic component, passive, unspecified (GLO); market for electronics scrap from control units (GLO)	Annahme: Gesamtmasse (3,5 kg) abzüglich Masse des Gehäuses Da keine genaueren Informationen, werden Durchschnittsdatsätze angesetzt. Dabei wird eine 50/50 Verteilung von aktiven und passiven Komponenten angenommen EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Geldscheinverarbeitung	[kg]	1,50	(Automatenland GmbH 2025)	market for electronic component, active, unspecified (GLO); market for electronic component, passive, unspecified (GLO); market for electronics scrap from control units (GLO)	Masse aus Quelle übernommen Maße: 238 x 94 x 97 mm Da keine genaueren Informationen, werden Durchschnittsdatsätze angesetzt. Dabei wird eine 50/50 Verteilung von aktiven und passiven Komponenten angenommen EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Ticketlesegerät	[kg]	2,15	(E.W.L. Display & Printing Solutions GmbH 2016; Fenix Invico o. J.)	market for electronic component, active, unspecified (GLO); market for electronic component, passive, unspecified (GLO); market for electronics scrap from control units (GLO)"	Das Gerät zum Einlesen der Parktickets kommt beim Schranken-System zusätzlich hinzu. Laut Quellen Masse: 1,3 kg – 3 kg -> Mittelwert: 2,15 kg Da keine genaueren Informationen, werden Durchschnittsdatsätze angesetzt. Dabei wird eine 50/50 Verteilung von aktiven und passiven Komponenten angenommen EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Kommunikation/Lautsprecher	[kg]	0,40	(Thomann GmbH 2025)	market for electronic component, passive,	Masse aus Quelle übernommen;

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
				mobile, earpiece and speaker (GLO); market for electronics scrap from control units (GLO)	EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Netzanschluss	[Stück]	1,00	(abaleo AG 2017; WSA Electronic GmbH & Co. KG o.J.)	market for power supply unit, for desktop computer (GLO); market for electronics scrap from control units (GLO)	Informationen laut Quellen: 100–230 V, 50 / 60 Hz, 100 W (500 Watt mit Heizung) (abaleo). 230V, keine Infos zur Leistung (WSA) Masse Netzteil laut angesetztem Ecoinvent-Datensatz: 1,23 kg EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Rechnereinheit	[Stück]	0,16	(TL Electronic GmbH o. J.)	market for computer, desktop, without screen (GLO); market for used desktop computer (GLO)	Rechner aus Ecoinvent-Datensatz hat Masse von 11,3 kg. Laut angegebener Quelle kann Masse von 1,8 kg angesetzt werden. Wert entsprechend angepasst EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Heizungseinheit	[kg]	1,27	(Lm-therm Elektrotechnik AG 2024)	market for aluminium, cast alloy (GLO); metal working, average for aluminium product manufacturing (RER); aluminium scrap, post-consumer, Recycled Content cut-off (GLO)	Keramische Heizscheiben, Aluminiumgehäuse. Da Massenverhältnis nicht bekannt, nur Aluminium in Modellierung berücksichtigt EoL: Recycling
Stahl (Gehäuse)	[kg]	130,35	(abaleo AG 2017)	market for steel, low-alloyed (GLO); hot rolling, steel (Europe without Switzerland); deep drawing, steel, 3500 kN press, automode (RER); ferrous metal, in mixed metal scrap, Recycled Content cut-off (GLO)	Oberfläche des Gehäuses berechnet mit den Maßen aus Quelle: 900 mm x 1900 mm x 450 mm. Ausparungen für Bildschirm, Eingabefeld etc. vernachlässigt. Annahme: 3mm Wandstärke Dichte Stahl: 7,85 g/cm³ EoL: Recycling
Pulverbeschichtung (Gehäuse)	[m²]	5,54	(abaleo AG 2017)	powder coating, steel (RER)	Berechnung der Fläche wie oben

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
Batterie	[kg]	2,40	(RTB GmbH & Co. KG 2021; V & S Vertriebs- und Service GmbH & Co. KG 2021)	market for battery, lead acid, rechargeable, stationary (GLO); scrap lead acid battery, Recycled Content cut-off (GLO)	Angaben in Quelle: 12 V, 7,2 Ah. Angaben decken sich mit typischen Werten einer Bleibatterie. Masse laut Quelle: 2,5 kg EoL: Recycling
Verkabelung	[m]	3,80	(Waskönig+Walter Kabel-Werk GmbH u. Co. KG 2017)	market for cable, unspecified (GLO); market for used cable (GLO)	Annahme: 2 x Höhe Kassenautomat für die Verkabelung der einzelnen Komponenten und Stromversorgung. Annahme 3x2,5mm, entspricht nach Quelle 0,158 kg/m -> 0,6004 kg EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Netzanschluss (Kartenlesegerät)	[Stück]	0,05	(Girard und Neunhoff 2024)	market for power supply unit, for desktop computer (GLO); market for electronics scrap from control units (GLO)	Wert aus Quelle übernommen. Ecoinvent-Datensatz: 1,23 kg/Stück, entspricht hier Masse von 68 g EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Batterie (Kartenlesegerät)	[kg]	0,03	(Girard und Neunhoff 2024)	market for battery cell, Li-ion, NMC111 (GLO); market for used Li-ion battery (GLO)	Wert aus Quelle übernommen EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Polycarbonat - Gehäuse (Kartenlesegerät)	[kg]	0,15	(Girard und Neunhoff 2024)	market for polycarbonate (RER); injection moulding (RER); market for waste plastic, mixture (DE)	Wert aus Quelle übernommen EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Polypropylen - Gehäuse (Kartenlesegerät)	[kg]	5,00E-03	(Girard und Neunhoff 2024)	market for polypropylene, granulate (GLO); injection moulding (RER); market for waste polypropylene (DE)	Wert aus Quelle übernommen EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Glasfaser verstärkter Kunststoff - Gehäuse (Kartenlesegerät)	[kg]	4,15E-03	(Girard und Neunhoff 2024)	market for glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded (GLO); market for waste plastic, mixture (DE)	Wert aus Quelle übernommen EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Versiegelung/Dichtung (Kartenlesegerät)	[kg]	0,02	(Girard und Neunhoff 2024)	market for silicone product (RER); injection moulding (RER);	Wert aus Quelle übernommen

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
				market for waste plastic, mixture (DE)	EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Display (Kartenlesegerät)	[Stück]	1,96E-03	(Girard und Neunhoff 2024)	market for display, liquid crystal, 17 inches (GLO); market for used liquid crystal display (GLO)	Wert aus Quelle übernommen. Masse laut Quelle: 10 g EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Kupfer (Kartenlesegerät)	[kg]	0,01	(Girard und Neunhoff 2024)	market for copper, cathode (GLO); metal working, average for copper product manufacturing (RER); treatment of used cable copper, cathode (GLO)	Wert aus Quelle übernommen EoL: Recycling
Printed Circuit Board (Kartenlesegerät)	[kg]	0,03	(Girard und Neunhoff 2024)	market for printed wiring board, mounted mainboard, desktop computer, Pb free (GLO); market for used printed wiring boards (GLO)	Wert aus Quelle übernommen EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Integrierte Schaltung 1 (Kartenlesegerät)	[kg]	2,58E-03	(Girard und Neunhoff 2024)	market for integrated circuit, logic type (GLO); market for electronics scrap from control units (GLO)	Wert aus Quelle übernommen EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Integrierte Schaltung 2 (Kartenlesegerät)	[kg]	3,00E-05	(Girard und Neunhoff 2024)	market for integrated circuit, memory type (GLO); market for electronics scrap from control units (GLO)	Wert aus Quelle übernommen EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Sockel/ Fundament	[kg]	86,88	(abaleo AG 2017)	market for concrete block (DE); market for waste concrete, not reinforced (Europe without Switzerland)	Masse bestimmt aus dem in Quelle gegeben Gesamtgewicht abzüglich aller übrigen Komponenten EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Wärmeenergiebedarf Montage (Kartenlesegerät)	[MJ]	4,82	(Girard und Neunhoff 2024)	market group for heat, district or industrial, natural gas (RER)	Wert aus Quelle übernommen
El. Energiebedarf Montage (Kartenlesegerät + gesamter Kassenautomat)	[kWh]	4,22	Girard & Neunhoff (2024); sowie Annahme	market for electricity, medium voltage (DE)	El. Energiebedarf für Montage Kartenlesegerät aus Quelle übernommen. El. Energiebedarf Montage Kassenautomat abgeschätzt auf Basis von Ecoinvent-Datensatz „computer production, desktop, without screen

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
					(GLO)“. Auch ein Desktop-PC besteht aus Gehäuse und elektronischen Komponenten, die darin montiert werden. Es wird angenommen, dass der Aufwand nicht von der Größe abhängt
Verpackung	[kg]	-	Annahme		vernachlässigt
Transport (LKW) Kartenlesegerät	[tkm]	116,71		transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 (RER)	Annahme 500 km innerhalb von Deutschland
Installation vor Ort	[kWh]	2,00	Annahme	diesel, burned in building machine (GLO)	Konservativ abgeschätzt
Outputs:					
Kassenautomat	[Stück]	1,00	ablaleo AG (2017)		Masse eines Kassenautomaten inkl. Sockel: 232 kg (+ 2,15 kg für Ticketlesegerät)
Nutzungsphase/Energiebedarf					
El. Energiebedarf Kassenautomat je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang	[kWh]	3,01E-04	fair parken GmbH	market for electricity, low voltage (DE)	Angabe vom Hersteller übermittelt von fair parken GmbH. Herstellerangaben beziehen sich auf Bedarfswerte eines Automaten pro Jahr. Energiebedarf wird hier über einen Top-Down- Ansatz berechnet. (abweichend zum Bottom-Up-Ansatz, bei den übrigen Komponenten). Bei Automaten für Schraken-System kommt der Energiebedarf des integrierten Ticketlesegeräts zusätzlich hinzu. Hier wird der Energiebedarf des Ticketnehmer/-gebers im Schrankenterminal angesetzt (ohne Stand- By-Energiebedarf) Installierte Anzahl berücksichtigt

Tabelle 15: Sachbilanzdaten zur Modellierung von Herstellung, Distribution, Installation, Verwertung und Nutzung des Serversystems im Free-Flow-System.

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
Allgemeine Angaben					
Installierte Anzahl	[Stück]	1,00	fair parken GmbH	-	-
Zuweisungsfaktor je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang (Free-Flow-System)	-	7,43E-12	-	-	Berechnet auf Basis des Energiebedarfs für Datenverarbeitung und -übertragung je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang und dem über die gesamte Lebensdauer anfallenden Energiebedarf Installierte Anzahl berücksichtigt
Herkunft/Herstellungsland	-	Europa	Annahme	-	-
Lebensdauer IT	[Jahre]	3,00-5,00	(Girard und Neunhoff 2024)	-	-
Lebensdauer Kühlsystem	[Jahre]	20,00	(Girard und Neunhoff 2024)	-	-
Lebensdauer Gebäude	[Jahre]	50,00	(Girard und Neunhoff 2024)	-	-
Gewichtete Lebensdauer des Systems	[Jahre]	11,50	(Girard und Neunhoff 2024)	-	-
Jährlicher Strombedarf	[kWh/Jahr]	6.000.000,00	(Girard und Neunhoff 2024)	-	-
Herstellung, Distribution, Verwertung					
Inputs:					
Stahl	[kg]	223.020,00	(Girard und Neunhoff 2024)	market for steel, low-alloyed (GLO); metal working, average for steel product manufacturing (RER); market for used industrial electronic device (CH)	Daten gelten nach Quelle für ein durchschnittliches Rechenzentrum in Deutschland EoL nach Quelle
Gusseisen	[kg]	130.980,00	(Girard und Neunhoff 2024)	market for cast iron (GLO); metal working, metal working, average for metal product manufacturing (RER); market for used industrial electronic device (CH)	Daten gelten nach Quelle für ein durchschnittliches Rechenzentrum in Deutschland EoL nach Quelle
Kupfer	[kg]	120.810,00	(Girard und Neunhoff 2024)	market for copper, cathode (GLO); metal working, average for	Daten gelten nach Quelle für ein durchschnittliches

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
				copper product manufacturing (RER);	Rechenzentrum in Deutschland
				market for used industrial electronic device (CH)	EoL nach Quelle
Aluminium	[kg]	45.780,00	(Girard und Neunhoff 2024)	market for aluminium, wrought alloy (GLO); metal working, average for aluminium product manufacturing (RER);	Daten gelten nach Quelle für ein durchschnittliches Rechenzentrum in Deutschland
				market for used industrial electronic device (CH)	EoL nach Quelle
Printed Circuit Board	[kg]	70.220,00	(Girard und Neunhoff 2024)	market for printed wiring board, mounted mainboard, desktop computer, Pb free (GLO)	Daten gelten nach Quelle für ein durchschnittliches Rechenzentrum in Deutschland
				market for used industrial electronic device (CH)	EoL nach Quelle
PVC	[kg]	30.190,00	(Girard und Neunhoff 2024)	market for polyvinylchloride, suspension polymerised (GLO); injection moulding (RER);	Daten gelten nach Quelle für ein durchschnittliches Rechenzentrum in Deutschland
				market for used industrial electronic device (CH)	EoL nach Quelle
Elastomer	[kg]	28.790,00	(Girard und Neunhoff 2024)	market for synthetic rubber (GLO); injection moulding (RER)	Daten gelten nach Quelle für ein durchschnittliches Rechenzentrum in Deutschland
				market for used industrial electronic device (CH)	EoL nach Quelle
Epoxidharz	[kg]	11.230,00	(Girard und Neunhoff 2024)	market for epoxy resin, liquid (RER); injection moulding (RER);	Daten gelten nach Quelle für ein durchschnittliches Rechenzentrum in Deutschland
				market for used industrial electronic device (CH)	EoL nach Quelle
Blei	[kg]	12.330,00	(Girard und Neunhoff 2024)	market for lead (GLO); metal working, average for metal product manufacturing (RER);	Daten gelten nach Quelle für ein durchschnittliches Rechenzentrum in Deutschland
				market for used industrial electronic device (CH)	EoL nach Quelle
Keramik	[kg]	9.550,00	(Girard und Neunhoff 2024)	market for ceramic tile (GLO); injection moulding (RER);	Daten gelten nach Quelle für ein durchschnittliches Rechenzentrum in Deutschland
				market for used industrial electronic device (CH)	EoL nach Quelle
Glasfaser	[kg]	8.750,00	(Girard und Neunhoff 2024)	market for glass fibre (GLO);	Daten gelten nach Quelle für ein durchschnittliches

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
				market for used industrial electronic device (CH)	Rechenzentrum in Deutschland EoL nach Quelle
Schwefelsäure	[kg]	5.170,00	(Girard und Neunhoff 2024)	market for sulfuric acid (RER); market for used industrial electronic device (CH)	Daten gelten nach Quelle für ein durchschnittliches Rechenzentrum in Deutschland EoL nach Quelle
Silikon	[kg]	3.980,00	(Girard und Neunhoff 2024)	market for silicone product (RER); injection moulding (RER); market for used industrial electronic device (CH)	Daten gelten nach Quelle für ein durchschnittliches Rechenzentrum in Deutschland EoL nach Quelle
Gebäude	[m²]	285,86	(Girard und Neunhoff 2024)	building construction, hall, steel construction (CH)	Daten gelten nach Quelle für ein durchschnittliches Rechenzentrum in Deutschland. Aus Gründen der Einheitlichkeit, wurde die zu berücksichtigende Fläche bereits angepasst an durchschnittliche Lebensdauer der restlichen Komponenten des Serversystems.
Outputs:					
Rechenzentrum	[Stück]	1,00			
Nutzungsphase/Energiebedarf					
El. Energiebedarf je übertragenem kByte (Mobilfunk)	[kWh/kB]	5,50E-08	(Wholegrain Digital Scamper Ltd 2024a)	-	Wert aus Quelle übernommen. Passt von Größenordnung zu Studie von EU-Kommission: Datacenter: 0,066 kWh/GB, Übertragungsnetz: 0,07 kWh/GB (Kamiya und Bertoldi 2024) sowie (Aslan et al. 2018): 0,06 kWh/GB
El. Energiebedarf je verarbeitetem kByte (zentral)	[kWh/kB]	5,90E-08	Wholegrain Digital Scamper Ltd (2024a)	-	Wert aus Quelle übernommen. Passt von Größenordnung zu Studie von EU-Kommission: Datacenter: 0,066 kWh/GB, Übertragungsnetz: 0,07 kWh/GB (Kamiya und Bertoldi 2024) sowie (Aslan et al. 2018): 0,06 kWh/GB

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
Übertragene und verarbeitete Datenmengen zum/vom Serversystem					
Übertragene Datenmenge von Router zum Server je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang	[kB]	162,68	fair parken GmbH	-	Bilddatei wird 4-mal erzeugt und zum Server gesendet
Übertragene Datenmenge von Server zum Router je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang	[kB]	0,00	fair parken	-	Keine Rückmeldung vom Server an Router
Übertragene Datenmenge von Kassenautomat zum Server je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang (wenn Bezahlung vor Ort)	[kB]	0,11	Annahme	-	1. nach Kennzeicheneingabe am Kassenautomaten (konservativ): <i>Abfrage_Parkgebühr_[K]OB-FP-2024_[Z]01-01-2024_10:30:54</i> -> 56 Byte 2. Nachdem bezahlt wurde (konservativ): <i>Parkgebühr_beahlt_[K]OB-FP-2024_[Z]01-01-2024_10:31:32</i> -> 56 Byte
Übertragene Datenmenge von Server zum Kassenautomat je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang (wenn Bezahlung vor Ort)	[kB]	0,09	Annahme	-	Nach Abfrage der Parkgebühr durch Kassenautomaten (konservativ): <i>Parkbeginn_[K]OB-FP-2024_[Z]01-01-2024_09:15:05_Parkende_[K]OB-FP-2024_[Z]01-01-2024_10:30:54</i> -> 93 Byte Annahme: Berechnung der Parkgebühr findet am Automaten statt.
Übertragene Datenmenge von Server zu KBA je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang (wenn Vertragsstrafe)	[kB]	0,46	fair parken GmbH	-	-
Übertragene Datenmenge von KBA zu Server je Parkvorgang (wenn Vertragsstrafe)	[kB]	0,46	fair parken GmbH	-	-
Summe übertragene/auf Server verarbeitete Datenmenge je	[kB]	162,87	Berechnet	-	Annahme: Übertragene Datenmenge entspricht auch der auf dem Server

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang					verarbeiteten Datenmenge Unterschiedliche Anteile der Bezahlmöglichkeiten sowie Anteil der Vertragsstrafen berücksichtigt
Energiebedarfe im Zusammenhang mit Serverbetrieb:					
Energiebedarf für Aufruf der Website bei Onlinezahlung je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang	[kWh]	4,94E-04	(Wholegrain Digital Scamper Ltd 2024b, 2024a)	-	Website wird 3-mal geladen: 1. Start des Bezahlvorgangs mit Kennzeicheneingabe 2. Anzeigen der Parkgebühr 3. Bestätigung der Zahlung -> Laut Quelle 165 kWh bei 120.000 Aufrufen (entspricht 0,001375 kWh pro Aufruf), Davon ca. 64 % für operativen Betrieb. Wert umfasst operativen Betrieb von Endgerät, Server und Datenübertragungsnetz. Der Energiebedarf verteilt sich dabei wie folgt: 22 % Datacenter, 24 % Datenübertragungsnetz und 54 % Endgerät) -> Hier wird operativer Energiebedarf für Server und Datenübertragungsnetz zusammengefasst (Rest unter "Endgerät") -> Anteil der Onlinezahlung an Zahlungsprozessen berücksichtigt
Summe el. Energiebedarf je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang Serversystem	[kWh]	5,12E-04	Berechnet	market for electricity, medium voltage (DE)	-

Tabelle 16: Sachbilanzdaten zur Modellierung von Herstellung, Distribution, Installation, Verwertung und Nutzung des Serversystems im Schranken-System.

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
Allgemeine Angaben					
Installierte Anzahl	[Stück]	1,00	fair parken GmbH	-	-
Zuweisungsfaktor je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang (Schranken-System)		5,44E-16			Berechnet auf Basis des Energiebedarfs für Datenverarbeitung und -übertragung je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang und dem über die gesamte Lebensdauer anfallenden Energiebedarf Installierte Anzahl berücksichtigt
Herkunft/Herstellungsland	-	Europa	Annahme	-	-
Lebensdauer IT	[Jahre]	3,00-5,00	(Girard und Neunhoff 2024)	-	-
Lebensdauer Kühlsystem	[Jahre]	20,00	(Girard und Neunhoff 2024)	-	-
Lebensdauer Gebäude	[Jahre]	50,00	(Girard und Neunhoff 2024)	-	-
Gewichtete Lebensdauer des Systems	[Jahre]	11,50	(Girard und Neunhoff 2024)	-	-
Jährlicher Strombedarf	[kWh/Jahr]	6.000.000,00	(Girard und Neunhoff 2024)	-	-
Herstellung, Distribution, Verwertung					
Inputs:					
Stahl	[kg]	223.020,00	(Girard und Neunhoff 2024)	market for steel, low-alloyed (GLO); metal working, average for steel product manufacturing (RER); market for used industrial electronic device (CH)	Daten gelten nach Quelle für ein durchschnittliches Rechenzentrum in Deutschland EoL nach Quelle
Gusseisen	[kg]	130.980,00	(Girard und Neunhoff 2024)	market for cast iron (GLO); metal working, metal working, average for metal product manufacturing (RER); market for used industrial electronic device (CH)	Daten gelten nach Quelle für ein durchschnittliches Rechenzentrum in Deutschland EoL nach Quelle
Kupfer	[kg]	120.810,00	(Girard und Neunhoff 2024)	market for copper, cathode (GLO); metal working, average for	Daten gelten nach Quelle für ein durchschnittliches

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
				copper product manufacturing (RER);	Rechenzentrum in Deutschland
				market for used industrial electronic device (CH)	EoL nach Quelle
Aluminium	[kg]	45.780,00	(Girard und Neunhoff 2024)	market for aluminium, wrought alloy (GLO); metal working, average for aluminium product manufacturing (RER);	Daten gelten nach Quelle für ein durchschnittliches Rechenzentrum in Deutschland
				market for used industrial electronic device (CH)	EoL nach Quelle
Printed Circuit Board	[kg]	70.220,00	(Girard und Neunhoff 2024)	market for printed wiring board, mounted mainboard, desktop computer, Pb free (GLO)	Daten gelten nach Quelle für ein durchschnittliches Rechenzentrum in Deutschland
				market for used industrial electronic device (CH)	EoL nach Quelle
PVC	[kg]	30.190,00	(Girard und Neunhoff 2024)	market for polyvinylchloride, suspension polymerised (GLO); injection moulding (RER);	Daten gelten nach Quelle für ein durchschnittliches Rechenzentrum in Deutschland
				market for used industrial electronic device (CH)	EoL nach Quelle
Elastomer	[kg]	28.790,00	(Girard und Neunhoff 2024)	market for synthetic rubber (GLO); injection moulding (RER)	Daten gelten nach Quelle für ein durchschnittliches Rechenzentrum in Deutschland
				market for used industrial electronic device (CH)	EoL nach Quelle
Epoxidharz	[kg]	11.230,00	(Girard und Neunhoff 2024)	market for epoxy resin, liquid (RER); injection moulding (RER);	Daten gelten nach Quelle für ein durchschnittliches Rechenzentrum in Deutschland
				market for used industrial electronic device (CH)	EoL nach Quelle
Blei	[kg]	12.330,00	(Girard und Neunhoff 2024)	market for lead (GLO); metal working, average for metal product manufacturing (RER);	Daten gelten nach Quelle für ein durchschnittliches Rechenzentrum in Deutschland
				market for used industrial electronic device (CH)	EoL nach Quelle
Keramik	[kg]	9.550,00	(Girard und Neunhoff 2024)	market for ceramic tile (GLO); injection moulding (RER);	Daten gelten nach Quelle für ein durchschnittliches Rechenzentrum in Deutschland
				market for used industrial electronic device (CH)	EoL nach Quelle
Glasfaser	[kg]	8.750,00	(Girard und Neunhoff 2024)	market for glass fibre (GLO);	Daten gelten nach Quelle für ein durchschnittliches

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
				market for used industrial electronic device (CH)	Rechenzentrum in Deutschland EoL nach Quelle
Schwefelsäure	[kg]	5.170,00	(Girard und Neunhoff 2024)	market for sulfuric acid (RER); market for used industrial electronic device (CH)	Daten gelten nach Quelle für ein durchschnittliches Rechenzentrum in Deutschland EoL nach Quelle
Silikon	[kg]	3.980,00	(Girard und Neunhoff 2024)	market for silicone product (RER); injection moulding (RER); market for used industrial electronic device (CH)	Daten gelten nach Quelle für ein durchschnittliches Rechenzentrum in Deutschland EoL nach Quelle
Gebäude	[m²]	285,86	(Girard und Neunhoff 2024)	building construction, hall, steel construction (CH)	Daten gelten nach Quelle für ein durchschnittliches Rechenzentrum in Deutschland. Aus Gründen der Einheitlichkeit, wurde die zu berücksichtigende Fläche bereits angepasst an durchschnittliche Lebensdauer der restlichen Komponenten des Serversystems.
Outputs:					
Rechenzentrum	[Stück]	1,00			
Nutzungsphase/Energiebedarf					
El. Energiebedarf je übertragenem kByte (Mobilfunk)	[kWh/kB]	5,50E-08	(Wholegrain Digital Scamper Ltd 2024a)	-	Wert aus Quelle übernommen. Passt von Größenordnung zu Studie von EU-Kommission: Datacenter: 0,066 kWh/GB, Übertragungsnetz: 0,07 kWh/GB (Kamiya und Bertoldi 2024) sowie (Aslan et al. 2018): 0,06 kWh/GB
El. Energiebedarf je verarbeitetem kByte (zentral)	[kWh/kB]	5,90E-08	Wholegrain Digital Scamper Ltd (2024a)	-	Wert aus Quelle übernommen. Passt von Größenordnung zu Studie von EU-Kommission: Datacenter: 0,066 kWh/GB, Übertragungsnetz: 0,07 kWh/GB (Kamiya und Bertoldi 2024) sowie (Aslan et al. 2018): 0,06 kWh/GB

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
Übertragene und verarbeitete Datenmengen zum/vom Serversystem					
Übertragene Datenmenge von Schrankenterminal (Einfahrt) zum Server je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang	[kB]	0,05	Annahme	-	Barcode (Hier Annahme Code 128 Standard) des Tickets und Zeitstempel: <i>[ID]1234567890_Parkbeginn_01-01-2024_09:15:05</i> -> 45 Byte
Übertragene Datenmenge von Server zum Schrankenterminal (Einfahrt) je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang	[kB]	0,00	Annahme	-	Keine Rückmeldung vom Server an Terminal (Einfahrt)
Übertragene Datenmenge von Kassenautomat zum Server je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang	[kB]	0,11	Annahme	-	1. nach Ticketeingabe am Kassenautomaten (konservativ): <i>Abfrage_Parkgebühr_[ID]1234567890_[Z]01.01.2024_10:30:54</i> -> 57 Byte 2. Nachdem bezahlt wurde (konservativ): <i>Parkgebühr_beahlt_[ID]1234567890_[Z]01.01.2024_10:31:32</i> -> 57 Byte
Übertragene Datenmenge von Server zum Kassenautomat je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang	[kB]	0,06	Annahme	-	Nach Abfrage der Parkgebühr durch Kassenautomaten (konservativ): <i>Parkbeginn_[ID]1234567890_[Z]01.01.2024_09:15:05_Parkende_[ID]1234567890_[Z]01.01.2024_10:30:54</i> -> 59 Byte Annahme: Berechnung der Parkgebühr findet am Automaten statt. "
Übertragene Datenmenge von Schrankenterminal (Ausfahrt) an Server je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang	[kB]	0,05	Annahme	-	Nach Ticketeingabe und Lesen des Barcodes: <i>Abfrage_Ausfahrt_[ID]1234567890_[Z]01.01.2024_10:34:15</i> -> 54 Byte"
Übertragene Datenmenge von Server an Schrankenterminal (Ausfahrt) je Bewirtschaftungs-	[kB]	0,06	Annahme	-	Nachdem Anfrage für Ausfahrt vom Ticketnehmer gestellt wurde: <i>Parkgebühr_beahlt_[ID]1234567890_[Z]01.01.2024_10:31:32</i>

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
und Abrechnungsvorgang					-> 57 Byte"
Summe übertragene/auf Server verarbeitete Datenmenge je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang	[kB]	0,33	Berechnet	-	Annahme: Übertragene Datenmenge entspricht auch der auf dem Server verarbeiteten Datenmenge
Energiebedarfe im Zusammenhang mit Serverbetrieb:					
Summe el. Energiebedarf je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang Serversystem	[kWh]	3,75E-08	Berechnet	market for electricity, medium voltage (DE)	-

Tabelle 17: Sachbilanzdaten zur Modellierung von Herstellung, Distribution, Installation, Verwertung und Nutzung der Signalanlage zur Zugangsbeschränkung im Free-Flow-System und im Schranken-System.

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
Allgemeine Angaben					
Installierte Anzahl	[Stück]	1,00	fair parken GmbH	-	1 Signalanlage im Einfahrtsbereich
Zuweisungsfaktor je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang	-	4,39E-08	-	-	Berechnet auf Basis der Lebensdauer und Anzahl der Nutzungsvorgänge über diesen Zeitraum Installierte Anzahl berücksichtigt
Herkunft/Herstellungsland	-	China	(Lamp Shining Manufacturing CO., LTD. 2024)	-	-
Lebensdauer	[h]	114.000,00	(Lamp Shining Manufacturing CO., LTD. 2024)	-	-
El. Leistungsaufnahme	[W]	60,00	(Lamp Shining Manufacturing CO., LTD. 2024)	-	Aus Quelle übernommen (konservativ)
Herstellung, Distribution, Installation, Verwertung					
Inputs:					
Aluminium	[kg]	1,59	(Lamp Shining Manufacturing CO., LTD. 2024)	market for aluminium, cast alloy (GLO); casting, aluminium, lost-wax (CA-QC); metal working, average for aluminium product manufacturing (RoW); aluminium scrap, post-consumer, Recycled Content cut-off (GLO)	Daten aus Quelle übernommen EoL: Recycling
Stahl	[kg]	0,12	(Lamp Shining Manufacturing CO., LTD. 2024)	market for steel, low-alloyed (GLO); metal working, average for steel product manufacturing (RoW); ferrous metal, in mixed metal scrap, Recycled Content cut-off (GLO)	Daten aus Quelle übernommen EoL: Recycling
Glas	[kg]	0,26	(Lamp Shining Manufacturing CO., LTD. 2024)	market for flat glass, uncoated (RoW); tempering, flat glass (RoW); waste packaging glass, unsorted, Recycled Content cut-off (GLO)	Daten aus Quelle übernommen EoL: Recycling

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
Polycarbonat	[kg]	0,09	(Lamp Shining Manufacturing CO., LTD. 2024)	market for polycarbonate (RoW); injection moulding (RoW); market for waste plastic, mixture (DE)	Daten aus Quelle übernommen EoL: Recycling
Kupfer	[kg]	0,01	(Lamp Shining Manufacturing CO., LTD. 2024)	market for copper, cathode (GLO); wire drawing, copper (RoW); treatment of used cable copper, cathode (GLO)	Daten aus Quelle übernommen EoL: Recycling
Steuergerät	[kg]	0,51	(Lamp Shining Manufacturing CO., LTD. 2024)	market for electronics, for control units (GLO); market for electronics scrap from control units (GLO)	Daten aus Quelle übernommen EoL: Recycling
Printed Circuit Board	[m²]	0,02	(Lamp Shining Manufacturing CO., LTD. 2024)	market for printed wiring board, for surface mounting, Pb free surface (GLO); market for used printed wiring boards (GLO)	Daten aus Quelle übernommen. Annahme 3 kg/m² EoL nach EcoInvent Datensatz
Dioden	[kg]	2,00E-03	(Lamp Shining Manufacturing CO., LTD. 2024)	market for light emitting diode (GLO); electronics scrap, Recycled Content cut-off (GLO)	Daten aus Quelle übernommen EoL: Recycling
Karton (Verpackung)	[kg]	0,37	(Lamp Shining Manufacturing CO., LTD. 2024)	market for corrugated board box (RoW); market for waste paperboard (DE)	Daten aus Quelle übernommen EoL nach Ecoinvent-Datensatz
EPE (Verpackung)	[kg]	0,03	(Lamp Shining Manufacturing CO., LTD. 2024)	market for polyethylene, low density, granulate (GLO); polymer foaming (RoW); market for waste plastic, mixture (DE)	Daten aus Quelle übernommen EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Transport (LKW)	[tkm]	2,13	Annahme	transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 (RoW); transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 (RER)	Annahme: Shanghai – Düsseldorf -> 300 km Vorlauf LKW, 22.000 km Containerschiff Shanghai - Hamburg, 400 km Nachlauf LKW
Transport (Containerschiff)	[tkm]	67,04	Annahme	transport, freight, sea, container ship (GLO)	Annahme: Shanghai – Düsseldorf -> 300 km Vorlauf LKW, 22.000 km Containerschiff Shanghai - Hamburg,

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
					400 km Nachlauf LKW
Installation vor Ort	[kWh]	2,00	Annahme	diesel, burned in building machine (GLO)	Konservativ abgeschätzt
Outputs:					
Signalanlage	[Stück]	1,00	-	-	-
Nutzungsphase/Energiebedarf					
El. Energiebedarf je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang	[kWh]	3,00-04	Berechnet	market for electricity, low voltage (DE)	Berechnet anhand von Betriebszeit, Leistungsaufnahme und Anzahl der Nutzungsvorgänge je Tag (installierte Anzahl berücksichtigt) Annahme: Signalanlage ist während der gesamten Öffnungszeit des Parkraums in Betrieb

Tabelle 18: Sachbilanzdaten zur Modellierung von Herstellung, Distribution, Verwertung und Nutzung des Endgeräts zur Onlinezahlung im Free-Flow-System.

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
Allgemeine Angaben					
Eingesetzte Anzahl	[Stück]	1,00	-	-	-
Zuweisungsfaktor je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang	-	2,29E-08	Berechnet	-	Berechnet auf Basis des je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang berücksichtigten Energiebedarfs und Energiedarf über gesamte Lebensdauer. Dabei ist sowohl der Anteil eingesetzter Geräte als auch der Anteil von Onlinezahlungen berücksichtigt
Herkunft/Herstellungsland	-	China	(ecoinvent Association o. J.)	-	-
Lebensdauer	[Jahre]	2,00	(Paiano et al. 2013; Prabhu N und Majhi 2023)	-	Repräsentativen Wert auf Basis der Quellen bestimmt
El. Energiebedarf pro Jahr	[kWh/Jahr]	4,23	(Girard und Neunhoff 2024)	-	Laut Quelle: 230 Ladevorgänge pro Jahr und 16,4 Wh pro Ladevorgang
Herstellung, Distribution, Verwertung					
Inputs:					
Smartphone	[Stück]	1,00	(ecoinvent Association o. J.)	market for consumer electronics, mobile device, smartphone (GLO); market for used smartphone (GLO)	Masse laut Ecoinvent-Datensatz: 163,45 g EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Verpackung	[kg]	-	Annahme		vernachlässigt
Transport (LKW)	[tkm]	0,11	Annahme	transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 (RoW); transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 (RER)	Annahme: Shanghai – Düsseldorf -> 300 km Vorlauf LKW, 22.000 km Containerschiff Shanghai - Hamburg, 400 km Nachlauf LKW
Transport (Containerschiff)	[tkm]	3,60	Annahme	transport, freight, sea, container ship (GLO)	Annahme: Shanghai – Düsseldorf -> 300 km Vorlauf LKW, 22.000 km Containerschiff Shanghai - Hamburg, 400 km Nachlauf LKW

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
Outputs:					
Smartphone	[Stück]	1,00	-	-	-
Nutzungsphase/Energiebedarf					
El. Energiebedarf je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang (Bedienung bei Onlinezahlung)	[kWh]	1,28E-04	(Wholegrain Digital Scamper Ltd 2024b, 2024a)	market for electricity, low voltage (DE)	Website wird 3-mal geladen: 1. Start des Bezahlvorgangs mit Kennzeicheneingabe 2. Anzeigen der Parkgebühr 3. Bestätigung der Zahlung --> Laut Quelle 165 kWh bei 120.000 Aufrufen (entspricht 0,001375 kWh pro Aufruf), Davon ca. 64 % für operativen Betrieb. Wert umfasst operativen Betrieb von Endgerät, Server und Datenübertragungsnetz. Der Energiebedarf verteilt sich dabei wie folgt: 22 % Datacenter, 24 % Datenübertragungsnetz und 54 % Endgerät) --> Hier wird nur der operative Energiebedarf für die Bedienung des Endgeräts berücksichtigt --> Anteil der Online-Zahlung an Zahlungsprozessen berücksichtigt (Rest unter "Serversystem")

Tabelle 19: Sachbilanzdaten zur Modellierung der Abwicklung einer Vertragsstrafe beim Free-Flow-System.

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
Allgemeine Angaben					
Anteil Vertragsstrafen	[%]	1,00	fair parken GmbH	-	-
Herstellung, Distribution, Verwertung, Nutzungsphase/Energiebedarf					
Inputs:					
Nutzung von Desktop-PC zur manuellen Halterermittlung je Parkvorgang	[h]	0,08	Annahme	operation, computer, desktop, with liquid crystal display, active mode (Europe without Switzerland)	Annahme: Mitarbeiter bei KBA führt Halterermittlung manuell durch und benötigt hierfür 5 min. Anteil Vertragsstrafen hier noch nicht berücksichtigt
Brief (bedruckt)	[kg]	5,00E-03	(ecoinvent Association o. J.)	operation, printer, laser, black/white, per kg printed paper (Europe without Switzerland); market for waste graphical paper (DE)	Laut angesetztem Ecoinvent-Datensatz können 5 g für eine Seite bedrucktes Papier angesetzt werden. EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Papier (Briefumschlag)	[kg]	4,50E-03	Eigene Messungen	market for paper, woodfree, uncoated (RER); market for waste graphical paper (DE)	Briefumschlag mit Fenster. Masse durch eigene Messungen bestimmt
Fenster (Briefumschlag)	[kg]	3,00E-04	Eigene Messungen	market for polyethylene, low density, granulate (GLO); Injection moulding (RER); market for waste polyethylene (DE)	Briefumschlag mit Fenster. Masse durch eigene Messungen bestimmt
El. Energie Herstellung Brief/Briefumschlag	[kWh]	-	Annahme	-	Es wird angenommen, dass der el. Energiebedarf im Herstellungsprozess durch die verwendeten Ecoinvent-Datensätze bereits ausreichend abgebildet wird
Verpackung	[kg]	-	-	-	Es wird keine weitere Verpackung benötigt
Transport (Zustellung Brief mit Postfahrzeug)	[tkm]	2,94E-03	Annahme	transport, freight, light commercial vehicle (Europe without Switzerland)	Annahme: Zustellentfernung 300 km innerhalb von Deutschland
Outputs:					
Vertragsstrafe, abgewickelt	[Stück]	1,00	-	-	-

Tabelle 20: Sachbilanzdaten zur Modellierung der Herstellung, Distribution und Verwertung der Zahlungsquittung beim Free-Flow-System und beim Schranken-System.

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
Allgemeine Angaben					
Anteil Ausdruck der Zahlungsquittung (Bei Zahlung vor Ort am Automaten)	[%]	49,00	(YouGov PLC 2019)	-	Statistiken zum Ausdruck der Zahlungsquittungen im Parkraum-Kontext konnten nicht identifiziert werden. Es werden Werte für den Anteil im Supermarkt als Referenz angesetzt.
Herkunft/Herstellungsland	-	Deutschland	Annahme	-	-
Herstellung, Distribution, Verwertung					
Inputs:					
Papier	[kg]	1,38E-03	Eigene Messung sowie (Eckardt et al. 2020)	market for paper, woodcontaining, supercalendered (RER); market for waste graphical paper (DE)	Masse berechnet aus Gesamtmasse abzüglich der übrigen Komponenten EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Farbentwickler	[kg]	1,85E-05	(Eckardt et al. 2020)	market for chemical, organic (GLO); market for waste plastic, mixture (DE)	Masse aus Quelle übernommen EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Sensibilisatoren	[kg]	2,80E-06	(Eckardt et al. 2020)	market for chemical, organic (GLO); market for waste plastic, mixture (DE)	Masse aus Quelle übernommen EoL nach Ecoinvent-Datensatz
El. Energie Herstellung Zahlungsquittung	[kWh]	-	Annahme	-	Es wird angenommen, dass der el. Energiebedarf im Herstellungsprozess durch die verwendeten Ecoinvent-Datensätze bereits ausreichend abgebildet wird
Verpackung	[kg]	-	Annahme	-	vernachlässigt
Transport (LKW)	[tkm]	7,00E-04		transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 (RER)	Annahme: 500 km innerhalb von Deutschland
Outputs:					
Zahlungsquittung	[Stück]	1,00	Eigene Messungen	-	Nach eigenen Messungen werden je Quittung 1,4 g angesetzt
Nutzungsphase/Energiebedarf					
-	-	-	-	-	-

Tabelle 21: Sachbilanzdaten zur Modellierung der Herstellung, Distribution und Verwertung des Parktickets beim Schranken-System.

Input/Output Flüsse	Einheit	Wert	Quelle	Datensatz	Bemerkung
Allgemeine Angaben					
Herkunft/Herstellungsland	-	Deutschland	Annahme	-	-
Herstellung, Distribution, Verwertung					
Inputs:					
Papier	[kg]	7,92E-04	Eigene Messung sowie (Eckardt et al. 2020)	market for paper, woodcontaining, supercalendered (RER); market for waste graphical paper (DE)	Masse berechnet aus der gemessenen Gesamtmasse abzüglich der übrigen Komponenten EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Farbentwickler	[kg]	6,00E-06	(Eckardt et al. 2020)	market for chemical, organic (GLO); market for waste plastic, mixture (DE)	Masse aus Quelle übernommen EoL nach Ecoinvent-Datensatz
Sensibilisatoren	[kg]	1,60E-06	(Eckardt et al. 2020)	market for chemical, organic (GLO); market for waste plastic, mixture (DE)	Masse aus Quelle übernommen EoL nach Ecoinvent-Datensatz
El. Energie Herstellung Zahlungsquittung	[kWh]	-	Annahme	-	Es wird angenommen, dass der el. Energiebedarf im Herstellungsprozess durch die verwendeten Ecoinvent-Datensätze bereits ausreichend abgebildet wird
Verpackung	[kg]	-	Annahme	-	vernachlässigt
Transport (LKW)	[tkm]	4,00E-04		transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 (RER)	Annahme: 500 km innerhalb von Deutschland
Outputs:					
Parkticket	[Stück]	1,00	Eigene Messungen	-	Nach eigenen Messungen werden je Ticket 0,8 g angesetzt
Nutzungsphase/Energiebedarf					
-	-	-	-	-	-

Tabelle 22: Wirkungsabschätzungsergebnisse Schranken-System.

Ergebnisbezeichnung	Einheit	»Basis«-Szenario	»Dichter-Verkehr«-Szenario	»Großveranstaltung«-Szenario	»Digitale-Zahlung«-Szenario
Nettotreibhausgas-mengen – total / Carbon Footprint	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang]	2,54E-02	5,76E-02	1,54E+00	1,69E-02
Herkunft der Nettotreibhausgas-mengen (Darstellung nach ISO 14067):					
Emittierte Nettotreibhausgas-mengen aus der Luftfahrt	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang]	1,70E-09	2,03E-09	1,74E-08	1,70E-09
Emittierte Nettotreibhausgas-mengen aus biogenen Rohstoffen	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang]	3,97E-03	4,26E-03	1,78E-02	3,97E-03
Entzogene Nettotreibhausgas-mengen aus biogenen Rohstoffen	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang]	3,78E-03	3,99E-03	1,35E-02	3,78E-03
Emittierte Nettotreibhausgas-mengen aus fossilen Rohstoffen	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang]	2,52E-02	5,73E-02	1,53E+00	1,67E-02
Emittierte Nettotreibhausgas-mengen infolge der direkten Landnutzungsänderung	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang]	1,07E-05	1,84E-05	3,70E-04	1,07E-05
Beitragsanalyse Lebenszyklusabschnitte:					
Nettotreibhausgas-mengen durch PKW-Fahrt im Ein- und Ausfahrtsbereich	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang]	1,07E-02	4,29E-02	1,52E+00	1,07E-02
Nettotreibhausgas-mengen durch Bargeldtransaktion	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang]	9,53E-03	9,53E-03	9,53E-03	-
Nettotreibhausgas-mengen durch Herstellung, Distribution, Installation und Verwertung der Kassenautomaten	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang]	1,09E-03	1,09E-03	1,09E-03	1,09E-03
Nettotreibhausgas-mengen durch Herstellung, Distribution und Verwertung der Parktickets	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang]	1,02E-03	1,02E-03	1,02E-03	1,02E-03
Nettotreibhausgas-mengen durch digitale Transaktion	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang]	9,05E-04	9,05E-04	9,05E-04	1,96E-03
Nettotreibhausgas-mengen durch Herstellung,	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs-	8,86E-04	8,86E-04	8,86E-04	8,86E-04

Ergebnisbezeichnung	Einheit	»Basis«-Szenario	»Dichter-Verkehr«-Szenario	»Großveranstaltung«-Szenario	»Digitale-Zahlung«-Szenario
Distribution und Verwertung der Zahlungsquittung	und Abrechnungsvorgang]				
Nettotreibhausgasmengen durch operativen Energiebedarf der Parkrauminfrastruktur	[kg CO ₂ -Äq./Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang]	5,98E-04	5,98E-04	5,98E-04	5,98E-04
Nettotreibhausgasmengen durch Herstellung, Distribution, Installation und Verwertung des Schrankenterminals	[kg CO ₂ -Äq./Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang]	3,75E-04	3,75E-04	3,75E-04	3,75E-04
Nettotreibhausgasmengen durch Herstellung, Distribution, Installation und Verwertung der Schrankeneinheit	[kg CO ₂ -Äq./Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang]	2,44E-04	2,44E-04	2,44E-04	2,44E-04
Nettotreibhausgasmengen durch Herstellung, Distribution, Installation und Verwertung des Schrankenbaums	[kg CO ₂ -Äq./Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang]	6,31E-05	6,31E-05	6,31E-05	6,31E-05
Nettotreibhausgasmengen durch Herstellung, Distribution, Installation und Verwertung der Signalanlage	[kg CO ₂ -Äq./Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang]	4,18E-06	4,18E-06	4,18E-06	4,18E-06
Nettotreibhausgasmengen durch Herstellung, Distribution, Installation und Verwertung des Serversystems	[kg CO ₂ -Äq./Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang]	1,07E-08	1,07E-08	1,07E-08	1,07E-08

Tabelle 23: Wirkungsabschätzungsergebnisse Free-Flow-System.

Ergebnisbezeichnung	Einheit	»Basis«-Szenario	»Dichter-Verkehr«-Szenario	»Großveranstaltung«-Szenario	»Digitale-Zahlung«-Szenario
Nettotreibhausgas-mengen – total / Carbon Footprint	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang]	1,76E-02	2,94E-02	6,21E-01	1,00E-02
Herkunft der Nettotreibhausgas-mengen (Darstellung nach ISO 14067):					
Emittierte Nettotreibhausgas-mengen aus der Luftfahrt	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang]	9,71E-10	1,26E-09	1,46E-08	9,71E-10
Emittierte Nettotreibhausgas-mengen aus biogenen Rohstoffen	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang]	2,00E-03	2,16E-03	9,39E-03	2,00E-03
Entzogene Nettotreibhausgas-mengen aus biogenen Rohstoffen	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang]	1,87E-03	2,01E-03	8,30E-03	1,87E-03
Emittierte Nettotreibhausgas-mengen aus fossilen Rohstoffen	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang]	1,75E-02	2,92E-02	6,20E-01	9,88E-03
Emittierte Nettotreibhausgas-mengen infolge der direkten Landnutzungsänderung	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang]	6,97E-06	1,23E-05	2,62E-04	6,97E-06
Beitragsanalyse Lebenszyklusabschnitte:					
Nettotreibhausgas-mengen durch PKW-Fahrt im Ein- und Ausfahrtsbereich	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang]	5,42E-03	1,72E-02	6,09E-01	5,42E-03
Nettotreibhausgas-mengen durch Bargeldtransaktion	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang]	8,58E-03	8,58E-03	8,58E-03	-
Nettotreibhausgas-mengen durch digitale Transaktion	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang]	1,01E-03	1,01E-03	1,01E-03	1,96E-03
Nettotreibhausgas-mengen durch Herstellung, Distribution und Verwertung der Zahlungsquittung	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang]	7,97E-04	7,97E-04	7,97E-04	7,97E-04
Nettotreibhausgas-mengen durch operativen Energiebedarf der Parkrauminfrastruktur	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang]	6,30E-04	6,30E-04	6,30E-04	6,30E-04
Nettotreibhausgas-mengen durch Herstellung, Distribution, Installation	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs-	5,08E-04	5,08E-04	5,08E-04	5,08E-04

Ergebnisbezeichnung	Einheit	»Basis«-Szenario	»Dichter-Verkehr«-Szenario	»Großveranstaltung«-Szenario	»Digitale-Zahlung«-Szenario
und Verwertung der Kassenautomaten	und Abrechnungsvorgang]				
Nettotreibhausgasmeng en durch Herstellung, Distribution, Installation und Verwertung des Schaltschranks	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang]	2,63E-04	2,63E-04	2,63E-04	2,63E-04
Nettotreibhausgasmeng en durch Abwicklung der Vertragsstrafen	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang]	2,75E-04	2,75E-04	2,75E-04	2,75E-04
Nettotreibhausgasmeng en durch Herstellung, Distribution, Installation und Verwertung des Serversystems	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang]	1,46E-04	1,46E-04	1,46E-04	1,46E-04
Nettotreibhausgasmeng en durch Herstellung, Distribution, Installation und Verwertung der Kameras	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang]	1,07E-05	1,07E-05	1,07E-05	1,07E-05
Nettotreibhausgasmeng en durch Herstellung, Distribution, Installation und Verwertung der Signalanlage	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang]	4,18E-06	4,18E-06	4,18E-06	4,18E-06
Nettotreibhausgasmeng en durch Herstellung, Distribution, Installation und Verwertung des Masts	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang]	1,67E-06	1,67E-06	1,67E-06	1,67E-06
Nettotreibhausgasmeng en durch Durchführung der Onlinezahlung (Bedienung Endgerät)	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang]	9,27E-07	9,27E-07	9,27E-07	9,27E-07

Tabelle 24: Darstellung der einflussreichsten Treibhausgasemissionen (Beitrag >1 %) für unterschiedliche Szenarien.

Treibhausgasemission	Einheit	Schranken-System	Free-Flow-System
»Basis«-Szenario:			
Carbon dioxide, fossil	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungs- vorgang]	2,36E-02	1,66E-02
Methane, fossil	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungs- vorgang]	1,39E-03	7,43E-04
Carbon dioxide, non-fossil	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungs- vorgang]	3,68E-03	1,83E-03
Carbon dioxide, non-fossil, resource correction	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungs- vorgang]	-6,02E-04	-2,93E-04
Carbon dioxide, in air	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungs- vorgang]	-3,18E-03	-1,58E-03
»Dichter-Verkehr«-Szenario:			
Carbon dioxide, fossil	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungs- vorgang]	5,22E-02	2,70E-02
Methane, fossil	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungs- vorgang]	4,51E-03	1,92E-03
Carbon dioxide, non-fossil	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungs- vorgang]	3,86E-03	1,93E-03
Carbon dioxide, non-fossil, resource correction	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungs- vorgang]	-6,47E-04	-3,13E-04
Carbon dioxide, in air	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungs- vorgang]	-3,34E-03	-1,69E-03
»Großveranstaltung«-Szenario:			
Carbon dioxide, fossil	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungs- vorgang]	1,37E+00	5,51E-01
Methane, fossil	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs-	1,48E-01	6,11E-02

Treibhausgasemission	Einheit	Schranken-System	Free-Flow-System
	und Abrechnungs- vorgang]		
»Digitale-Zahlung«-Szenario:			
Carbon dioxide, fossil	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungs- vorgang]	1,51E-02	9,00E-03
Methane, fossil	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungs- vorgang]	1,39E-03	7,43E-04
Carbon dioxide, non-fossil	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungs- vorgang]	3,68E-03	1,83E-03
Carbon dioxide, non-fossil, resource correction	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungs- vorgang]	-6,02E-04	-2,93E-04
Carbon dioxide, in air	[kg CO ₂ -Äq./ Bewirtschaftungs- und Abrechnungs- vorgang]	-3,18E-03	-1,58E-03

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Ablauf eines Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgangs für die Parkraumnutzung beim Schranken-System.....	6
Abbildung 2:	Ablauf eines Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgangs für die Parkraumnutzung beim Free-Flow-System.....	7
Abbildung 3:	Wahl der Systemgrenzen	8
Abbildung 4:	Berücksichtigter Fahrzeug-Flottenmix für die Situation in Deutschland 2024. (k: klein, m: mittel, g: groß)	21
Abbildung 5:	Schematische Darstellung der Berechnung von Kraftstoffverbrauch/Energiebedarf über die vier Phasen je Intervall 22	
Abbildung 6:	Gegenüberstellung der potenziellen Klimawirkung je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang für beide Parkraumbewirtschaftungskonzepte im »Basis«-Szenario (H: Herstellung, D: Distribution, I: Installation, E: End of Life).	28
Abbildung 7:	Gegenüberstellung des operativen Energiebedarfs für die Parkrauminfrastruktur.....	30
Abbildung 8:	Gegenüberstellung der potenziellen Klimawirkung je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang für beide Parkraumbewirtschaftungskonzepte im »Dichter-Verkehr«-Szenario.....	32
Abbildung 9:	Gegenüberstellung der potenziellen Klimawirkung je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang für beide Parkraumbewirtschaftungskonzepte im »Großveranstaltung«-Szenario.	34
Abbildung 10:	Gegenüberstellung der potenziellen Klimawirkung je Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang für beide Parkraumbewirtschaftungskonzepte im »Digitale-Zahlung«-Szenario.	35

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Verwendete Ecoinvent-Datensätze zur Modellierung der potenziellen Klimawirkung aus der PKW-Fahrt im Ein- und Ausfahrtsbereich eines Parkraums (ecoinvent Association o. J.).	20
Tabelle 2:	Zusammenfassung des berechneten Kraftstoffverbrauchs/Energiebedarfs der PKW je Fahrzeugklasse und Szenario.	26
Tabelle 3:	Daten und Annahmen zum Parkraumdesign sowie relevante Daten zum Bezahlvorgang.	56
Tabelle 4:	Angesetzte Modellwerte je Phase eines Intervalls zur Modellierung des Stop-and-Go-Verkehrs (Schranken-System).	57
Tabelle 5:	Annahmen zur Konstantfahrt (ohne Stau) beim Free-Flow-System für unterschiedliche Szenarien ¹	57
Tabelle 6:	Modellparameter zur Berechnung des Kraftstoffverbrauchs/Energiebedarfs für unterschiedliche Fahrzeugklassen.	58
Tabelle 7:	Sachbilanzdaten zur Modellierung von Herstellung, Distribution, Installation, Verwertung und Nutzung der Kamera im Free-Flow-System (System zur Kennzeichenerfassung).	59
Tabelle 8:	Sachbilanzdaten zur Modellierung von Herstellung, Distribution, Installation, Verwertung und Nutzung des Schaltschranks inklusive Router im Free-Flow-System (System zur Kennzeichenerfassung).	64
Tabelle 9:	Sachbilanzdaten zur Modellierung von Herstellung, Distribution, Installation, Verwertung und Nutzung des Masts im Free-Flow-System (System zur Kennzeichenerfassung).	69
Tabelle 10:	Sachbilanzdaten zur Modellierung von Herstellung, Distribution, Installation, Verwertung und Nutzung der Schrankeneinheit im Schranken-System (Schrankenanlage).	70
Tabelle 11:	Sachbilanzdaten zur Modellierung von Herstellung, Distribution, Installation, Verwertung und Nutzung des Schrankenbaums im Schranken-System (Schrankenanlage).	73
Tabelle 12:	Sachbilanzdaten zur Modellierung von Herstellung, Distribution, Installation, Verwertung und Nutzung des Schrankenterminals im Schranken-System (Schrankenanlage).	75
Tabelle 13:	Sachbilanzdaten zur Modellierung von Herstellung, Distribution, Installation, Verwertung und Nutzung des Kassenautomaten im Free-Flow-System.	79
Tabelle 14:	Sachbilanzdaten zur Modellierung von Herstellung, Distribution, Installation, Verwertung und Nutzung des Kassenautomaten im Schranken-System.	85
Tabelle 15:	Sachbilanzdaten zur Modellierung von Herstellung, Distribution, Installation, Verwertung und Nutzung des Serversystems im Free-Flow-System.	91

Tabelle 16:	Sachbilanzdaten zur Modellierung von Herstellung, Distribution, Installation, Verwertung und Nutzung des Serversystems im Schranken-System.....	96
Tabelle 17:	Sachbilanzdaten zur Modellierung von Herstellung, Distribution, Installation, Verwertung und Nutzung der Signalanlage zur Zugangsbeschränkung im Free-Flow-System und im Schranken-System.	101
Tabelle 18:	Sachbilanzdaten zur Modellierung von Herstellung, Distribution, Verwertung und Nutzung des Endgeräts zur Onlinezahlung im Free-Flow-System.....	104
Tabelle 19:	Sachbilanzdaten zur Modellierung der Abwicklung einer Vertragsstrafe beim Free-Flow-System.	106
Tabelle 20:	Sachbilanzdaten zur Modellierung der Herstellung, Distribution und Verwertung der Zahlungsquittung beim Free-Flow-System und beim Schranken-System.	107
Tabelle 21:	Sachbilanzdaten zur Modellierung der Herstellung, Distribution und Verwertung des Parktickets beim Schranken-System.	108
Tabelle 22:	Wirkungsabschätzungsergebnisse Schranken-System.....	109
Tabelle 23:	Wirkungsabschätzungsergebnisse Free-Flow-System.	111
Tabelle 24:	Darstellung der einflussreichsten Treibhausgasemissionen (Beitrag >1 %) für unterschiedliche Szenarien.....	113

Literatur

abaleo AG (2017): Datenblatt Kassenautomat. KA 4000 B / KA 4000 C. Online verfügbar unter <https://abaleo.de/wp-content/uploads/2020/04/Datenblatt-abaleo-KA-4000-DE-1.pdf>, zuletzt geprüft am 22.05.2025.

ACOTEC GmbH (2020): Schranke "S3-5FU". Online verfügbar unter https://www.acotec.de/Datenblatt/d_schranken/D20_Schranke_S3-5FU_SG.pdf, zuletzt geprüft am 26.09.24.

ADAC (2021): Kältetest E-Auto: Wie lange halten Elektroautos im Stau durch? Online verfügbar unter <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/elektroauto/haertetest-winter-stau/>, zuletzt geprüft am 08.12.2024.

ADAC (2023a): ADAC warnt vor dauerhafter Start-Stopp-Abschaltung. Online verfügbar unter <https://presse.adac.de/meldungen/adac-ev/technik/adac-warnt-vor-dauerhafter-start-stop-abschaltung.html>, zuletzt geprüft am 08.05.2025.

ADAC (2023b): Sprit sparen: Die 11 besten Tipps. Online verfügbar unter <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/tipps-zum-tanken/sprit-sparen-tipps/>, zuletzt geprüft am 30.06.2024.

ADAC (2024a): E-Autos gewinnen bis zu 40 Prozent Energie zurück. Online verfügbar unter <https://presse.adac.de/meldungen/adac-ev/technik/e-autos-gewinnen-bis-zu-40-prozent-energie-zurueck.html>, zuletzt geprüft am 07.12.2024.

ADAC (2024b): Start-Stopp-Automatik: So arbeitet die Spritspar-Technik. Online verfügbar unter <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/ausstattung-technik-zubehoer/ausstattung/start-stop-automatik/>, zuletzt geprüft am 08.05.2025.

Aslan, Joshua; Mayers, Kieren; Koomey, Jonathan G.; France, Chris (2018): Electricity Intensity of Internet Data Transmission: Untangling the Estimates. In: *J of Industrial Ecology* 22 (4), S. 785–798. DOI: 10.1111/jiec.12630.

Attas GmbH (2023): Einbaudaten Schrankenanlage BS 50 / BS 60. Online verfügbar unter https://www.attashop.de/media/69/ab/1d/1718960335/einbaudaten_schranken_bs50_bs60_deu.pdf?ts=1718960335, zuletzt geprüft am 26.09.24.

Automatenland GmbH (2025): S7A Banknotenleser. Online verfügbar unter <https://automatenland.shop/policies/legal-notice>, zuletzt geprüft am 23.05.2025.

Automatic Systems IER Group (2018): BL44-FT-DE-08. Online verfügbar unter <https://www.automatic-systems.com/ier-content/uploads/sites/14/2018/03/bl44-ft-de-8.pdf>, zuletzt geprüft am 26.09.24.

Axis Communications AB (2025): AXIS P1455-LE Network Camera. Vielseitige, funktionsreiche Überwachung in 2 MP. Online verfügbar unter <https://www.axis.com/dam/public/6a/e6/fd/datasheet-axis-p1455-le-network-camera-de-DE-476974.pdf>, zuletzt geprüft am 04.06.2025.

B.I.G - Batterie-Industrie-Germany GmbH (o. J.): Start Stopp Batterien. Ihr Ratgeber rund um EFB- und AGM - Start Stopp Batterien. Online verfügbar unter

<https://www.batterie-industrie-germany.de/collections/start-stopp-batterien>, zuletzt geprüft am 08.05.2025.

BAFA (2024): Merkblatt zur Ermittlung des Gesamtendenergieverbrauchs. Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle. Online verfügbar unter https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/ea_ermittlung_gesamtenergieverbrauch.pdf?__blob=publicationFile&v=8, zuletzt geprüft am 26.11.2024.

Banner GmbH (o. J.): Start-Stopp-System. Start-Stopp ist Top, kein Flop! Wie Funktioniert es. Online verfügbar unter <https://www.bannerbatterien.com/de-ch/Batteriewissen/6-Start-Stopp-Technologie>, zuletzt geprüft am 08.05.2025.

Barth, Matthew; Boriboonsomsin, Kanok (2009): Traffic Congestion and Greenhouse Gases 1 (35), S. 2–9. Online verfügbar unter <https://escholarship.org/uc/item/3vz7t3db#main>, zuletzt geprüft am 26.11.2024.

Bauer-Systemtechnik GmbH (2025a): Fertigfundament (1) 80x50x40cm mit Kabelleerrohre. Online verfügbar unter <https://www.torautomatik-shop.de/Fertigfundament-1-80x50x40cm-mit-Kabelleerrohre>, zuletzt geprüft am 28.05.2025.

Bauer-Systemtechnik GmbH (2025b): Münzautomat BS-B-82 EMP - 230V mit elektronischem Münzprüfer. Online verfügbar unter <https://www.torautomatik-shop.de/Muenzautomat-BS-B-82-EMP-230V-mit-elektronischem-Muenzpruefer>, zuletzt geprüft am 22.05.2025.

Bauer-Systemtechnik GmbH (2025c): Schranke Moovi 30RMM mit Schrankenbaum 3m. Online verfügbar unter <https://www.torautomatik-shop.de/BFT-Schranke-Moovi-30RMM-mit-Schrankenbaum-3m>, zuletzt geprüft am 28.05.2025.

Bebarmatic Parksysteme GmbH (2020): Einfahrtterminal Platinum Modular. Online verfügbar unter https://www.bebarmatic.de/fileadmin/user_upload/resources/bebarmatic.de/downloads/produkte/parksysteme/PlatinumModularEinfahrtterminal.pdf, zuletzt geprüft am 28.05.2025.

Bebarmatic Parksysteme GmbH (2024): Parkschranke PS Platinum. Online verfügbar unter https://www.bebarmatic.de/fileadmin/user_upload/resources/bebarmatic.de/downloads/produkte/schranken/parkschranke_ps_platinum/Schranke_PS_Platinum.pdf, zuletzt geprüft am 26.09.24.

Beetronics B.V. (2025a): 15 Zoll Monitor. Online verfügbar unter <https://www.beetronics.de/15-zoll-monitor>, zuletzt geprüft am 23.05.2025.

Beetronics B.V. (2025b): 7 Zoll Monitor Metall. Online verfügbar unter https://www.beetronics.de/datasheets/product/35?_gl=1*1r6fo36*_up*MQ.*_gs*MQ.&gclid=CjwKCAjw6NrBBhB6EiwAvnT_rmtngSlpKWIGfeqNNWLViYbGL6nkjdjX6hI2hYmLV6kpG9yhR-BLp9hoCE4lQAvD_BwE, zuletzt geprüft am 28.05.2025.

Ben-Chaim, Michael; Shmerling, Efraim; Kuperman, Alon (2013): Analytic Modeling of Vehicle Fuel Consumption. In: *Energies* 6 (1), S. 117–127. DOI: 10.3390/en6010117.

Bezirksamt Mitte von Berlin (2024): 600 neue Parkscheinautomaten werden in 14 Parkzonen installiert. Online verfügbar unter <https://www.berlin.de/ba->

mitte/aktuelles/pressemitteilungen/2024/pressemitteilung.1468929.php?, zuletzt geprüft am 12.06.2025.

Geheimhaltungsbedürftige Daten zu elektronischen Komponenten

Bishop, Justin D.K.; Martin, Niall P.D.; Boies, Adam M. (2014): Cost-effectiveness of alternative powertrains for reduced energy use and CO₂ emissions in passenger vehicles. In: *Applied Energy* 124, S. 44–61. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.02.019.

BMUV (2021): Effizienz und Kosten: Lohnt sich der Betrieb eines Elektroautos? Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. Online verfügbar unter <https://www.bmuv.de/themen/verkehr/elektromobilitaet/effizienz-und-kosten>, zuletzt geprüft am 22.10.2024.

BMUV (2024): Kohlenstoffdioxid-Fußabdruck pro Kopf in Deutschland. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. Online verfügbar unter <https://www.bmuv.de/media/kohlenstoffdioxid-fussabdruck-pro-kopf-in-deutschland>, zuletzt geprüft am 06.11.2024.

Bohmeyer & Schuster GmbH (2024): 2 Rollen reflektierende Warnmarkierung, jeweils links- und rechtsweisend. Online verfügbar unter https://www.schilderversand.com/p/zwei-rollen-reflektierende-warnmarkierung-links-und-rechtsweisend-26844?source=googleps&variant=420.11.114&gad_source=1, zuletzt geprüft am 26.09.24.

Bosch, Robert; Bruck, Christian (2025): Umfrage zum Zahlungsverhalten: Jeder Dritte würde den Digitalen Euro nutzen. Online verfügbar unter <https://www.bearingpoint.com/de-de/publikationen-and-events/publikationen/umfrage-zum-zahlungsverhalten-2025/>, zuletzt geprüft am 07.07.2025.

Breuer, Stefan; Rohrbach-Kerl, Andrea (2015): Fahrzeugdynamik. Mechanik des bewegten Fahrzeugs. Wiesbaden: Springer Vieweg (ATZ / MTZ-Fachbuch).

Chester, Mikhail; Horvath, Arpad; Madanat, Samer (2010): Parking infrastructure: energy, emissions, and automobile life-cycle environmental accounting. In: *Environ. Res. Lett.* 5 (3), S. 34001. DOI: 10.1088/1748-9326/5/3/034001.

Geheimhaltungsbedürftige Daten zu elektronischen Komponenten

Clarios Deutschland GmbH & Co. KG (o. J.): Start-Stopp funktioniert nicht. Online verfügbar unter <https://www.varta-automotive.com/de-de/knowledge/articles/article-details/start-stopp-funktioniert-nicht>, zuletzt geprüft am 08.05.2025.

Geheimhaltungsbedürftige Daten zu elektronischen Komponenten

Geheimhaltungsbedürftige Daten zu elektronischen Komponenten

Cruz, Luís; Barata, Eduardo; Ferreira, João-Pedro; Freire, Fausto (2017): Greening transportation and parking at University of Coimbra. In: *IJSHE* 18 (1), S. 23–38. DOI: 10.1108/IJSHE-04-2015-0069.

Dallmeyer, Jörg; Taubert, Carsten; Lattner, Anderas D.; Timm, Ingo J. (2012): Fuel Consumption and Emission Modeling for Urban Scenarios. In: Klaus G. Troitzsch (Hg.): *Proceedings / 26th European Conference on Modelling and Simulation, EMCS 2012*. May 29th - June 1st, 2012, Koblenz, Germany. S.l.: ECMS.

Geheimhaltungsbedürftige Daten zu elektronischen Komponenten

Deutsche Bundesbank (2023): Zahlungsverhalten in Deutschland 2023. Online verfügbar unter <https://www.bundesbank.de/resource/blob/934826/e5e733f971a22ea9d7e7e70953ca2dea/472B63F073F071307366337C94F8C870/zahlungsverhalten-in-deutschland-2023-data.pdf>, zuletzt geprüft am 07.07.2025.

Deutsche Bundesbank (2024): Studie der Bundesbank zum Zahlungsverhalten. Bargeldloses Bezahlen gewinnt weiter an Bedeutung. Online verfügbar unter https://www.bundesbank.de/de/aufgaben/unbarer-zahlungsverkehr/veroeffentlichungen/newsletter/studie-der-bundesbank-zum-zahlungsverhalten-941082?utm_source, zuletzt geprüft am 07.07.2025.

E.W.L. Display & Printing Solutions GmbH (2016): USTOM Ticket - Drucker PP54. Online verfügbar unter https://www.ewl-dps.de/fileadmin/user_upload/Produkte/Bon-Kassendrucker/Ticket_Drucker/PP54/PP54_n1.indd.pdf, zuletzt geprüft am 28.05.2025.

Eckardt, Martin; Kubicova, Marie; Tong, Duyen; Simat, Thomas J. (2020): Determination of color developers replacing bisphenol A in thermal paper receipts using diode array and Corona charged aerosol detection-A German market analysis 2018/2019. In: *Journal of chromatography. A* 1609, S. 460437. DOI: 10.1016/j.chroma.2019.460437.

ecoinvent Association (o. J.): ecoinvent. Online verfügbar unter <https://ecoinvent.org/>, zuletzt geprüft am 08.10.24.

ecoinvent Association (2024): System Models. Online verfügbar unter <https://support.ecoinvent.org/system-models>, zuletzt geprüft am 21.10.2024.

Ernst B. Gausmann GmbH (o. J.): Elektrische Schranken für Parkplätze oder Grundstücke. Online verfügbar unter <https://www.gausmann.com/elektrische-schranken/>, zuletzt geprüft am 10.06.2025.

Ernst B. Gausmann GmbH (2021): Gausmann – Sicherheit Erleben – Produktkatalog. Online verfügbar unter <https://www.gausmann.com/wp-content/uploads/2021/10/GausmannKatalog-2021.pdf>, zuletzt geprüft am 26.09.24.

European Central Bank (2024): Study on the payment attitudes of consumers in the euro area (SPACE). Frankfurt am Main: European Central Bank.

fair parken GmbH (o. J.): FreeFlow – Gebühren-pflichtige Parkraum-systeme mit Kennzeichen-erkennung. Online verfügbar unter <https://www.fairparken.com/de-DE/freeflow>, zuletzt geprüft am 04.07.2025.

Fenix Invico, S. A. (o. J.): PTD100 Parking Ticket Dispenser. Online verfügbar unter <https://fenixinvico.com/product/ptd100/>, zuletzt geprüft am 28.05.2025.

Fonseca, Natalia; Casanova, Jesús; Valdés, Manuel (2011): Influence of the stop/start system on CO2 emissions of a diesel vehicle in urban traffic. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 16 (2), S. 194–200. DOI: 10.1016/j.trd.2010.10.001.

Girard, Yann; Neunhoff, Johanna (2024): The Environmental Impact of Digital Over Cash Payments. White Paper Report for the European Digital Payments Industry Alliance. Online verfügbar unter <https://www.edpia.eu/wp-content/uploads/2024/06/The-environmental-impact-of-digital-over-cash-payments-in-Europe-Oxford-Economics-for-EDPIA-April-2024.pdf>, zuletzt geprüft am 21.05.2025.

Girgo, Max (2024): Das bringt die Start-Stopp-Automatik. Bauer Xcel Media Deutschland KG. Online verfügbar unter <https://www.autozeitung.de/start-stopp-automatik-205046.html>, zuletzt geprüft am 08.05.2025.

Glumm, Bastian (2023): Solingen: Parkscheinautomaten werden ausgetauscht. Online verfügbar unter <https://solingenmagazin.de/solingen-parkscheinautomaten-werden-ausgetauscht/>, zuletzt geprüft am 12.06.2025.

Google-Rezensionen (2024): Rezensionen - Köln Arcaden. Online verfügbar unter https://www.google.de/search?sa=X&sca_esv=87987e31af6ab5dd&hl=de-DE&biw=1222&bih=563&tbm=lcl&q=rezensionen%20f%C3%BCr%20k%C3%B6ln%20arcaden&rflfq=1&num=20&stick=H4slAAAAAAAAAONgkxIxNDa-zNDI0NjY1NzE2NjQzNLA0NtjAyPiKUa4otSo1rzgzPy81TyHt8J4ihezD23LyFB-KLkhNTUvMWsRJQAABADQAPXQAAAA&rldimm=13692133574331610930&ved=0CB0Q5foLahcKEwjQ-p-_8e2MAxUAAAAAHQAAAAAQcw#lkt=LocalPoiReviews&arid=ChdDSUhNMG9nS0VJQ0FnTURJazhPaGtBRRAB&topic=mid:/m/055xqs, zuletzt aktualisiert am 04.07.2025.

GreenDelta GmbH (2024): openLCA. Online verfügbar unter <https://www.openlca.org/>, zuletzt geprüft am 15.10.24.

Haimerl, Barbrara (2016): Heinz Schaden will Automaten fürs Parken abschaffen. Salzburgs Bürgermeister forciert den Umstieg auf Handy-Parken und Parkscheine. Das Straftamt rät davon ab. Online verfügbar unter <https://www.sn.at/salzburg/politik/heinz-schaden-will-automaten-fuers-parken-abschaffen-1250257>, zuletzt geprüft am 22.05.2025.

Helms, Heinrich; Bruch, Bernhard; Räder, Dominik; Hausberger, Stefan; Lipp, Silke; Matzer, Claus (2022): Energieverbrauch von Elektroautos (BEV). Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

Hillerström, Hanna; Troborg, Ulrika (2010): Customized LCA for Network Cameras. Master Thesis. KTH Industrial Engineering and Management, Stockholm.

HONK MOBILE INC. (2025): Beyond the Pay Station: The Rise of App-Free, Contactless Parking Technology. Online verfügbar unter <https://www.honkmobile.com/blog/beyond-the-pay-station/>, zuletzt geprüft am 07.07.2025.

Geheimhaltungsbedürftige Daten zu elektronischen Komponenten

IPCC (Hg.) (2021): Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution of to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.

Jander, Bojan; El Nakischabandi, Mohamad Said; Yesilyurt, Enes Embia; Moll, Cornelius; Link, Steffen; Schneider, Lars; Zinnecker, Valentin (2021): Pkw-Antriebe für die Zukunft: Ökonomische, ökologische und technische Effizienz im Vergleich. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena).

Jereb, Borut; Kumperščak, Samo; Bratina, Tadej (2018): The impact of traffic flow on fuel consumption increase in the urban environment. In: *FME Transaction* 46 (3), S. 278–284. DOI: 10.5937/fmet1802278J.

Kamiya, G.; Bertoldi, Paolo (2024): Energy consumption in data centres and broadband communication networks in the EU. Europäische Kommission. Luxembourg (JRC, JRC 135926). Online verfügbar unter <https://op.europa.eu/o/op-portal-service/download-handler?identifier=f6822d03-cedb-11ee-b9d9-01aa75ed71a1&format=pdf&language=en&productionSystem=cellar&part=>.

Kampker, Achim; Heimes, Heiner Hans (2024): Elektromobilität. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Kraftfahrtbundesamt (2024): Jahresbilanz 2024. Online verfügbar unter https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Jahresbilanz_Bestand/fz_b_jahresbilanz_node.html, zuletzt geprüft am 01.04.2025.

Lamp Shining Manufacturing CO., LTD. (2024): Environmental Product Declaration: LED street light (EPD-Nr. S-P-13038). Hg. v. The International EPD® System, zuletzt geprüft am 21.05.2024.

Li, Xiaopeng; Cui, Jianxun; An, Shi; Parsafard, Mohsen (2014): Stop-and-go traffic analysis: Theoretical properties, environmental impacts and oscillation mitigation. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 70, S. 319–339. DOI: 10.1016/j.trb.2014.09.014.

Lizasoain-Arteaga, Esther; Indacochea-Vega, Irune; Alonso, Borja; Castro-Fresno, Daniel (2020): Influence of traffic delay produced during maintenance activities on the life cycle assessment of a road. In: *Journal of Cleaner Production* 253, S. 120050. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120050.

Lm-therm Elektrotechnik AG (2024): Schaltschrankheizung mit integriertem Thermostat. WADI-IP65. Online verfügbar unter https://lm-therm.de/wp-content/downloads/artikel/80600x_variante/Datenblatt_Wadi-IP65_AL.pdf, zuletzt geprüft am 23.05.2025.

Lohse, Dieter; Schnabel, Werner (2011): Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung. Band 1: Straßenverkehrstechnik. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

Matsuura, Moritaka; Korematsu, Koji; Tanaka, Junya (2004): Fuel Consumption Improvement of Vehicles by Idling Stop. In: SAE Technical Paper Series. 2004 SAE Fuels & Lubricants Meeting & Exhibition, JUN. 08, 2004: SAE International 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States (SAE Technical Paper Series).

Geheimhaltungsbedürftige Daten zu elektronischen Komponenten

Metzler GmbH (2025): Metzler - Drucktaster 19mm - LED Ringbeleuchtung Grün - IP67 IK10 - Edelstahl - Flach - Schraubkontakte. Online verfügbar unter https://metzler-electronics.com/metzler-drucktaster-19mm-led-ringbeleuchtung-gruen-ip67-ik10-edelstahl-flach-schraubkontakte?gad_source=1&gad_campaignid=21170443633&gclid=CjwKCAjwz_bABhAGEiwAm-P8Yfcy2uyA_0C4vN9vsv_v5fgT-pTY69gwmhk3SDm5-mHy2V_ICd8NJR0C584QAvD_BwE, zuletzt geprüft am 28.05.2025.

Michelin (2022): Traffic jams: our tips for saving fuel. Online verfügbar unter <https://www.viamichelin.com/magazine/article/traffic-jams-our-tips-for-saving-fuel>, zuletzt aktualisiert am 03.08.2022, zuletzt geprüft am 19.05.2025.

Niedersächsische Landesforsten (2018): 100 × 100 Meter Wald der Niedersächsischen Landesforsten - Eine etwas andere Leistungsbilanz. Online verfügbar unter https://www.landesforsten.de/wp-content/uploads/2018/05/100x100_wald_web.pdf, zuletzt geprüft am 06.11.2024.

Nobis, Claudia; Kuhnimhof, Tobias (2018): Mobilität in Deutschland - MID Ergebnisbericht. Studie von infas, DLR, IVT und infas 360 im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (FE-Nr. 70904/15): Bonn, Berlin.

Northcone AB. (2024): EPD – Konischer Stahlmast 8 m. Hg. v. The International EPD® System. Online verfügbar unter https://www.e-nummersok.se/info-Docs/EPD/EPD_34822_7772196.pdf, zuletzt geprüft am 22.05.2025.

Nunić, Zdravko B.; Ajanović, Mesud; Miletić, Dario; Lojić, Ranko (2020): Determination of the Rolling Resistance Coefficient under different traffic conditions. In: *FU Mech Eng* (18), S. 653–664. DOI: 10.22190/FUME181116015N.

- Öko-Institut e.V. (2020): Der CO₂-Fußabdruck unseres digitalen Lebensstils. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/blog/der-co2-fussabdruck-unseres-digitalen-lebensstils/>, zuletzt geprüft am 06.11.2024.
- ORAFOL Europe GmbH (2015): ORALITE® 5931M Prismatic Construction Grade, Technisches Datenblatt 2015/09. Online verfügbar unter <https://reflexfolie.cstatic.io/media/pdf/e9/fa/9e/oralite-5931m-prismatic-construction-grade-technisches-datenblatt.pdf>, zuletzt geprüft am 27.09.24.
- Paiano, Annarita; Lagioia, Giovanni; Cataldo, Andrea (2013): A critical analysis of the sustainability of mobile phone use. In: *Resources, Conservation and Recycling* 73, S. 162–171. DOI: 10.1016/j.resconrec.2013.02.008.
- Pelkmans, L.; Verhaeven, E.; Spleesters, G.; Kumra, S.; Schaerf, A. (2005): Simulations of Fuel Consumption and Emissions in Typical Traffic Circumstances. In: *SAE Transactions* (114), S. 967–973.
- Prabhu N, Shailesh; Majhi, Ritanjali (2023): Disposal of obsolete mobile phones: A review on replacement, disposal methods, in-use lifespan, reuse and recycling. In: *Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA* 41 (1), S. 18–36. DOI: 10.1177/0734242X221105429.
- Preiser MRT oHG (o. J.): Schranke Magnetic.Access Pro H. Online verfügbar unter <https://www.preiser-technik.de/schrankenanlagen/automatikschranken/magnetic-access-pro-h>, zuletzt geprüft am 10.06.2025.
- Rittal GmbH & Co. KG (2020): Kompakt- Schaltschrank AX - AX 1045.0000. Online verfügbar unter <https://media.automation24.com/datasheet/de/1045000.pdf>, zuletzt geprüft am 26.05.2025.
- RTB GmbH & Co. KG (2021): Parkscheinautomaten. Online verfügbar unter https://www.rtb-bl.de/wp-content/uploads/RTB_PSA.pdf, zuletzt geprüft am 23.05.2025.
- Sala, Serenella; Cerutti, Alessandro Kim; Pant, Rana (2018): Development of a weighting approach for the environmental footprint. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Santos, Nathália Duarte Souza Alvarenga; Roso, Vínicius Rückert; Faria, Marco Tulio C. (2020): Review of engine journal bearing tribology in start-stop applications. In: *Engineering Failure Analysis* 108, S. 104344. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.104344.
- Schmaus, M.; Bawidamann, J.; Friedrich, M.; Haberl, M.; Trenkwalder, L.; Fellen-dorf, M. et al. (2023): Flüssiger Verkehr für Klimaschutz und Luftreinhaltung. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- Schöffl, Christof (2015): "Gib doch endlich Gas!" - Ausgewählte Beispiele zur Modellierung und Berechnung des Kraftstoffverbrauchs eines Pkw im Mathematikunterricht. Diplomarbeit. Johannes Kepler Universität, Linz. Institut für Didaktik der Mathematik. Online verfügbar unter <https://epub.jku.at/obvulihs/download/pdf/420467?originalFilename=true>, zuletzt geprüft am 16.10.24.
- Schweizer, Manuel; Stöckl, Martin; Tutunaru, Robin; Holzhammer, Uwe (2023): Influence of heating, air conditioning and vehicle automation on the energy and

power demand of electromobility. In: *Energy Conversion and Management: X* 20, S. 100443. DOI: 10.1016/j.ecmx.2023.100443.

Sodiqovich, Yusupov Sarvarbek; Shukhratullaevich, Inoyatkhodjaev Jamshud (2021): Analysis of test results using an automatic start-stop system in vehicle driving modes. In: *Opn J Sci & Tech* 4 (2), S. 77–84. DOI: 10.31580/ojst.v4i2.1791.

Srisakda, Napon; Sumitsawan, Palinee; Fukuda, Atsushi; Ishizaka, Tetsuhiro; Sangsrichan, Chaiwat (2022): Reduction of vehicle fuel consumption from adjustment of cycle length at a signalized intersection and promotional use of environmentally friendly vehicles. *Engineering and Applied Science Research*, 49, 1, 18–28. DOI: 10.14456/easr.2022.2.

Statista GmbH (2023): Was kostet Parken in Deutschland. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/infografik/31694/gebuehr-fuer-eine-stunde-kurzzeitparken-in-ausgewaehlten-staedten-deutschlands/>, zuletzt geprüft am 07.11.2024.

Statista GmbH (2024a): Anteil der Segmente am PKW-Bestand in Deutschland bis 2024. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/316734/umfrage/pkw-bestand-in-deutschland-nach-segmenten-anteile/>, zuletzt geprüft am 27.09.24.

Statista GmbH (2024b): Umsatz mit Parkhäusern und Parkplätzen in Deutschland bis 2022. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/266273/umfrage/umsatz-mit-dem-betrieb-von-parkhaeusern-und-parkplaetzen/>, zuletzt geprüft am 07.11.24.

Tecpoles Sp. z o.o. (2023): Environmental Product Declaration No. 531/2023: Lighting columns. Hg. v. Instytut Techniki Budowlanej (ITB). Online verfügbar unter https://www.itb.pl/wp-content/uploads/2023/11/ITB-EPD_531_Tecpoles-Sp.-z-o.o.-Lighting-columns.pdf, zuletzt geprüft am 22.05.2025.

Thomann GmbH (2025): Visaton DL10 8 Ohm. Online verfügbar unter https://www.thomann.de/de/visaton_dl10_8_ohm.htm?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjww-HABhCGARIsALLO6XxNJEj3WToB0G0j1r1AtJfTRq_FXfS-miQHw2YFfb3Gb9nIMOD1Ym50aAqM1EALw_wcB, zuletzt geprüft am 23.05.2025.

TL Electronic GmbH (o. J.): BS-E099. Online verfügbar unter <https://www.tl-electronic.com/Pixelpdfdata/Articlepdf/id/446/onumber/15000508>, zuletzt geprüft am 23.05.2025.

Treiber, Martin; Kesting, Arne; Thiemann, Christian (2008): How Much does Traffic Congestion Increase Fuel Consumption and Emissions? Applying a Fuel Consumption Model to the NGSIM Trajectory Data.

ISO 14067, Februar 2019: Treibhausgase – Carbon Footprint von Produkten – Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung (ISO 14067:2018); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14067:2018.

TÜV Nord AG (o. J.): Wirkungsgrad. Die Nutzbarkeit der Energie. Online verfügbar unter <https://www.tuev-nord.de/de/privatkunden/verkehr/auto-motorrad-caravan/elektromobilitaet/wirkungsgrad/>, zuletzt geprüft am 25.11.2024.

Umweltbundesamt (2024): Emissionen des Verkehrs. Verkehr belastet Luft und Klima - Minderungsziele der Bundesregierung. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/emissionen-des-verkehrs#verkehr-belastet-luft-und-klima-minderungsziele-der-bundesregierung>, zuletzt geprüft am 07.11.2024.

ISO 14044, Februar 2021: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020.

ISO 14040, Februar 2021: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006 + A1:2020.

V & S Vertriebs- und Service GmbH & Co. KG (2021): 12V 7,2Ah - VdS G118004, VdS G11207. Online verfügbar unter https://online-batterien.de/pdf/400786_749088.pdf, zuletzt geprüft am 23.05.2025.

van Gijlswijk, René; Paalvast, Mieke; Ligterink, Norbert E.; Smokers, Richard (2020): Real-world fuel consumption of passenger cars and light commercial vehicles. TNO 2020 R11664. Online verfügbar unter [https://legacy.emissieregistratie.nl/erpubliek/documenten/05%20Verkeer%20en%20vervoer/2020%20\(TNO\)%20Real-world%20fuel%20consumption%20of%20passenger%20cars%20and%20light%20commercial%20vehicles.pdf](https://legacy.emissieregistratie.nl/erpubliek/documenten/05%20Verkeer%20en%20vervoer/2020%20(TNO)%20Real-world%20fuel%20consumption%20of%20passenger%20cars%20and%20light%20commercial%20vehicles.pdf), zuletzt geprüft am 13.05.2025.

Veranstaltergemeinschaft Lokalfunk Essen e.V. (2022): Essen: Erste moderne Parkscheinautomaten stehen. Online verfügbar unter <https://www.radioessen.de/artikel/essen-erste-moderne-parkscheinautomaten-stehen-1314758.html>, zuletzt geprüft am 12.06.2025.

Verlag Der Tagesspiegel GmbH (2017): Parkscheinautomaten haben nach 20 Jahren ausgedient. Online verfügbar unter <https://checkpoint.tagesspiegel.de/telegramm/3J0zNuYqHJ2K975VNOt3ER?>, zuletzt geprüft am 12.06.2025.

Geheimhaltungsbedürftige Daten zu elektronischen Komponenten

Waskönig+Walter Kabel-Werk GmbH u. Co. KG (2017): NYM-J, 300/500 V. Online verfügbar unter <https://www.baustoffhandel-witschel.de/isotope/n/nym-j-datenblatt.pdf>, zuletzt geprüft am 23.05.2025.

Geheimhaltungsbedürftige Daten zu elektronischen Komponenten

wenglor sensoric elektronische Geräte GmbH (2023): RF505. Online verfügbar unter <https://www.wenglor.com/de/Zubehoer/Reflektoren-und-Reflexfolien/Reflexfolie-500-50-mm/p/RF505>, zuletzt geprüft am 27.09.24.

Wernet, Gregor; Bauer, Christian; Steubing, Bernhard; Reinhard, Jürgen; Moreno-Ruiz, Emilia; Weidema, Bo (2016): The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. In: *Int J Life Cycle Assess* 21 (9), S. 1218–1230. DOI: 10.1007/s11367-016-1087-8.

Wholegrain Digital Scamper Ltd (2024a): Estimating Digital Emissions, What is the Sustainable Web Design Model? Online verfügbar unter <https://sustainable-webdesign.org/estimating-digital-emissions/>, zuletzt geprüft am 26.09.24.

Wholegrain Digital Scamper Ltd (2024b): Website Carbon Calculator. Online verfügbar unter <https://www.websitecarbon.com/website/fairparken-com-pay/>, zuletzt geprüft am 26.09.24.

WSA Electronic GmbH & Co. KG (o.J.): TicketLine 7. Online verfügbar unter <https://www.wsa-electronic.de/produkte/ticketline-psa7/>, zuletzt geprüft am 22.05.2025.

YouGov PLC (2019): Kassenbon per Email – für viele Deutsche vorstellbar. Online verfügbar unter <https://yougov.de/economy/articles/26853-kassenbon-email-fur-viele-deutsche-vorstellbar>, zuletzt geprüft am 27.09.24.

Bericht zur kritischen Prüfung

Der Bericht zur kritischen Prüfung durch die ESU-services Ltd. beginnt auf der nächsten Seite.

2025

Kritische Prüfung - Klimabilanz von Parkraumbewirtschaftungskonzepten im Vergleich: Kamerabasierte Free-flow- systeme als Alternative zum konventionell beschränkten Parken



fair parken
GmbH

Inhalt

1	HINTERGRUND UND ZIELSETZUNG	1
2	ABLAUF DER PRÜFUNG	2
2.1	Allgemeines Vorgehen	2
2.2	Prüfung der vorliegenden Studie	3
3	KRITISCHER PRÜFUNGSBERICHT	4
3.1	Konsistenz der Methoden mit den ISO-Normen	4
3.2	Wissenschaftliche und technische Validität der angewandten Methoden	4
3.3	Korrektheit der Daten	4
3.4	Bewertung der Interpretation im Hinblick auf Limitationen und Ziel und Umfang	5
3.5	Transparenz und Konsistenz des Studienbericht	5
3.6	Selbstdeklaration der Prüfenden zur Unabhängigkeit & Kompetenzen	6
3.7	Schlussfolgerung	6
4	VORSTELLUNG DER PRÜFENDEN	7
4.1	Dr. Niels Jungbluth, ESU-services GmbH	7
4.1.1	Unsere Philosophie «fair consulting in sustainability»	7
4.1.2	Dr. Niels Jungbluth, Geschäftsführer und Inhaber	8
4.1.3	Mehr als 25 Jahre Erfahrung	9
5	LITERATUR	10

Impressum

Titel	Kritische Prüfung - Klimabilanz von Parkraumbewirtschaftungskonzepten im Vergleich: Kamerabasierte Free-flow-systeme als Alternative zum konventionell beschränkten Parken
Kritischer Prüfer	Niels Jungbluth
Auftraggeber	fair parken GmbH
Haftungsausschluss	Jeder Verweis auf diese kritische Prüfung ist nur dann zulässig, wenn in derselben Veröffentlichung auch der vollständige Prüfbericht ohne Änderungen wiedergegeben wird. Die Gültigkeit der kritischen Prüfung bezieht sich nur auf die in diesem Bericht genannten Unterlagen, die zur Prüfung vorgelegt wurden. Alle evtl. daraus abgeleiteten Aussagen wurden nicht geprüft.
Version	24.07.25 17:52 https://esuserVICES-my.sharepoint.com/personal/jungbluth_esu-services_ch/Documents/ESU-intern/720 CriticalReview/2025 Umsicht-Parken/jungbluth-2025-Kritische-Prüfung-CF-Parkraumbewirtschaftung.docx

1 Hintergrund und Zielsetzung

Die Firma fair parken GmbH entwickelt, produziert und vertreibt schrankenlose Systeme zur Parkraumbewirtschaftung.

Diese Treibhausgasbilanz wird nach den Normen ISO 14067 durchgeführt. In diesem Zusammenhang hat der Auftraggeber eine externe kritische Überprüfung dieser Arbeit veranlasst.

Die wichtigsten Merkmale für diese kritische Prüfung sind in Tab. 1.1 zusammengefasst.

Tab. 1.1 Kurzüberblick zur geprüften Studie

Titel	Kritische Prüfung - Klimabilanz von Parkraumbewirtschaftungskonzepten im Vergleich: Kamerabasierte Free-flow-systeme als Alternative zum konventionell beschränkten Parken
Auftraggeber	fair parken GmbH , Grafenberger Allee 337c 40235 Düsseldorf Ansprechpartner: Matthias Werner, werner.matthias@fairparken.com
Autor:innen	Janek Röttgen, Leonard Janzen, Jürgen Bertling, Daniel Maga Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Osterfelder Straße 3, 46047 Oberhausen https://www.umsicht.fraunhofer.de/ , janek.roettgen@umsicht.fraunhofer.de
Untersuchte Produkte und Varianten	Zwei alternativen Parkraumbewirtschaftungskonzepten – ein schrankenloses Free-Flow-System mit automatischer Erfassung des Pkw-Kennzeichens und ein klassisches Schranken-System mit Parkticket
Szenarien	Verschiedene Szenarien
Systemgrenzen	Cradle to grave
Funktionelle Einheit	Ein Bewirtschaftungs- und Abrechnungsvorgang für die einmalige Nutzung eines kommerziell betriebenen Off-Street-Parkraums mit 500 Stellplätzen in Deutschland, einschließlich der Abwicklung von Ein- und Ausfahrt sowie der Zahlungsabwicklung.
Anzuwendender Standard	International Organization for Standardization (ISO) 2018
Produktkategorie Regeln (PCR)	Keine
Vergleichende Studie	Ja
Vorgesehene Veröffentlichung	Ja. Zielgruppe der Studie und des vorliegenden Berichts ist die Geschäftsführung der fair parken GmbH und deren Kunden sowie Expertinnen und Experten aus dem Bereich der Parkraumbewirtschaftung.
Schriftliche Dokumentation	Bericht mit 131 Seiten, inklusive Zusammenfassung und Datendokumentation in der Software. Excel Tabelle mit Zwischenrechnungen
Software für Hintergrundberechnungen und Bereitstellung eines LCI-Modells	Vollständige Sachbilanz im OpenLCA Datenbankformat
Hintergrund-Datenbank	ecoinvent v3.10 (FitzGerald et al. 2023)
Daten im Vordergrund	Eine Reihe neu modellierte Datensätze
Bewertung der Auswirkungen auf den Lebenszyklus	Klimabilanz gemäss IPCC 2021
Etappen der Überprüfung	Prüfung der vollständigen Dokumentation
Persönliche Treffen	Online Meetings
Kritische Prüfung	Dr. Niels Jungbluth , ESU-services GmbH , Vorstadt 10, 8200 Schaffhausen, Schweiz

2 Ablauf der Prüfung

2.1 Allgemeines Vorgehen

Die Internationale Organisation für Normung (ISO) gibt zum Vorgehen bei der Überprüfung einer zur Veröffentlichung geplanten vergleichenden Studie folgendes an (International Organization for Standardization (ISO) 2006a, b):

"Eine kritische Überprüfung kann als Begutachtung durch interessierte Kreise durchgeführt werden. In einem solchen Fall sollte ein externer unabhängiger Experte vom Auftraggeber der ursprünglichen Studie ausgewählt werden. Dieser Experte fungiert als Vorsitzender eines Überprüfungsgremiums von mindestens drei Mitgliedern. Je nach Ziel und Umfang der Studie sollte der Vorsitzende weitere unabhängige qualifizierte Gutachter auswählen. Dieses Gremium kann andere interessierte Parteien einbeziehen, die von den Schlussfolgerungen aus der Treibhausgasbilanz betroffen sind, wie z. B. Regierungsbehörden, nichtstaatliche Gruppen, Wettbewerber und betroffene Industrien."

Bei der vorliegenden Studie handelt sich um eine öffentliche Studie, die vergleichende Aussagen zulassen soll. Daher ist nach ISO 14040 ein Gutachtergremium zu empfehlen.

Es werden die folgenden fünf Aspekte, die in der ISO 14040 beschrieben sind, überprüft. Dabei wird bewertet, ob

- *die bei der Durchführung der Treibhausgasbilanz angewendeten Methoden mit der internationalen Norm übereinstimmen*
- *die bei der Durchführung der Treibhausgasbilanz angewendeten Methoden wissenschaftlich begründet sind und dem Stand der Treibhausgasbilanz-Technik entsprechen*
- *die verwendeten Daten in Bezug auf das Ziel der Studie hinreichend und zweckmäßig sind*
- *die Auswertungen die erkannten Einschränkungen und das Ziel der Treibhausgasbilanz berücksichtigen*
- *der Bericht transparent und in sich stimmig ist*

Die erste Rückmeldung zur vorgelegten Arbeit enthält eine detaillierte Auflistung der Ergebnisse der Überprüfung und Empfehlungen zur Überarbeitung. Die Rückmeldung wird den Autoren zur Verfügung gestellt. Diese soll zur Verbesserung der Arbeit dienen und ist nicht zur Veröffentlichung vorgesehen. Es wird erwartet, dass die Studien-Autor:innen eine Punkt-für-Punkt-Rückmeldung zu den Empfehlungen der Prüfer geben. Darin soll stehen, wie die Empfehlungen in der überarbeiteten Version berücksichtigt wurden.

Der kritische Prüfbericht basiert dann auf der überarbeiteten Dokumentation und den Antworten der Autor:innen auf die detaillierten Prüfkommentare. Er enthält eine Zusammenfassung der Ergebnisse der kritischen Prüfung und muss zusammen mit der Dokumentation zur Treibhausgasbilanz veröffentlicht werden.

Eine Entwurfsfassung des kritischen Prüfberichts wird dem Auftraggeber zur Kommentierung zugesandt. Der Beauftragte ist berechtigt, zum kritischen Prüfbericht Stellung zu nehmen. Diese Kommentare können auch als Teil des kritischen Prüfberichts veröffentlicht werden. Ein Verweis auf den Prüfbericht ist nur dann zulässig, wenn in der gleichen Veröffentlichung auch die vollständige Prüfaussage ohne Abstriche wiedergegeben wird.

Die Aufgabe des Prüfenden ist es, die bereitgestellte Dokumentation, gemäß Tab. 1.1, zu überprüfen, einschließlich der vier Phasen, namentlich:

- Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens
- Sachbilanz,
- Wirkungsabschätzung und
- Auswertung

Das Ziel der Studie als solches wird nicht überprüft, da dies im Verantwortungsbereich des Auftraggebers liegt. Es wurde jedoch überprüft, ob das Ziel explizit und transparent formuliert ist. Die Definition des Untersuchungsrahmens ist Teil der kritischen Prüfung, der Definition der funktionalen Einheit, der Systemdefinition und deren Grenzen, der Allokationsansätze und der gewählten Wirkungskategorien-Indikatoren.

Die Autor:innen der Studie gewähren Zugang zu allen Daten, die für eine fundierte kritische Prüfung erforderlich sind. Dies gilt auch für Daten, die von Dritten zur Verfügung gestellt wurden, und für vertrauliche Daten. Die Überprüfung der Sachbilanz umfasst die Sachbilanz-Rohdaten (Eingabedaten), die Modellierungsansätze und ausgewählte Sachbilanzergebnisse.

Die Überprüfung der Wirkungsabschätzung sollte die angewandten Wirkungs- und Charakterisierungsfaktoren, die Ergebnisse der Wirkungsindikatoren und schließlich die normierten Ergebnisse umfassen.

Innerhalb der Auswertungsphase wird die Konsistenz der Modellierung, der verwendeten Daten und der Schlussfolgerungen überprüft und kontrolliert, ob sie mit der Zieldefinition und dem Untersuchungsrahmen übereinstimmt. Datenqualitätsaspekte, Signifikanz- und Sensitivitätsanalysen sowie Vollständigkeitsprüfungen sind ebenfalls Gegenstand der kritischen Prüfung.

2.2 Prüfung der vorliegenden Studie

Die folgenden Interaktionen zwischen dem Auftraggeber, den Autor:innen und dem Prüfungsgremium haben stattgefunden:

Tab. 2.1 Ablauf der Prüfung

Kritische Prüfung - Klimabilanz von Parkraumbewirtschaftungskonzepten im Vergleich: Kamerabasierte Free-flow-systeme als Alternative zum konventionell beschränkten Parken	Zuge- stellt	Rückmel- dung	Bespre- chung
Erster Berichtsentwurf (62 Seiten)	4.4.2025	10.4.2025	-
Zweiter Berichtsentwurf	28.4.2025	28.4.2025	28.4.2025
Dritter Berichtsentwurf (131 Seiten), Entwurf Review Statement	17.7.2025	23.7.2025	-
Finaler Bericht und Review Statement	24.7.2025	24.7.2025	-

Der Ablauf der Prüfung lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Fragen des Prüfenden wurden ausreichend beantwortet. Auf Wunsch des Prüfenden wurden Überarbeitungen bezüglich der Dokumentation im Bericht, der Sachbilanz-Modelle und der Beschreibung der Ergebnisse vorgenommen. Der kritische Prüfungsprozess fand in einer offenen und konstruktiven Atmosphäre statt. Der endgültige Studienbericht und das Sachbilanz-Modell enthalten fast alle Kommentare des Prüfenden, die in den früheren Phasen des Prüfungsprozesses gegeben wurden.

- Die vorliegende endgültige Version des Prüfungsberichts berücksichtigt die Überarbeitungen, die die Autor:innen nach der Abgabe des Feedbacks zum vorläufigen Bericht vorgenommen haben.
- Das Ziel der Studie als solches wurde nicht überprüft, da dies im Verantwortungsbereich des Auftraggebers liegt. Es wurde jedoch überprüft, ob das Ziel explizit und transparent formuliert ist.
- Die Definition des Untersuchungsrahmens war Teil der kritischen Überprüfung, ebenso die Definition der funktionalen Einheit, der Systemdefinition und deren Grenzen sowie die Allokationsansätze.
- Die korrekte Implementierung der Wirkungsabschätzung in der Software wurde nicht geprüft. Es wird davon ausgegangen, dass diese in der Software korrekt implementiert wurde.
- Im Rahmen der Auswertungsphase wurde die Konsistenz der Modellierungen überprüft und kontrolliert, ob sie mit der Zieldefinition und dem Untersuchungsrahmen übereinstimmen.
- Es lag nicht in der Verantwortung des Prüfenden, den Bericht auf Formatierungs-, Layout-, Grammatik- und Rechtschreibfehler zu überprüfen.
- Dieses kritische Prüfstatement gilt nur für den vollständigen Bericht und die vollständigen Ergebnisse, wie sie zur abschließenden Prüfung vorgelegt wurden. Sie gilt nicht für Abstracts oder Zusammenfassungen, die von Dritten erstellt wurden.

3 Kritischer Prüfungsbericht

3.1 Konsistenz der Methoden mit den ISO-Normen

Die funktionale Einheit und der Referenzfluss werden als angemessen für das Ziel und den Untersuchungsrahmen dieser Studie angesehen.

3.2 Wissenschaftliche und technische Validität der angewandten Methoden

Im Allgemeinen sind die erstellten Inventarmodelle wissenschaftlich und technisch gültig. Die Prüfung erfolgte stichprobenartig und nicht vollständig und tiefgreifend für alle Modelle, Prozesse und Daten.

3.3 Korrektheit der Daten

Der Bericht enthält eine detaillierte Beschreibung des Prozesses im Lebenszyklus und der Vordergrunddaten. Das zugrunde liegende Modell der Sachbilanzdaten wurden in der Ökobilanzsoftware zur Verfügung gestellt. Dies erleichterte die Überprüfung erheblich und wird ausdrücklich anerkannt.

Für die Studie wurde auf ecoinvent Datenbank der Version v3.10 zurückgegriffen. Als zur Zeit des Abschlusses der Prüfung ist die Version v3.11 im Jahr 2024 veröffentlicht worden. Die verwendete ecoinvent Version ist damit leicht veraltet. Eine Verbesserung der Klimabilanz ist evtl. beim deutschen Strommix zu erwarten. Sofern dem Prüfer bekannt sollte sich dies nicht wesentlich auf die Ergebnisse des Vergleichs auswirken.

Gemäß ISO 14067:2018, Abschnitt 6.4.3.2, ist eine differenzierte Darstellung der Treibhausgasemissionen erforderlich. Diese umfasst insbesondere:

- Emissionen aus fossilen Quellen
- Emissionen aus biogenen Quellen
- Emissionen aus der Luftfahrt
- Emissionen infolge direkter Landnutzungsänderungen

In der vorliegenden Studie erfolgt diese Kategorisierung. Jedoch fehlen bei übernommenen Daten aus Drittstudien (z. B. zur Klimawirkung von Finanztransaktionen) die erforderlichen Angaben zur Herkunft der Emissionen. Dadurch ist die Konsistenz der Datenbasis leicht eingeschränkt. Diese ist eine minimale Einschränkung da der Hauptteil auch dieser Prozesse sicher den fossilen Quellen zuzuordnen ist und die Finanztransaktionen bei beiden Systemen eine gewisse Bedeutung haben.

Die im Vordergrund und im Hintergrund verwendeten Daten lassen sich im Hinblick auf das Ziel und den Umfang der Studie rechtfertigen.

Die Berechnungen wurden stichprobenartig überprüft. Für die Prüfenden ist es nicht möglich, die Korrektheit und Validität aller Berechnungen im Rahmen eines solchen Überprüfungsprozesses vollständig sicherzustellen.

3.4 Bewertung der Interpretation im Hinblick auf Limitationen und Ziel und Umfang

Die im Bericht dargestellten Ergebnisse sind überwiegend gut begründet. Der Einfluss wichtiger Annahmen wie der Wartedauer und der Anteil von Bargeldzahlungen wird in hilfreichen Szenarien beleuchtet.

Die ISO 14067 fordert im Rahmen der Interpretation (Abschnitt 7.4) die Berücksichtigung indirekter Effekte, sofern diese für die Bewertung der Klimawirkung relevant sein können. In der vorliegenden Studie wird deshalb auch auf mögliche Rebound-Effekte hingewiesen – insbesondere auf eine potenziell erhöhte Nutzung von Parkräumen bzw. Pkw durch ein verbessertes Nutzererlebnis beim Free-Flow-System – eine quantitative Berücksichtigung dieser Effekte erfolgt jedoch nicht. Diese Effekte könnten die ausgewiesenen Einsparpotenziale des Free-Flow-Systems eventuell etwas relativieren. Eine Abschätzung hätte jedoch den Rahmen der Studie deutlich erweitert und deshalb wurde diese Einschränkung vom Prüfenden akzeptiert.

Die Studie ist teilweise von Annahmen abhängig, da keine entsprechenden vollständigen Daten vorlagen. Diese Annahmen wurden soweit möglich konservativ, d.h. eher zu Lasten des Free-Flow Systems getroffen. Ausserdem wurden verschiedenen Szenarien gerechnet, die die Bandbreite der dadurch entstandenen Unsicherheiten abschätzen. Die Aussage, dass die Free-Flow System weniger Treibhausgasemissionen verursacht kann damit als sicher gelten. Die genaue Höhe der Einsparungen ist jedoch kaum genau zu quantifizieren.

Für die Unsicherheitsanalyse wurde keine Monte-Carlo Simulation durchgeführt (was gemäss Norm auch nicht vorgeschrieben ist). Eine solche Analyse hierzu könnte die Stichhaltigkeit der Ergebnisse noch besser beleuchten.

Neben diesen Aspekten berücksichtigt die Interpretation die meisten Einschränkungen aufgrund des Ziels und des Untersuchungsrahmens dieser Studie.

3.5 Transparenz und Konsistenz des Studienbericht

Der Bericht ist klar strukturiert und lesbar. Mit den Informationen wird der Bericht als transparent und konsistent anerkannt.

3.6 Selbstdeklaration der Prüfenden zur Unabhängigkeit & Kompetenzen

(Gemäß ISO/PDTS 14071, Anhang B, International Organization for Standardization (ISO) 2014)

Ich (Niels Jungbluth), erkläre hiermit, dass:

- Wir sind keine haupt- oder nebenberuflichen Mitarbeiter des Auftraggebers der Studie oder der Autor:innen.
- Wir waren nicht an der Zielsetzung oder an der Durchführung der vorliegenden Studie beteiligt, d.h. wir waren nicht Teil des Projektteams des Auftraggebers oder Anwenders.
- Wir haben keine finanziellen, politischen oder sonstigen Interessen am Ergebnis der Studie.

Unsere für das vorliegende kritische Prüfverfahren relevanten Kompetenzen umfassen Kenntnisse und Fertigkeiten in den Bereichen:

- ISO 14040 und ISO 14044.
- Treibhausgasbilanz-Methodik und -Praxis, insbesondere im Zusammenhang mit Sachbilanzen (einschließlich der Erstellung von Datensätzen und der Überprüfung von Datensätzen, falls zutreffend).
- Kritische Prüfungspraxis.
- Die wissenschaftlichen Disziplinen, die für die wichtigen Wirkungskategorien der Studie relevant sind.
- Ökologische, technische und andere relevante Leistungsaspekte des/der untersuchten Produktsystems/Produktsysteme.
- Die für die Studie verwendete Sprache.

Ein kurzer Lebenslauf und eine Liste der relevanten Referenzen sind Teil des Prüfberichts.

Ich versichere, dass die obigen Angaben wahrheitsgemäß und vollständig sind.

3.7 Schlussfolgerung

Die überprüfte Studie, dargestellt in Tab. 1.1, erfüllt im Wesentlichen die Anforderungen der ISO-Normen.

Für eine vergleichende Studie, die veröffentlicht werden soll wäre ein Panel von mindestens 3 Prüfenden vorgeschrieben. Diese Anforderung wird hier **nicht** erfüllt.

Es wird hier darauf hingewiesen, dass es sich bei dieser Studie nicht um eine vollständige Ökobilanz handelt, da nur der Klimawandel als Umweltproblem berücksichtigt wird.

Das Ziel und der Untersuchungsrahmen sind angemessen definiert. Die verwendeten Methoden sind wissenschaftlich und technisch zulässig. Die verwendeten Daten sind im Hinblick auf das Ziel und den Umfang der Studie grösstenteils angemessen.

Die Verantwortung für die Lesbarkeit und Formatierung des Berichtes liegt bei den Autor:innen. Der Bericht ist vollständig, klar strukturiert und gut lesbar.

Die Schlussfolgerungen und Empfehlungen beruhen auf den Ergebnissen der Analysen unter Berücksichtigung der im Bericht beschriebenen Einschränkungen.

Mögliche Rebound-Effekte der besseren Parkraumbewirtschaftung werden nicht erfasst und berücksichtigt. Es bleibt somit unklar ob diese das Ergebnis der Studie in Frage stellen können.

Die Klimawirkung der Parkraumbewirtschaftung ist im Vergleich zu anderen verkehrsbezogenen Maßnahmen gering, kann aber im Rahmen eines Maßnahmenbündels zur Verkehrsflussoptimierung sinnvoll beitragen.

Zusätzliche Einschränkungen bezüglich der Interpretation werden in diesem kritischen Prüfbericht erwähnt.

Insgesamt kann die Aussage, dass die schrankenlose Variante gewisse Vorteile aus Klimasicht bringt, als gesichert gelten. Aber es handelt sich beim scheinbar einfachen Untersuchungsgegenstand um ein hochkomplexes System zu dem vielfach keine genauen Daten vorlagen. Deshalb hängen die Ergebnisse von vielen Annahmen und Abschätzungen ab, was es schwierig macht die Klimaemissionen für beide Systeme genau zu quantifizieren.

Ich empfehle, den gesamten Bericht einschließlich diesem Prüfungsbericht an den Auftraggeber zu übermitteln und falls gewünscht zu veröffentlichen.

Schaffhausen, 24.07.2025



Dr. sc. tech. ETH, Niels Jungbluth
Geschäftsführer und Inhaber der ESU-services GmbH

4 Vorstellung der Prüfenden

4.1 Dr. Niels Jungbluth, ESU-services GmbH

4.1.1 Unsere Philosophie «fair consulting in sustainability»

Die [Hauptaktivitäten der Firma ESU-services GmbH](#), sind [Forschung](#), [Beratung](#), [Daten](#), [Review](#), [Software](#) und [Ausbildung](#) im Bereich [Ökobilanzen](#) und anderer Lebenszyklus-Methoden wie Produktlinienanalyse, [Klimafussabdruck](#) oder [Wasserbilanzen](#). Dabei bilanziert unser Unternehmen alle Arten von Produkten, z.B. aus den Sektoren Nahrungsmittel, Energie, Baumaterialien, Geräte und Dienstleistungen. Die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten beinhalten auch Pionierarbeit beim Weiterentwickeln methodischer Ansätze der Ökobilanzierung.

ESU-services wurde im Jahre 1998 gegründet. Der Name ESU steht für Energie-Stoffe-Umwelt. Unser Geschäftsführer [Niels Jungbluth](#) hat seine erste Ökobilanz bereits 1994 erstellt. In diesem Zeitraum wurden mehr als 450 Projekte von unseren [Mitarbeitenden](#) durchgeführt.

Fairness, Unabhängigkeit und Transparenz sind wesentliche Merkmale unserer Beratungsphilosophie. Wir arbeiten sachbezogen und führen unsere Analysen unvoreingenommen durch. Wir dokumentieren unsere Studien und Arbeiten transparent und nachvollziehbar. Damit ist es auch Aussenstehenden möglich, die Qualität unserer Arbeit jederzeit zu kontrollieren. Wir bieten eine faire und kompetente Beratung an, die es den Auftraggebern ermöglicht, ihre

ökologische Performance zu kontrollieren und kontinuierlich zu verbessern. Auch für unsere [eigene Firmenpolitik](#) spielt Nachhaltigkeit eine wichtige Rolle.

Zu unseren [Kunden](#) zählen verschiedene nationale und internationale Firmen vom Start-Up bis zu globalen Unternehmen, Verbände und Verwaltungen. Ebenso arbeiten wir in Forschungsprojekten mit Industriepartnern und Universitäten zusammen.

4.1.2 Dr. Niels Jungbluth, Geschäftsführer und Inhaber

Dr. Sc. Techn. ETH Zürich, Dipl.-Ing. TU Berlin

Dr. Niels Jungbluth ist seit 2006 Geschäftsführer und Inhaber der ESU-services GmbH. Seine Hauptarbeitsgebiete sind Ökobilanzen im Bereich [Ernährung](#), [Biomasse](#), [Energiesysteme](#), [Input-Output-Analysen](#) und [Ökologische Lebensstile](#). Ein weiterer wichtiger Bereich der Arbeit sind [kritische Prüfung, Validierung und Verifizierung von Ökobilanzen gemäss unterschiedlichen Normen und Standards](#). Er ist zugelassener [Einzelgutachter für EPD International](#) und [IBU Bau](#). Niels hat das [SimaPro Zentrum](#) und den [Datenverkauf](#) von ESU-services aufgebaut. Er ist Mitglied des Editorial Board des [International Journal of Life Cycle Assessment](#) und der [internationalen Konferenz zu Ökobilanzen für Nahrungsmittel](#).



Niels Jungbluth arbeitet seit dem Jahr 2000 bei ESU-services. Im Jahr 2006 gründete er zusammen Rolf Frischknecht die ESU-services GmbH. Im Jahr 2012 übernahm er dessen Geschäftsanteile.

Niels hat ein Doktorat in Ökobilanzen am Lehrstuhl Umweltnatur- und Umweltsozialwissenschaften von Prof. Dr. R. Scholz (ETH Zürich) durchgeführt. Seine Dissertation zu den [Umweltfolgen des Nahrungsmittelkonsums](#) wurde mit dem Greenhirn Preis 1999/2000 für angewandte Umweltforschung des Öko-Instituts Freiburg ausgezeichnet. In seiner vorhergehenden Diplomarbeit im Studiengang [Technischer Umweltschutz](#) an der TU Berlin hat er eine [Ökobilanz für Kochbrennstoffe in Indien](#) erstellt.

4.1.3 Mehr als 25 Jahre Erfahrung

Niels Jungbluth startete erste Forschungsarbeiten zum Thema Ökobilanz im Jahre 1994. Die ESU-services GmbH hat seit 1998 mehr als 300 Projekte erfolgreich durchgeführt. Eine vollständige Liste der durch ESU-services durchgeführten Projekte, der Auftraggeber und der Veröffentlichungen finden Sie auf unserer Homepage www.esu-services.ch/de/projekte/projektliste/. Im Folgenden werden einige im Zusammenhang mit dem hier vorgeschlagenen Auftrag wichtige Referenzen angegeben.

Jahr	Projekttitel	Auftraggeber und Land
Seit 1999	Peer Review der eingereichten Artikel	www.publons.com/researcher/488732/niels-jungbluth
Seit 2001	Thematischer Editor "Ökobilanz von Energiesystemen und Nahrungsmitteln"	The International Journal of LCA, GLO
Seit 2008	Mitglied des Wissenschaftlichen Ausschusses und Gutachter für Abstracts und Beiträge (Dr. Niels Jungbluth)	International Conference on Life Cycle Assessment of Foods
Seit 2014	Gutachter (Verifizierer) für das internationale EPD® System	The international EPD®system (environdec), SE
2025	Kritische Prüfung: CO2-Bilanz von konventioneller Maisstärkeaufschlammung und flüssigem Traubenzucker	AGRANA Stärke GmbH, AT
2024	Kritische Prüfung: Ökobilanz von Polymeren, Verstärkungsmitteln, Pigmenten und Additiven	Polykemi Chongqing, CN
2024	Kritische Prüfung, Vorsitz: Vergleichende Ökobilanz: Untersuchung der Auswirkungen der teilweisen Ersetzung von 98 VL Rinderhackfleisch durch grüne Linsen als Rezepturbestandteil	Tesco PLC, UK
2024	Kritische Prüfung: Ökobilanz von Polymeren, Verstärkungsmitteln, Pigmenten und Additiven	Polykemi Gastonia, US
2024	Kritische Prüfung, Vorsitz: Vergleichende Ökobilanz von wiederverwendbaren Feuerzeugen CP11 und CP22	EarthShiftGlobal, US
2024	Kritische Prüfung, Vorsitz: Vergleichende Ökobilanz des digitalen Zahlungsverkehrs im Vergleich zum Bargeldverkehr in Europa	European Digital Payments Industry Alliance, EU
2024	Kritische Prüfung, Panelmitglied: Vergleichende Ökobilanz des ClimateCell Isolationssystems von TemperPack und des Versandkühlers aus expandiertem Polystyrol	TemperPack Technologies, Inc., US
2024	Kritische Prüfung: Ökobilanz von kreislauffähigen textilen Wertschöpfungsketten	RISE Research Institutes of Sweden AB
2023	Kritische Prüfung, Vorsitz: Vergleichende Ökobilanz von Futterzusatzstoffen	Phileo by Lesaffre, FR
2023	Kritische Prüfung, Vorsitz: Vergleichende Ökobilanz von Schmierstoffen	Peter Greven GmbH, DE
2023	Kritische Prüfung: Ökobilanz einer Cellulosecarbamidfaser	RISE Research Institutes of Sweden AB
2023	Ökobilanz von Trinkwasser und Mineralwasser in Deutschland (kritische Prüfung durch Review-Panel)	wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, DE
2023	Kritische Prüfung: Vergleichende Ökobilanz von Verpackungssets	Vacheron Constantin, Branch of Richemont International S.A., CH
2023	Kritische Prüfung, Vorsitz: Vergleichende Ökobilanz: Rindfleisch und vegetarische Frikadellen	Tesco PLC, UK
2023	Kritische Prüfung, Panelmitglied: Ökobilanz von flüssigen Textilverbesserern und Duftverstärkern in der Wäsche	EarthShiftGlobal, US
2023	Kritische Prüfung: Ökobilanz von Plastikfolien	Scanfill AB, SE
2023	Vergleich des CO2-Fußabdrucks biologisch abbaubarer Polymerverbindungen (kritische Prüfung durch einen einzelnen Experten)	Agrana Group, DE
2023	Kritische Prüfung, Panelmitglied: Vergleichende Ökobilanz von Tofu, Hähnchen und Rind	Long Trail Sustainability, US
2023	Kritische Prüfung: CO2-Fussabdruck von Medizin Verpackungen	Laboratoire AGUETTANT, FR
2023	PCF-Prüfung: Produkt CO2-Fussabdruck von Küchenschränken	Reform Group, DK
2023	Kritische Prüfung: LCA von Polymeren	Polykemi Kunshan, CN
2023	Kritische Prüfung: CO2-Fussabdruck eines Sicherheitsschuhs	UVEX, DE
2023	Kritische Prüfung, Panelmitglied: Vergleichende Ökobilanz von Hygieneprodukten	Mondi, AT
2022	Kritische Prüfung: Ökobilanz eines medizinischen Gerätes	Philips, FR
2022	Kritische Prüfung: Ökobilanz eines RFID inlays	Tageos, FR
2022	Kritische Prüfung: Ökobilanz von Verpackungsflaschen für Weichspüler	Produzent von Waschmitteln
2022	Kritische Prüfung, Vorsitz: Vergleichende Ökobilanz von Lithium Produktion in Grossbritannien	E4tech, UK
2022	Kritische Prüfung, Panelmitglied: Vergleich der Treibhausgasbilanz Fleisch und Fleischersatzprodukte	Valess, NL
2022	Kritische Prüfung, Vorsitz: Vergleich der Treibhausgasbilanz verschiedener Produkte aus Rinderhackfleisch	Tesco PLC, UK

5 Literatur

- FitzGerald et al. 2023 FitzGerald D., Bourgault G., Vadenbo C., Sonderegger T., Symeonidis A., Fazio S., Mutel C., Müller J., Dellenbach D., Valsasina L., Minas N., Baumann D. and Moreno Ruiz E. (2023) Documentation of changes implemented in the ecoinvent database v3.10. ecoinvent Association, Zürich, Switzerland, retrieved from: <https://ecoinvent.org>.
- International Organization for Standardization (ISO) 2006a International Organization for Standardization (ISO) (2006a) ISO 14040: Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. ISO 14040:2006; Amd 1: 2020, Geneva, retrieved from: <https://www.iso.org>.
- International Organization for Standardization (ISO) 2006b International Organization for Standardization (ISO) (2006b) ISO 14044: Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. ISO 14044:2006; Amd: 2017; Amd 2: 2020, Geneva, retrieved from: <https://www.iso.org>.
- International Organization for Standardization (ISO) 2014 International Organization for Standardization (ISO) (2014) ISO/TS 14071: Environmental management — Life cycle assessment — Critical review processes and reviewer competencies: Additional requirements and guidelines to ISO 14044:2006. ISO/TS 14071:2014, Geneva, retrieved from: <https://www.iso.org/standard/61103.html>.
- International Organization for Standardization (ISO) 2018 International Organization for Standardization (ISO) (2018) ISO 14067: Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification. ISO 14067, retrieved from: <https://www.iso.org/standard/71206.html>.