

GRUNDLAGEN

Kosten der Überlastung der Transportinfrastruktur (KÜTI)

Grundlagenstudie

Schlussbericht

4. Oktober 2022



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Raumentwicklung ARE
Office fédéral du développement territorial ARE
Ufficio federale dello sviluppo territoriale ARE
Uffizi federal da svilup dal territori ARE

IMPRESSUM

Herausgeber

Bundesamt für Raumentwicklung (ARE)

Autoren dieser Publikation

Anne Greinus (INFRAS AG)

Frank Bruns (EBP AG)

Lutz Ickert (INFRAS AG)

Maleika Wörner (INFRAS AG)

Cuno Bieler (INFRAS AG)

Raphael Grässli (INFRAS AG)

Lucas Meyer de Freitas (EBP AG)

INFRAS AG, Binzstrasse 23, 8045 Zürich

Tel. +41 44 205 95 95

info@infras.ch

EBP Schweiz AG, Mühlebachstrasse 11, 8032 Zürich

Tel. +41 44 395 16 16

info@ebp.ch

Projektleitung

Joséphine Leuba, Bundesamt für Raumentwicklung (ARE)

Franziska Borer Blindenbacher (Stv.), Bundesamt für Raumentwicklung (ARE)

Begleitgruppe

Nicole Mathys, Bundesamt für Raumentwicklung (ARE)

Martin Tschopp, Bundesamt für Raumentwicklung (ARE)

Paolo Maltese, Bundesamt für Strassen (ASTRA)

Christian Gigon, Bundesamt für Statistik (BFS) (bis Januar 2022)

Alexandra Quandt, Bundesamt für Statistik (BFS)

Markus Liechti, Bundesamt für Verkehr (BAV)

Max Schulthess, Bundesamt für Zivilluftfahrt (BAZL)

Sebastian Dickenmann, Bundesamt für Energie (BFE)

Sarah Bochud, Staatssekretariat für Wirtschaft (SECO) (bis Januar 2022)

Philemon Krähenmann, Staatssekretariat für Wirtschaft (SECO)

Bezugsquellen

Elektronische Version: <https://www.are.admin.ch/are/de/home/mobilitaet/grundlagen-und-daten/kuti.html>

Inhalt

Zusammenfassung	5
1. Einführung	13
1.1. Hintergrund	13
1.2. Auftrag	14
1.3. Systemgrenzen und Vorgehen	15
2. Literaturanalyse	20
2.1. Vorbemerkungen: Unreine öffentliche Güter und Externalitäten	20
2.2. Überlastung der Infrastruktur: Zeitkosten	23
2.2.1. Strasse	24
2.2.2. Luftverkehr	46
2.2.3. Schiene	51
2.3. Überlastung der Verkehrsmittel: Komfortkosten im öffentlichen Verkehr	60
3. Zeitverlustkosten Strasse	64
3.1. Aktualisierung der Stauzeitkosten aus Sicht der Verkehrsart Schwerverkehr	64
3.1.1. Vorbemerkungen	64
3.1.2. Methodisches Vorgehen	65
3.1.3. Ergebnisse	69
3.2. Zeitverlustkosten aus Sicht der Verkehrsteilnehmenden	74
3.2.1. Vorbemerkungen	74
3.2.2. Beschreibung möglicher Datengrundlagen	74
3.2.3. Beschreibung der Datenanalyse und -aufbereitung	88
3.2.4. Vorgehen zur Ermittlung der volkswirtschaftlichen Kosten	104
3.2.5. Ergebnisse	111
3.3. Plausibilisierungen	117
4. Komfortverlustkosten ÖV	121
4.1. Operationalisierung	121
4.2. Ermittlung der Wertgerüste	123
4.3. Ermittlung der Mengengerüste	127

4.3.1.	Übersicht	127
4.3.2.	Mengengerüste Schiene	127
4.3.3.	Mengengerüste regionaler Busverkehr	136
4.3.4.	Städtischer Nahverkehr	142
4.4.	Ergebnisse und Fazit	143
5.	Schnittstellen und Kompatibilität KfV-Statistik	146
5.1.	Konzeption der heutigen KfV-Statistik	146
5.2.	Künftige Sicht der Verkehrsteilnehmenden und Empfehlungen	147
6.	Fazit und Ausblick	149
Annex		151
A1.	Wohlfahrtstheoretische Grundlagen	151
A2.	Soziale Grenzkosten gemäss EU Handbook	153
A3.	Capacity-Restraint Funktionen und Ableitung von Grenz- und Durchschnittskosten	154
A4.	Kenngrossen zur Herleitung der Kostensätze	155
A5.	Plausibilisierung Aktualisierungstool	156
Abbildungsverzeichnis		157
Tabellenverzeichnis		159
Abkürzungsverzeichnis		162
Literatur		164

Zusammenfassung

Hintergrund, Auftrag und Systemgrenzen

Vorliegend steht die volkswirtschaftlich optimale Nutzung der (überlastbaren) Strasseninfrastruktur und der Verkehrsmittel im Öffentlichen Verkehr (ÖV) im Vordergrund. Bei Überlastungen von Infrastrukturen – v.a. der Strasse, bei der die Kapazitäten nicht vorab zugeteilt werden – resultieren niedrigere Geschwindigkeiten und damit höhere Kosten für die übrigen Nutzenden. Bei Überlastungen von kollektiv genutzten Verkehrsmitteln sinkt der Komfort. Aus Sicht der Verkehrsteilnehmenden handelt es sich hierbei um Externalitäten, weil die Nutzung eine Wirkung auf die anderen Verkehrsteilnehmenden hat, aber im Preis für die Nutzung nicht internalisiert ist, d.h. keine Transaktion am Markt stattfindet.

Kosten der Überlastung der Infrastruktur und von Verkehrsmitteln aus Sicht der Verkehrsteilnehmenden wurden in der Schweiz bisher nicht quantifiziert. Mit dem EU Handbook für externe Verkehrskosten liegen grobe Schätzungen lediglich für die Zeitverlustkosten aus Sicht Verkehrsteilnehmende für die Schweiz vor (Van Essen et al. 2019). Das Bundesamt für Raumentwicklung möchte diese Lücke schliessen. Das vorliegende Projekt umfasste folgende Aufträge:

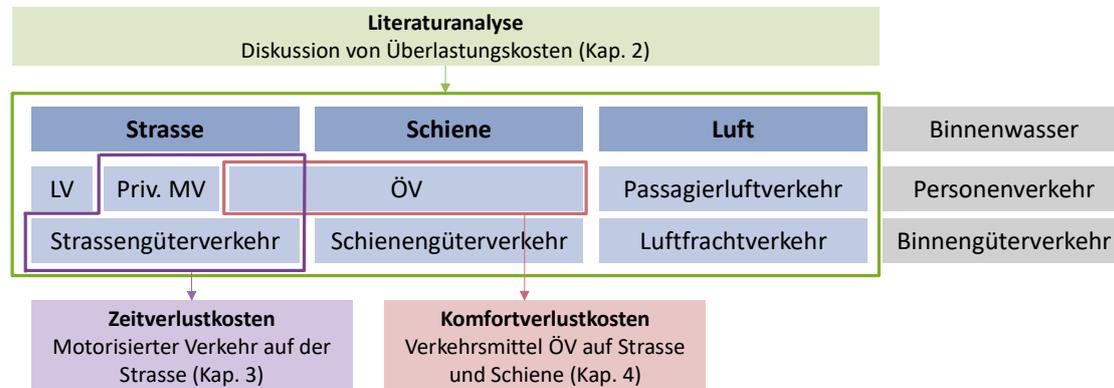
- Definition von Überlastungskosten aus Sicht der Verkehrsteilnehmenden und Identifizierung relevanter Mengen und Kostensätze auf Basis einer Literaturanalyse
- Ermittlung und Erfassung relevanter Daten für die Zeitverlustkosten Strasse und Komfortverlustkosten im ÖV (Mengen, Kostensätze)
- Berechnung der Überlastungskosten für das Jahr 2019 und Bereitstellung eines Aktualisierungstools

! Dieser Grundlagenbericht zu den Zeit- und Komfortverlustkosten aus Sicht der Verkehrsteilnehmenden weicht von den bisherigen Berechnungen der Stauzeitkosten für den Verkehrsträger Strasse und Verkehrsart Schwerverkehr ab. Die Stauzeitkosten aus Sicht der Verkehrsart werden jedoch zusätzlich in diesem Bericht für das Jahr 2019 aktualisiert.

Abbildung 1 zeigt die Systemgrenzen. Die Literaturanalyse berücksichtigt die drei Verkehrsträger Strasse, Schiene und Luft. Für die Strasse wurden – mit Ausnahme des Fuss- und Veloverkehrs – die Zeitverlustkosten quantifiziert. Die Komfortverlustkosten berücksichtigen den gesamten ÖV auf Strasse und Schiene.

Verspätungskosten im Schienen- und Luftverkehr sind mehrheitlich nicht auf Überlastungen zurückzuführen und nicht Gegenstand der Studie.

Abbildung 1: Systemgrenzen Literaturanalyse und Quantifizierung von Überlastungskosten



Grafik INFRAS/EBP.

Kosten der Überlastung der Strasseninfrastruktur (Zeitverlustkosten)

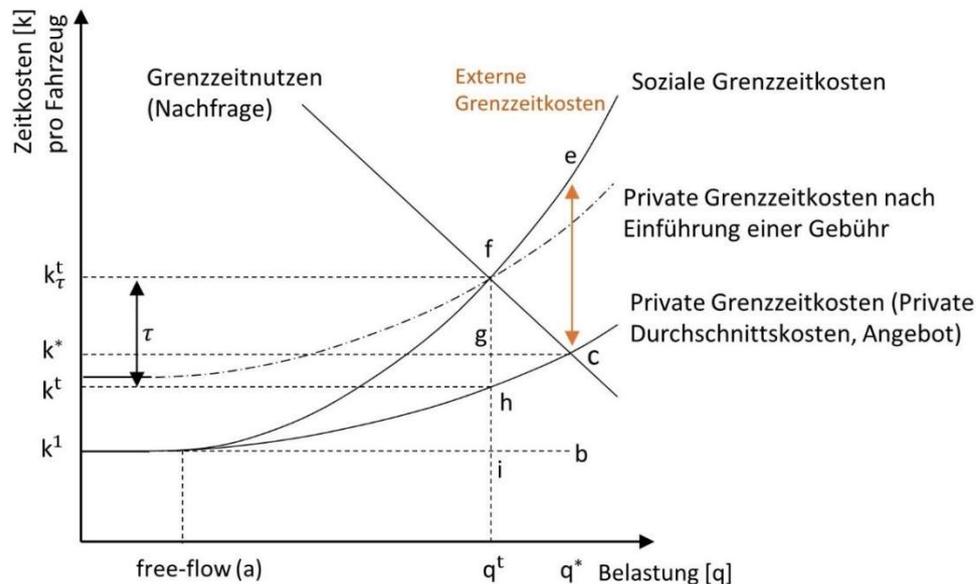
Aufgrund des Auftrags, die Zeitverlustkosten aus Sicht der Verkehrsteilnehmenden zu berechnen, steht der grenzkostenbasierte Ansatz im Vordergrund der Studie, der auch von Van Essen et al. (2019) angewandt wurde (Abbildung 2).¹ Verkehrsteilnehmende berücksichtigen lediglich ihre privaten Zeitkosten (private Durchschnittskosten), nicht aber die Zeitverlustkosten (externen Grenzzeitkosten), die sie Dritten verursachen. Dies führt zu Zahlungsbereitschaften (Nachfrage), die unter den sozialen Grenzzeitkosten (private plus externe Grenzzeitkosten) liegen.

Zur Ermittlung der volkswirtschaftlichen Kosten werden folgende Ansätze berücksichtigt:

- **Zeitverlustkosten:** Eine Überlastung liegt dann vor, wenn sich die Fahrzeuge gegenseitig behindern und die durchschnittliche Geschwindigkeit der Fahrzeuge auf einer Strecke unter einer zu definierenden Free-Flow-Geschwindigkeit (Geschwindigkeit während Nachtstunden) liegt. Die gesamten Zeitverlustkosten entsprechen dem Viereck k^1 , k^* , c , b in Abbildung 2.
- **Wohlfahrtsverlust:** Eine Überlastung liegt vor, wenn die effektive Belastung einer Strecke (q^*) über der volkswirtschaftlich optimalen Belastung (q^t) liegt. Für die im Marktgleichgewicht nachgefragte Belastung (q^*) entstehen zusätzliche Kosten in Höhe der Fläche zwischen q^t , q^* , e und f . Die Zahlungsbereitschaften entsprechen aber nur der Fläche q^t , q^* , c , f . Durch die zu tiefen Preise ergibt sich also ein Kostenüberschuss, was zu einem Wohlfahrtsverlust führt (Dreieck c , e und f in Abbildung 2).
- **Externe Grenzzeitkosten:** Die gesamten externen Grenzzeitkosten entsprechen der Fläche unterhalb der sozialen Grenzzeitkostenkurve abzüglich der Fläche unterhalb der privaten Durchschnittskostenkurve bei der jeweiligen effektiven Belastung (q^*) in Abbildung 2.

¹ Die Stauzeitkosten insgesamt und aus Sicht der Verkehrsart Schwerverkehr werden in dieser Grundlagenstudie für das Jahr 2019 auf Basis der bisherigen Studien (Keller und Wüthrich 2016, Keller 2019) aktualisiert, sind aber nicht im Fokus und werden in der Zusammenfassung daher nicht berücksichtigt. Vorgehen und Ergebnisse sind in Kap. 3.1 zusammengefasst.

Abbildung 2: Marktgleichgewicht und volkswirtschaftliches Optimum auf der Strasse



Grafik INFRAS. Quelle: angelehnt an Gerike (2018).

Die effektive Belastung an durchschnittlichen Werktagen (DWV) liegt mit dem Nationalen Personenverkehrsmodell (NPVM) des UVEK für die jeweiligen Streckensegmente vor. Auf Basis des DWV aus dem NPVM pro Streckensegment und mittels eines Umrechnungsfaktors auf Basis der HERE-Daten kann die Belastung des durchschnittlichen Nicht-Wochentagsverkehrs (DNWV) bestimmt werden. Die streckenspezifischen Tagesbelastungen für durchschnittliche Wochentage und Nicht-Wochentage werden mit typisierten Tagesganglinien und Geschwindigkeitsprofilen aus dem Datensatz HERE (Datensatz 2019) ergänzt.

Zur Bestimmung des Wohlfahrtsverlusts und externen Grenzzeitkosten wurden die Kostenfunktionen definiert, eine Nachfragekurve geschätzt sowie die optimale Belastung iterativ bestimmt (Cobb-Web-Ansatz). Capacity-Restraint-Funktionen je Streckenabschnitt und Tagesstunde bilden die Basis der Kostenkurven. Die Kostensätze zur Monetarisierung der Zeitverluste stützen sich auf die VSS-Normen (vgl. Kap. 2.2.1.2 bzw. 2.2.1.3) und sind in Tabelle 1 für das Jahr 2019 zusammengefasst.

Tabelle 1: Aktualisierter Kostensatz für das Jahr 2019 (in CHF pro Fahrzeugstunde)

	PW	LI	SNF
2019	42.5	40.0	68.2

PW: Personenwagen, LI: Lieferwagen, SNF: Schwere Nutzfahrzeuge.

Tabelle INFRAS. Quellen: Keller 2019, BFS 2021a, BFS 2021b, eigene Berechnungen.

Tabelle 2 fasst die Ergebnisse zu den volkswirtschaftlichen Zeitkosten auf der Strasse nach Fahrzeugkategorien für das Jahr 2019 zusammen.

Tabelle 2: Getragene Zeitverlustkosten, Wohlfahrtsverlust und externe Grenzzeitkosten auf der Strasse nach Fahrzeugkategorien im Jahr 2019 (Mio. CHF)

	PW	LI	SNF	Total
Gesamte Zeitverlustkosten	2'708	275	148	3'131
Wohlfahrtsverlust	28.5	2.9	1.2	32.6
Externe Grenzzeitkosten	1'039	113	92	1'244

LI: Lieferwagen, PW: Personenwagen, SNF: Schwere Nutzfahrzeuge.

Tabelle INFRAS. Quelle: Eigene Berechnungen.

Die **gesamten Zeitverlustkosten**, die sich die Verkehrsteilnehmenden gegenseitig verursachen, betragen rund 3.1 Mrd. Franken im Jahr 2019. Mit 87% tragen die Personenwagen den grössten Anteil daran. Rund 88% der Zeitverlustkosten resultieren an Werktagen. Die durchschnittlichen Zeitverlustkosten pro Fahrzeugkilometer – für Fahrzeuge, die einen Zeitverlust erleiden – betragen rund 4.4 Rp. bei den Personenwagen, 5.9 Rp. bei den Lieferwagen und 6.6 Rp. bei den schweren Nutzfahrzeugen.

Der **Wohlfahrtsverlust** beträgt im Jahr 2019 rund 33 Mio. Franken. Er verteilt sich zu rund 87% auf die PW und zu 13% auf den Güterverkehr. An Wochentagen und Wochenenden ist er in etwa gleich hoch, weil die volkswirtschaftlich optimalen Belastungen insbesondere an den Wochenenden im Freizeitverkehr überschritten werden. Beispielsweise ist die durchschnittliche Belastung des Gotthardtunnels an den Wochenenden am höchsten. Die Höhe des Wohlfahrtsverlusts hängt massgeblich von der Höhe optimalen Belastung ab. Je höher die optimale Belastung ist, desto geringer die Wohlfahrtsverluste. Vorliegend wurden auf Basis der sozialen Zeitkosten- und Nachfragefunktion optimale Belastungen ermittelt, die nahe bei der Kapazität des jeweiligen Streckensegments liegen. Ein Wohlfahrtsverlust resultiert dann, wenn die effektive Belastung über der optimalen Belastung liegt.

Die **gesamten externen Grenzzeitkosten** belaufen sich im Jahr 2019 auf rund 1.2 Mrd. Franken, wovon rund 84% auf die Personenwagen entfallen. Dies entspricht knapp 9% der gesamten externen Kosten des Strassenverkehrs aus Sicht Verkehrsteilnehmende im Jahr 2019 (ARE 2022).

Zur Plausibilisierung der gesamten Zeitverlustkosten liegen die bisherigen Studien zu den Stauzeitkosten sowie das EU Handbook vor. Im EU Handbook (Van Essen et al. 2019) wurden die gesamten Zeitverlustkosten und der Wohlfahrtsverlust ermittelt. Die vorliegenden Zeitverlustkosten weichen nur minim von den Ergebnissen von Van Essen et al. (2019) ab. Hingegen

liegt der vorliegend ermittelte Wohlfahrtsverlust um ein Vielfaches unter den Ergebnissen des EU Handbooks. Aufgrund des unterschiedlichen Vorgehens und anderer Datengrundlagen ist ein Vergleich jedoch schwierig bzw. kaum möglich. Die vorliegend ermittelten Ergebnisse für die Schweiz erscheinen plausibel.

Kosten der Überlastung im ÖV (Komfortverlustkosten)

Für das vorliegende Projekt wird «Überlastung» als Auslastungen grösser als 90% der Sitzplatzverfügbarkeit definiert. Einerseits entspricht dies der Definition der Stated Preference-Befragung (SP-Befragung, ARE, welche auf dem Mikrozensus Mobilität und Verkehr MZMV, BFS/ARE, basiert), welche die Grundlage für die Ermittlung der Wertgerüste bildet. Andererseits wird damit auf eine Vergleichbarkeit der Interpretation der Auslastungen im Strassenverkehr abgezielt. Im Strassenverkehr entstehen Kosten der Auslastung aus funktionalen Gründen und nicht aus Komfortgründen (oder einen «Wunschzustand»), denn beim Strassenverkehr entstehen Überlastungen nur dann, wenn ein zusätzliches Fahrzeug, die Reisezeit der anderen Fahrzeuge beeinträchtigt, was erst dann zustande kommt, wenn die Kapazität der Strasse einen kritischen Punkt erreicht. Es ist daher auch hier sinnvoll, erst Komfortverluste zu berechnen, wenn eine funktionale Grenze (hier: Sitzplatzverfügbarkeit) erreicht wird. Auch im ÖV ist es sinnvoll erst Komfortverluste zu berechnen, wenn eine funktionale Grenze erreicht wird. Wenn nur wenige Reisende im Zug oder Bus sind, dann stört auch ein zusätzlicher Reisender nicht den Komfort der anderen. Der 90%-Wert entspricht einer Grenze, bei der bei hohen Auslastungen mehrere Passagiere zum Stehen gezwungen sind, da kein Sitzplatz in der direkten Umgebung mehr gefunden werden kann. Die Untersuchung differenziert im ÖV nach den folgenden Verkehrsarten:

- Bahn (Fernverkehr und regionaler Personenverkehr)
- Regionalbusverkehr
- Städtischer Nahverkehr, Ortverkehr mit Tram, Bus und Trolleybus

Als Wertgerüst werden für jede Verkehrsart die zusätzlichen individuellen Komfortkosten pro Person ermittelt. Dabei werden die Kostensätze für die Reisezeit ohne und mit Überlast unterschieden. Aus der SP-Befragung (ARE 2017) und Angaben aus dem MZMV 2015 (BFS/ARE 2017) wurden die zusätzlichen Zeitkosten bei Überlast berechnet (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Ermittlung der zusätzlichen individuellen Komfortkosten pro Person und Verkehrsart bei Überlast (Preisstand 2019)

Verkehrsart	Mittlere Reisedistanz [km] ¹⁾	Mittlere Reisezeit [min] ¹⁾	Reisezeitwert [CHF/h] ²⁾	VTT-Multiplikator bei Überlast	Komfortkostensatz bei Überlast [CHF/h]
Bahn	32	28	12.81	1.049	0.644
Regionalbusverkehr	8	17	10.95	1.059	0.662
Städtischer Nahverkehr	3.5	11.5	9.87	1.067	0.677

Quellen: 1) MZMV 2015; 2) ARE, 2017; eigene Berechnungen.

Als Mengengerüst wird die Anzahl Personenstunden, die im Zustand der Überlastung gereist wird, benötigt. Je Fahrt und Streckenabschnitt sollten die folgenden Angaben vorliegen:

1. Anzahl Passagiere in Fahrten im überlasteten Zustand (entsprechend der Datenverfügbarkeit bei den Wertgerüsten Nachfrage grösser als 90% der Sitzplatzkapazität)
2. Kapazität des Fahrzeuges
3. Fahrzeit auf dem Streckenabschnitt

Die Datenlage stellt sich diesbezüglich wie folgt dar:

- Zähl- und Daten werden im ÖV von Transportunternehmen zwar erhoben, diese werden aber nicht in einer bundesweiten Datenbank erfasst. Die Bestellung und die damit verbundene Verarbeitung von Daten in unterschiedlichen Datenformaten übersteigt den Umfang und das Budget dieses Projektes.
- Für die Bahnunternehmen SBB, BLS, SOB, RhB, MGB, MOB stehen kursgenaue mittlere Auslastungsdaten aus der HOP-Datenbank von SBB-Personenverkehr zur Verfügung. Für jede Linie liegt die mittlere Auslastung nach Streckenabschnitt, Monat und Wochentag und Tageszeit vor.
- Für den Regionalbusverkehr steht die RPV-Datenbank des BAV zur Verfügung, aus der mittlere Auslastungen nach Linien ermittelt werden können. Die Datenqualität ist im Vergleich zur Bahn somit deutlich niedriger, da die Auslastungsdaten der RPV-Datenbank keine Differenzierungen wie z.B. nach Streckenabschnitten, täglichen Spitzenauslastungen oder Schwankungen der Auslastung im Wochen- oder Jahresverlauf aufweisen.
- Für den städtischen Nahverkehr sind Auslastungsdaten nicht bundesweit erfasst. Hier wurden probeweise Daten der Basler Verkehrsbetriebe ausgewertet.

Während für den städtischen Nahverkehr die Anzahl Personenstunden im überlasteten Zustand aufgrund der genügenden Differenzierung der Auslastungsdaten direkt ablesbar waren, musste für die Schiene und den regionalen Busverkehr eine Methode entwickelt werden, um die benö-

tigte Kennzahl zu schätzen. Die ermittelten Mengengerüste je Verkehrsart werden mit den zusätzlichen Zeitkosten bei Überlast aus Tabelle 50 multipliziert. Die folgende Tabelle zeigt die Resultate.

Tabelle 4: Komfortkosten der Reisenden in öffentlichen Verkehr für das Jahr 2019 (Überlast = Auslastung > 90% der Anzahl Sitzplätze)

Verkehrsart	Segment	Personenstunden mit Überlast [Persh/a] (Anteil am Gesamt in %)	Komfortkostensatz bei Überlast [CHF/h]	Komfortverlustkosten je Jahr [CHF/a]
Bahn	<i>Fernverkehr</i>	1'590'748	0.644	1'023'859
	<i>Regionalverkehr</i>	5'562601	0.644	3'580'278
	Summe	7'153'349 (17.5%)	-	4'604'137
Regionalbusverkehr		396'718 (1%)	0.662	262'660
Städtischer Nahverkehr	Basler Verkehrsbetriebe	2'106'934	0.677	1'427'353
	Weitere 5 grössten Städte	31'171'611	0.677	21'117'373
	Summe	33'278'545 (81.5%)		22'544'726
Summe		40'828'612		27'411'523

Mit den hier durchgeführten Auswertungen und Berechnungen wurden erstmals die Komfortkosten im öffentlichen Verkehr in der Schweiz berechnet. Für die Bahn und für die Probeauswertung für den Nahverkehr in Basel liefert die Methodik nach Einschätzung der Autoren relativ genaue Mengengerüste. Im städtischen Nahverkehr ist die Hochrechnung auf weitere Verkehrsbetriebe aber hier nur sehr grob möglich gewesen. Die Mengengerüste für den regionalen Busverkehr weisen aufgrund der geringeren Datenqualität und der kleinen Stichprobe für die Ermittlung der Verteilungsdichtekurven eine deutlich grössere Ungenauigkeit auf.

Die Ergebnisse zeigen, dass Komfortkosten aufgrund von Überlast vor allem im Regionalverkehr auf der Bahn und im städtischen Nahverkehr auftreten. Dies sind gerade diejenigen Bereiche, in denen die Besteller und Transportunternehmen aufgrund von Optimierungs- und Effizienzüberlegungen auch bewusst Stehplätze in Kauf nehmen. In diesem Bereich stösst das hier entwickelte Verfahren aber an seine Grenzen, da die Überlast allein über die verfügbare Anzahl Sitzplätze definiert ist. Eine differenzierte Betrachtung des Komforts von Sitzplätzen und

Stehplätzen würde zweierlei erfordern: Es müsste die Stehplatzkapazität in Personen oder noch besser die Stehplatzfläche je Fahrzeug bekannt sein. Im städtischen Nahverkehr (zumindest bei einzelnen Städten) liegen Kapazitätsangaben vor, nicht aber beim Regionalbusverkehr und bei der Bahn. Ferner müssten Wertgerüste auch für den Komfort von Stehplätzen ermittelt werden. Diese sollten dann bspw. in einer Zahlungsbereitschaft bezogen auf die verfügbare Fläche je Person bestehen. Hier besteht weitergehender Datenerhebungs- und Forschungsbedarf.

Fazit und Ausblick

Die Ergebnisse zeigen, dass die Zeitverlustkosten, die sich die Verkehrsteilnehmenden gegenseitig aufbürden, auf der Strasse bedeutend sind. Die gesamten Zeitverlustkosten betragen rund 3.1 Mrd. Franken und die externen Grenzzeitkosten rund 1.3 Mrd. Franken im Jahr 2019. Der Wohlfahrtsverlust in Höhe von rund 33 Mio. Franken zeigt, dass es punktuell und insbesondere an Wochenenden, d.h. v.a. im Freizeitverkehr, zu deutlichen Überlastungen kommt.

Mit den hier durchgeführten Auswertungen und Berechnungen wurden erstmals die Komfortverlustkosten im öffentlichen Verkehr in der Schweiz berechnet. Sie betragen im Jahr 2019 rund 27 Mio. Franken. Komfortverlustkosten aufgrund von Überlast treten vor allem im Regionalverkehr auf der Bahn und im städtischen Nahverkehr auf. Dies sind gerade diejenigen Bereiche, in denen die Besteller und Transportunternehmen aufgrund von Optimierungs- und Effizienzüberlegungen auch bewusst Stehplätze in Kauf nehmen.

Die Arbeiten haben gezeigt, dass es weiteren Vertiefungsbedarf gibt:

- Bei den **Zeitverlustkosten auf der Strasse** bedürfte es weiterer Vertiefungen, um Belastungsdaten je Streckensegment differenziert für ÖV-Fahrzeuge zu ermitteln und entsprechend für die Berechnungen aufzubereiten.
- Der Fokus bei der Ermittlung der Zeitverlustkosten lag auf den durch den einzelnen Verkehrsteilnehmenden getragenen Kosten. In einer Vertiefungsarbeit wäre der Aspekt der Verursachung analog dem vereinfachten Vorgehen des EU Handbooks (Van Essen et al. 2019) zu vertiefen.
- Aufgrund des Fokus auf die Überlastung wurden keine Verspätungskosten ÖV, Schienen- und Luftverkehr quantifiziert, da diese mehrheitlich nicht auf Überlastungen zurückzuführen sind, sondern Qualitätseinbussen darstellen. Gleichwohl gibt es für diese Kosten einen Bedarf an aktuellen Angaben wie die Diskussionen in der Begleitgruppe zeigt.
- Das vorliegend entwickelte Verfahren zur Schätzung der **Komfortverlustkosten im ÖV** stösst an gewisse Grenzen, da die Stehplätze nicht berücksichtigt werden konnten. Hier besteht weitergehender Datenerhebungs- und Forschungsbedarf.

1. Einführung

1.1. Hintergrund

Leistungsfähige und gut funktionierende Infrastrukturen sichern die Wettbewerbsfähigkeit der Schweiz und den inneren Zusammenhalt der Gesellschaft (Bundesrat 2010). Eine zu hohe Nachfrage auf einer gegebenen Infrastruktur führt zu Überlastungen. Die Nutzung eines Einzelnen hat dann Auswirkungen auf andere Nutzende: **Bei Kapazitätsüberlastungen auf Infrastrukturen – v.a. der Strasse, bei der die Kapazitäten nicht vorab zugeteilt werden – resultieren niedrigere Geschwindigkeiten und damit höhere Kosten für die übrigen Nutzenden. Bei Überlastungen von kollektiv genutzten Verkehrsmitteln sinkt der Komfort.**

Weil die Nutzung eine Wirkung auf die anderen Verkehrsteilnehmenden hat, aber im Preis für die Nutzung nicht internalisiert ist, d.h. keine Transaktion am Markt stattfindet, liegt in diesem Fall eine Externalität vor. Knieps (2007) definiert dies – im Gegensatz zu monetären Externalitäten – als negative physische Externalität. Aus Sicht der Verkehrsteilnehmenden beinhalten die Kosten der Überlastung daher externe Anteile. Die Nutzung der Infrastruktur ist nicht volkswirtschaftlich effizient. Im Rahmen des vorliegenden Projekts werden daher Überlastungskosten thematisiert, um Ineffizienzen aufzuzeigen. Im Fokus stehen dabei unreine öffentliche Güter, bei denen sich die Nutzenden bei steigender Kapazitätsauslastung im Konsum gegenseitig behindern (vgl. hierzu Kap. 2.1). **Der Fokus liegt dabei auf der Sicht der Verkehrsteilnehmenden und einer volkswirtschaftlich optimalen Bepreisung der Infrastruktur- bzw. Verkehrsmittelnutzung.**

Bisher standen die externen Kosten aus Sicht der Verkehrsträger im Vordergrund (ARE 2022, BFS 2019a). Die externen Kosten und Nutzen des Verkehrs werden vom ARE regelmässig publiziert (ARE 2022). Externe Unfall-, Umwelt- und Gesundheitskosten aus Sicht Verkehrsträger fliessen in die Statistik der Kosten und der Finanzierung des Verkehrs (KFV) ein (BFS 2021c). Die gesamten Stauzeitkosten aus Sicht des Verkehrsträgers Strasse wurden regelmässig quantifiziert (z.B. INFRAS 1998, Keller et al. 2007; vgl. hierzu Kap. 2.2.1.2). Eine Differenzierung der gesamten Stauzeitkosten in interne und externe Kosten ist mit dem bisherigen Ansatz nicht möglich (vgl. auch Maibach et al. 2008). Zusätzlich werden die externen Kosten aus Sicht der Verkehrsart in Bezug auf den Schwerverkehr zur Ermittlung der Kostendeckung der leistungsabhängigen Schwerverkehrsabgabe (LSVA) aufgrund des Bundesgerichtsentscheids (BGE) zur Schwerverkehrsabgabe ausgewiesen. Seit 2012 werden die Stauzeitkosten daher insgesamt für den Verkehrsträger Strasse und zusätzlich aus Sicht der Verkehrsart Schwerverkehr geschätzt (Keller und Wüthrich 2012, Keller und Wüthrich 2016, Keller 2019).

Zeitverlustkosten im Schienen-, Luft- und Binnenschiffsverkehr werden bisher nicht regelmässig erfasst (Maibach et al. 2005, 2006, 2008) und werden im vorliegenden Bericht nicht ermittelt. Sie stellen keine Kosten der Überlastung der Verkehrsinfrastruktur dar, da die Nutzung der Infrastruktur ex-ante definiert wird (vgl. hierzu Kap. 1.3 sowie 2.1).

Künftig sollen die externen Effekte des Verkehrs aus Sicht der Verkehrsteilnehmenden in den Fokus gerückt werden. Dies vor dem Hintergrund, dass die Grenzzeitkosten und die volkswirtschaftlich effiziente Nutzung der Infrastruktur im Fokus stehen. Aktuell ist zudem eine Methodenüberprüfung zur Kostenwahrheit im Verkehr geplant.

Kosten der Überlastung der Infrastruktur und von Verkehrsmitteln aus Sicht der Verkehrsteilnehmenden wurden bisher in der Schweiz nicht quantifiziert. Mit dem EU Handbook liegen Schätzungen lediglich für die Stauzeitkosten für die Schweiz vor (Van Essen et al. 2019). Das Bundesamt für Raumentwicklung möchte diese Lücke schliessen. Im Rahmen des vorliegenden externen Auftrags sollen die Definition und die Methodik zur Ermittlung von volkswirtschaftlichen Kosten der Überlastung der Verkehrsinfrastruktur beschrieben werden. Zudem sind die Kosten der Überlastung der Strasse (Zeitkosten) und der Verkehrsmittel im ÖV (Komfortkosten) für das Jahr 2019 zu ermitteln. Die Studie soll neue Erkenntnisse zur Debatte über aktuelle und künftige verkehrspolitische Instrumente (z.B. Leistungsabhängige Schwerverkehrsabgabe (LSVA), fahrleistungsabhängige Abgabe) liefern.

Damit weicht dieser Grundlagenbericht von den bisherigen Berechnungen der Stauzeitkosten für den Verkehrsträger Strasse und Verkehrsart Schwerverkehr ab.

1.2. Auftrag

Es stehen drei Zielstellungen des ARE im Fokus der Grundlagenstudie:

1. Definition von Überlastungskosten und Identifizierung relevanter Mengen und Kostensätze
 - Es ist eine umfassende, theoretische und systematische Literaturanalyse von Kosten der Überlastung von Verkehrsinfrastrukturen und Überlastung von Verkehrsmitteln (Zeitkosten, Komfortkosten, weitere) auf Strasse, Schiene und in der Luft durchzuführen. Ziel ist es, relevante Kostenkategorien, Berechnungsmethoden und zu erfassende Daten (Mengen, Kostensätze) zu identifizieren.
 - Der Fokus liegt auf der Sicht der Verkehrsteilnehmenden.
 - Ziel ist es, Gesamtkosten, Wohlfahrtsverluste sowie Grenzzeitkosten und deren externe Dimension aus Sicht der Verkehrsteilnehmenden auszuweisen. Hierbei liegt der Fokus auf den kurzfristigen Kosten. Die langfristigen Effekte werden qualitativ diskutiert. Der Fokus soll zudem auf den Grenzzeitkosten und dem Wohlfahrtsverlust liegen.

2. Ermittlung und Erfassung relevanter Daten (Mengen, Kostensätze)

- Im Vordergrund steht im Rahmen des vorliegenden Projekts die Quantifizierung von Zeitkosten auf der Strasse und Komfortkosten im ÖV auf Strasse und Schiene für das Jahr 2019.
- Bei der Ermittlung der Überlastungskosten auf der Strasse sind möglichst folgende Differenzierungen vorzusehen:
 - Strassenkategorien (mindestens 2): Nationalstrassen/Autobahnen, übrige
 - Verkehrsformen und -mittel (4): privater Strassenverkehr, ÖV auf Strasse, Fuss- und Veloverkehr (Langsamverkehr), Strassengüterverkehr²
 - zeitliche Differenzierungen (2+2): 1. Spitzenzeiten, Randzeiten, 2. Wochentage, Wochenende

3. Berechnung der Überlastungskosten und Bereitstellung eines Aktualisierungstools

- Die Berechnungen sind für 2019 durchzuführen.
- Es ist ein Aktualisierungstool bereitzustellen. Ziel ist es, dass die Daten jährlich durch das ARE aktualisiert werden können.

1.3. Systemgrenzen und Vorgehen

Die Literaturanalyse umfasst die drei Verkehrsträger Strasse, Schiene und Luft und die darauf verkehrenden Verkehrsmittel im Personen- und Güterverkehr (Abbildung 3).

Abbildung 3: Systemgrenzen Literaturanalyse

Strasse		Schiene	Luft	Binnenwasser
Priv. MV	LV	ÖV	Passagierluftverkehr	Personenverkehr
Strassengüterverkehr		Schienengüterverkehr	Luftfrachtverkehr	Binnengüterverkehr

Grafik INFRAS/EBP.

Tabelle 5 fasst die Definitionen und Begriffe in Bezug auf die Systemgrenzen zusammen. In einem ersten Schritt werden basierend auf einer umfassenden Literaturanalyse und ergänzenden Interviews die drei Verkehrsträger, Verkehrsobjekte und Verkehrsformen umfassend analysiert, mögliche Methoden zu Erfassung sowie mögliche Datenquellen identifiziert (Kap. 2).

² Zudem sind auch die Kosten nach Verkehrsart für den Schwerverkehr zu quantifizieren.

Tabelle 5: Definitionen und Begriffe

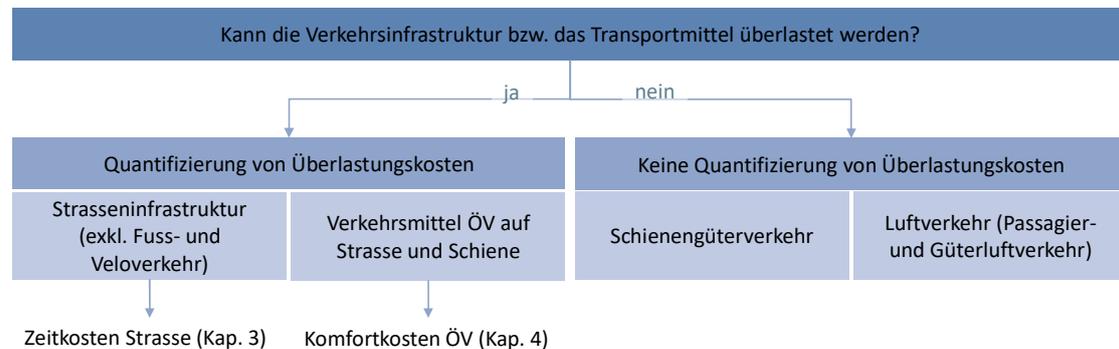
Verkehrsträger	Verkehrsobjekt	Verkehrsform	Verkehrsmittel
Strasse	PV	privater motorisierter Verkehr	Personenwagen, Gesellschaftswagen/Cars, Motorräder, Motorfahrräder, schnelle E-Bikes
		Fuss- und Veloverkehr	Fussgänger/-innen, Velo inkl. Pedelec, FäG
		Öff. Strassenverkehr	Auto-, Trolleybusse, Trams
	GV	Strassengüterverkehr	Lieferwagen, Lastwagen, Sattelschlepper
Schiene	PV	Schienenpersonenverkehr	Personenzug
	GV	Schienengüterverkehr	Güterzug
Luftverkehr	PV	Passagierluftverkehr	Flugzeuge, Helikopter
	GV	Güterluftverkehr	Flugzeuge, Helikopter

FäG: fahrzeugähnliche Geräte, GV: Güterverkehr, PV: Personenverkehr

Tabelle INFRAS/EBP.

Basierend auf der Literaturanalyse (Kap. 2) werden die Segmente identifiziert, bei denen eine Überlastung und damit Effizienzprobleme auftreten können (Abbildung 4).

Abbildung 4: Übersicht zur Quantifizierung von Überlastungskosten aufgrund Ineffizienzen in der Nutzung



Grafik INFRAS.

Im Fokus der Studie steht die Ermittlung der Zeitkosten auf der Strasse und der Komfortkosten im Öffentlichen Verkehr (ÖV). Es sind jeweils die gesamten Zeitverlust- bzw. Komfortverlustkosten, der Wohlfahrtsverlust, die Grenzzeitkosten und die Aufteilung in interne und externe Kosten für das Jahr 2019 herzuleiten. Der Aspekt der kurz- und langfristigen Grenzzeitkosten soll qualitativ diskutiert werden. Kosten wie Unfall- und Umweltkosten, die aufgrund der Überlastung zusätzlich entstehen, sind nicht auszuweisen und davon abzugrenzen, da diese bereits erfasst werden und dies sonst zu Doppelzählungen führen würde (ARE 2022).

In diesem Sinne ist es eine Statistik- und Ist-Analyse, auch wenn der Output teils mit Annahmen oder Formeln generiert werden muss. Es ist kein Modell, welche das Verhalten von Nachfragenden oder Anbietenden modelliert. Auch Prognosen sind nicht Gegenstand der Studie. Die Herleitungen erfolgen für die Schweiz. Relevant ist das Territorialitätsprinzip.

In Bezug auf die Überlastung betrachten wir zwei Ebenen: 1. Die Überlastung der Infrastruktur (Zeitverlust) und 2. Die Überlastung von Verkehrsmitteln (Komfortverlust). Bei der Überlastung der Infrastruktur kann grundsätzlich zwischen folgenden Kategorien von Infrastrukturen unterschieden werden:

- Nutzung wird nicht zentral koordiniert, d.h. es werden keine Kapazitäten ex ante zugeteilt (Strasse) → Überlastung relevant;
- Nutzung wird durch eine ex-ante Zuteilung von Kapazitäten (Nutzungsrechten) zentral koordiniert (Schiene, Luft) → keine Überlastung relevant.

Öffentliche Strassen ohne Zugangsgebühren können als unreines, öffentliches Gut (Allmendgut) definiert werden, wenn ihre Kapazität nahezu ausgelastet ist. Sie sind durch Nicht-Ausschliessbarkeit und partielle Rivalität im Konsum charakterisiert (vgl. hierzu Kap. 2.1). Die Infrastruktur der Schiene und im Luftverkehr sind hingegen durch Ausschliessbarkeit charakterisiert.

Hinsichtlich der Frage der **Externalitäten** können grundsätzlich drei Sichtweisen unterschieden werden (ARE 2022, BFS 2019a):

- **Sicht der Verkehrsteilnehmenden:** Alle Kosten, die der Verursacher einer Verkehrsaktivität nicht selbst trägt, werden als extern betrachtet. Hierbei steht die volkswirtschaftlich effiziente Nutzung der Verkehrsinfrastruktur im Vordergrund. Diese Sichtweise ist im Fokus der vorliegenden Untersuchung. Die Kosten des Zeit- und Komfortverlusts sollen für diese Sicht hergeleitet werden.
- **Sicht der Verkehrsart (Schwerverkehr):** Als extern gelten bei dieser Sichtweise alle Kosten, die nicht innerhalb des Schwerverkehrs³ auf der Strasse anfallen. Es werden demnach Kosten, die ein schweres Nutzfahrzeug beispielsweise einem Personenwagen verursacht, als extern betrachtet. Diese Sichtweise wurde vom Bundesgericht für die Berechnung der leistungsabhängigen Schwerverkehrsabgabe (LSVA) vorgeschrieben. Vorliegend sind zusätzlich die Stauzeitkosten, die durch die Verkehrsart Schwerverkehr verursacht werden, zu schätzen, da dies für die Festlegung der LSVA relevant ist (vgl. hierzu Kap. 2.2.1.2).
- **Sicht der Verkehrsträger:** Der gesamte Verkehrsträger wird als Einheit betrachtet (z.B. Strasse, Schiene, Luft). Innerhalb des Verkehrsträgers werden alle Kosten, welche von den Benutzenden dieses Verkehrsträgers selbst getragen werden, als privat angesehen. Externe

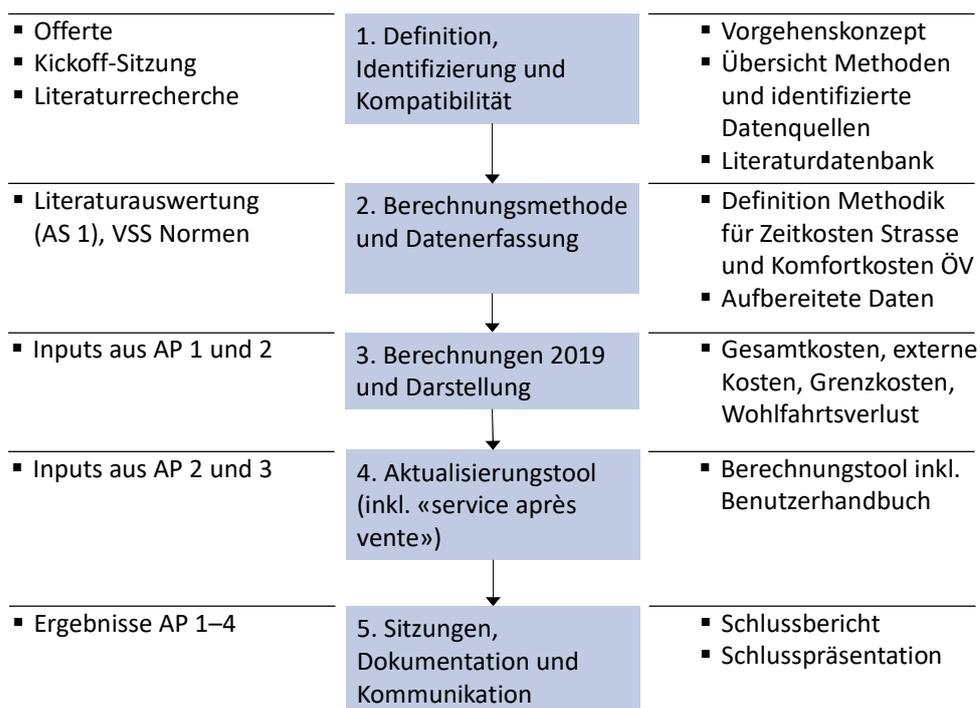
³ Zum Schwerverkehr zählen Gesellschaftswagen, Lastwagen sowie Sattelschlepper.

Kosten ergeben sich, wenn sie ausserhalb des Verkehrsträgers anfallen. Diese Sichtweise ist für die vorliegende Studie nicht direkt relevant. Jedoch ist die Kompatibilität zur Statistik der Kosten und der Finanzierung (KFV-Statistik) zu prüfen und zu beurteilen, weil die KFV-Statistik bisher auf dieser Sicht aufbaut.

Hierbei zu beachten ist, dass Zeitkosten aufgrund der Überlastung (Zeitverlustkosten) einen «Spezialfall» darstellen, da sich die Verkehrsteilnehmenden die Zusatzkosten aufgrund der Verspätung durch einen zusätzlichen Verkehrsteilnehmenden gegenseitig auferlegen und nicht der Allgemeinheit.

Das Arbeitsprogramm strukturiert das Projekt in 5 Arbeitspakete (AP) (Abbildung 5).

Abbildung 5: Arbeitsprogramm und -pakete in der Übersicht



Grafik INFRAS/EBP.

Es werden verschiedene Methoden kombiniert:

- **Literaturrecherche und -analyse:** Auswertung nationaler und internationaler Literatur, Berichte und Studien zu Kosten der Überlastung im Strassen-, Schienen- und Luftverkehr (Zeitkosten, Kosten des Komfortverlustes) sowie Erfassung in einer Literaturdatenbank mit Verschlagwortung;

- **Experteninterviews:** Durchführung von telefonischen Experteninterviews mit nationalen und internationalen Expertinnen und Experten und mögliche Datenlieferanten (z.B. SBB);
- **Datenerfassung, -aufbereitungen und -analysen:** Erfassung, Aufbereitung und Analyse von Mengen (zur Herleitung von Zeit- und Komfortverlusten) und Kostensätzen (zur Monetarisierung);

2. Literaturanalyse

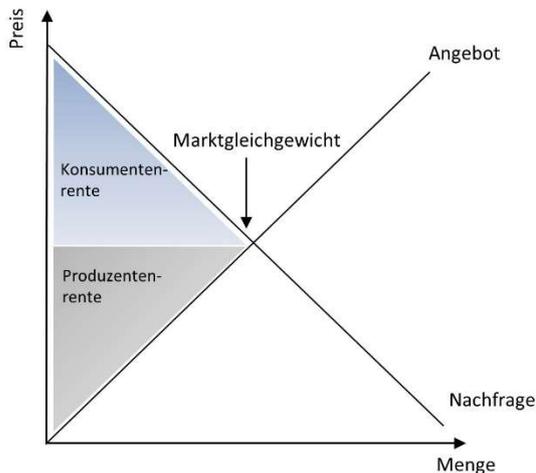
Kapitel 2 fasst die Ergebnisse der Literaturanalyse zusammen. Dieses bildet Grundlage für die Kapitel 3 zu den Zeitkosten Strasse bzw. Kapitel 4 zu den Komfortkosten ÖV.

Vorab zu den Ergebnissen der Literaturanalyse zur Überlastung der Infrastruktur (Kap. 2.2) und der Überlastung von Verkehrsmitteln (Kap. 2.3) zeigen wir in Kap. 2.1 noch einen kurzen Überblick zu wohlfahrtstheoretischen Grundlagen, Begriffen und Definitionen.

2.1. Vorbemerkungen: Unreine öffentliche Güter und Externalitäten

Die Wettbewerbstheorie beschäftigt sich mit der Funktionsfähigkeit von Märkten und unterscheidet traditionellerweise verschiedene Wettbewerbsziele bzw. -funktionen. Ein Ziel – die optimale Allokation der Ressourcen – dient der allgemeinen Wohlfahrtsmaximierung. Im Modell der perfekt funktionierenden Märkte bei vollkommener Konkurrenz müssen für ein allgemeines Marktgleichgewicht drei Bedingungen gleichzeitig erfüllt werden: Alle Konsumenten verwirklichen ihr Nutzenmaximum bezüglich ihrer Budgetbeschränkungen (Einkommen). Alle Unternehmen verwirklichen ihr Gewinnmaximum (bei gegebener Produktionsfunktion). Auf allen Märkten stimmen die angebotenen Mengen mit den nachgefragten Mengen überein. Zur Beurteilung der Frage, ob ein Marktgleichgewicht aus wohlfahrtstheoretischer Sicht erwünscht ist, muss ein «Wohlfahrts optimum» definiert werden. In der Praxis hat sich als Wohlfahrtsmass der soziale Überschuss – definiert als Summe von Konsumenten- und Produzentenrente – durchgesetzt (z.B. Knieps 2007, S. 7–9). Die ökonomische Effizienz eines Marktes wird also damit bewertet, ob die aggregierte Konsumenten- und Produzentenrente maximiert wird. Abbildung 6 zeigt die beiden Renten in einem effizienten Marktgleichgewicht.

Abbildung 6: Konsumenten- und Produzentenrente in einem ökonomisch effizienten Marktgleichgewicht



Grafik INFRAS.

Die Konsumentenrente ist die Differenz zwischen der maximalen Zahlungsbereitschaft der Konsumierenden und dem tatsächlich bezahlten Preis. Die Produzentenrente bildet die Summe der Differenzen zwischen dem Marktpreis und den Grenzkosten eines Gutes über alle von einem Unternehmen produzierten Einheiten. Die Grenzkosten sind die Kosten, die bei einer zusätzlichen Einheit eines Gutes anfallen. Anhang A1 fasst die wohlfahrtstheoretischen Grundlagen zusammen.

Der erste Lehrsatz der Wohlfahrtsökonomie besagt, dass bei vollkommenem Wettbewerb die Gleichgewichtsallokation der Ressourcen ökonomisch effizient – pareto-optimal – ist (Pindyck und Rubinfeld 2009).

Ineffiziente Märkte können auftreten, wenn Marktversagen vorliegt. Marktversagen beschreibt einen Zustand, in dem die Preise nicht die richtigen Signale an die Konsumierenden und Produzierenden senden. Dieser Fall tritt beispielsweise bei unreinen öffentlichen Gütern (Allmendegüter) ein. Unreine öffentliche Güter sind von partieller Rivalität und nicht Ausschließbarkeit geprägt, d.h. es herrscht einerseits Rivalität in der Nutzung (Konsum eines Nutzens mindert den Konsum eines anderen Nutzens), aber es ist kein Ausschluss von der Nutzung des Gutes möglich. Unreine öffentliche Güter haben bei geringer Belastung die gleichen Eigenschaften wie reine öffentliche Güter, bei steigender Kapazitätsauslastung behindern sich die Nutzenden im Konsum aber gegenseitig. In einer solchen Situation entsprechen die sozialen Grenzkosten nicht dem Grenznutzen und es liegt eine Externalität vor. Im Gegensatz zu anderen Kategorien externer Effekte besteht der externe Effekt eines unreinen öffentlichen

Gutes zwischen Nutzenden desselben Gutes, d.h. Verkehrsteilnehmende behindern sich gegenseitig.

Die privaten Durchschnittskosten der Akteure setzen sich einerseits aus einem konstanten Anteil (C) und andererseits aus einem variablen Anteil (Z(q)) zusammen. Im Bereich der geringen Belastung verändern sich die Kosten jedes weiteren Marktteilnehmenden nicht (reines öffentliches Gut). Wenn die Belastung jedoch hinreichend gross ist, verursacht jede/r zusätzliche Nutzende weitere Kosten (Rivalität).

$$\text{Private Durchschnittskosten} = C + Z(q)$$

$$\text{Soziale Kosten} = q(C + Z(q))$$

$$\text{Soziale Grenzkosten} = \frac{\partial q(C + Z(q))}{\partial q} = C + Z(q) + q \frac{\partial Z(q)}{\partial q}$$

wobei: $q = \text{Belastung}$

Die sozialen Grenzkosten und die privaten Durchschnittskosten unterscheiden sich also um $q \frac{\partial Z(q)}{\partial q}$. Dieser Term entspricht den Kosten, die ein/e zusätzliche/r Nutzende/r den anderen Marktteilnehmenden auferlegt (die externen Grenzkosten). Die fehlende Ausschliessbarkeit führt zu einer Übernutzung des Gutes und zu einem Verlust der Gesamtwohlfahrt. Eine effiziente Nutzung und damit eine Maximierung der Wohlfahrt kann mit der Erhebung einer Nutzungs- oder Zugangsgebühr erzielt werden. Um eine Internalisierung des externen Effekts erreichen zu können, muss die Gebühr der Differenz zwischen den sozialen Grenzkosten und den privaten Durchschnittskosten ($q \frac{\partial Z(q)}{\partial q}$) entsprechen.

Grenzkosten können in kurz- und langfristige Grenzkosten unterschieden werden (z.B. Knieps 2007, S. 25; Maibach et al. 2006). Als kurzfristige Grenzkosten können Kosten einer zusätzlichen Einheit ohne Berücksichtigung von allfälligen Kapazitätserweiterungen verstanden werden, d.h. die Infrastrukturkapazität ist fix. Diese sind zur Ermittlung auslastungs- bzw. nutzungsabhängiger Tarife relevant. Im Gegensatz dazu berücksichtigen langfristige Grenzkosten auch die Kosten zur Erweiterung der Kapazität, d.h. die Infrastrukturkapazität ist variabel. Diese sind zur Ermittlung des ökonomischen Wertverzehr bei der Bereitstellung eines Produktes bedeutend. Die langfristigen Grenzkosten können approximativ den Durchschnittskosten entsprechen, wenn die Kapazitätserweiterung zu denselben Kosten möglich ist wie die Erstellung (Maibach et al. 2006, S. 160). Vorliegend werden nur die kurzfristigen Grenzkosten betrachtet.

Tabelle 6: Definition relevanter Begriffe

Begriff	Definition
Ökonomische Effizienz	Maximierung der aggregierten Konsumenten- und Produzentenrente; auch allo-kative Effizienz
Konsumentenrente	Differenz zwischen dem Betrag, den Konsumierende für den Kauf oder die Nut-zung eines Gutes zu zahlen bereit sind, und dem tatsächlich gezahlten Betrag
Produzentenrente	Summe der Differenzen zwischen dem Marktpreis eines Gutes und den Grenz-kosten der Produktion über alle von einem Unternehmen produzierten Einhei-ten
Grenzkosten	Kosten einer zusätzlichen Einheit eines Gutes
Marktversagen	Situation, in der ein unregulierter Wettbewerbsmarkt ineffizient ist, weil die Preise nicht die richtigen Signale an die Konsumenten und Produzenten senden
Externalität	Handlung von Marktteilnehmenden, die andere Individuen oder Organisationen beeinflusst, aber im Marktpreis nicht berücksichtigt wird
Erster Lehrsatz der Wohl-fahrtstheorie	Gleichgewichtsallokation der Ressourcen auf einem Wettbewerbsmarkt ist öko-nomisch effizient
Wohlfahrtsverlust	Verlust von Konsumenten- und Produzentenrente
Externe Grenzkosten	Kosten, die ein/e zusätzliche/r Nutzende/r dem Kollektiv auferlegt
Soziale Grenzkosten	Kosten, die ein/e zusätzliche/r Nutzende/r verursacht (selbst und kollektiv tra-gend) Die Summe der privaten Durchschnittskosten ($C + Z(q)$) und der externen Grenzkosten ($q \frac{\partial Z(q)}{\partial q}$) Entsprechen der Ableitung der sozialen Kosten $\frac{\partial q(C+Z(q))}{\partial q} = C + Z(q) + q \frac{\partial Z(q)}{\partial q}$
Durchschnittliche private Kosten	Kosten, die der einzelne Nutzende auf sich nimmt Angebotskurve ⁴

Tabelle INFRAS. Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Arnott und Small (1993) sowie Pindyck und Rubinfeld (2009).

2.2. Überlastung der Infrastruktur: Zeitkosten

Für die Identifizierung der Berechnungsmethoden und der zu erfassenden Daten (Mengen, Kos-tensätze) erfolgte eine Recherche und Aufbereitung der aktuellen Fachliteratur bezüglich Kos-ten der Überlastung von Verkehrsinfrastrukturen und Verkehrsmitteln (Zeitkosten, Komfort-kosten, weitere) auf Strasse (Kap. 2.2.1), Schiene (Kap. 2.2.3) und in der Luft (Kap. 2.2.2).

⁴ Wenn die Konsumenten als Preisnehmende in einem Polypol agieren und ihren Einfluss auf die Kosten ignorieren, dann sind die wahrgenommenen privaten Grenzkosten gleich den privaten Durchschnittskosten (Small und Verhoef 2007). Die Akteure nehmen an, dass ihre zusätzliche Teilnahme am Markt nicht zu einer Veränderung der Durchschnittskosten führen. Die Model-lierung der Überlastung des Strassenverkehrs setzt üblicherweise diese Annahme voraus.

2.2.1. Strasse

2.2.1.1. Überlastung der Strasseninfrastruktur und resultierende volkswirtschaftliche Kosten

Im Gegensatz zum Schienen- und Luftverkehr werden die Kapazitäten auf der Strasse nicht ex ante verteilt bzw. zentral koordiniert. Eine zunehmende Auslastung der Infrastruktur führt zu gegenseitigen Behinderungen der Verkehrsteilnehmenden auf der Strasse und hat Einfluss auf den Verkehrsfluss. Es handelt sich um ein unreines öffentliches Gut (vgl. Kap. 2.2). Hinsichtlich der Überlastung können einerseits verkehrstechnische als auch verkehrsökonomische Aspekte betrachtet werden.

Überlastung der Strasseninfrastruktur (verkehrstechnische Aspekte)

Aus verkehrstechnischer Sicht wird bei Erreichen der Kapazitätsgrenze der Anlage von Überlastung gesprochen, die zu Stau führt (ASTRA 2022b). Die Kapazität der Anlage ist jedoch keine fixe, sondern stochastische Grösse. Im Verkehrsflussbericht des ASTRA werden die Staustunden regelmässig erfasst (vgl. folgenden Exkurs in der blauen Box).

Die Norm VSS 640 017a bzw. 640 018a differenziert sechs Verkehrsqualitätsstufen (Tabelle 7). Unter Verkehrsqualität wird der Grad der gegenseitigen Behinderungen der Verkehrsteilnehmenden verstanden. Mit zunehmender Auslastung und gegenseitigen Behinderungen der Fahrzeuge auf der Strasse sinken die durchschnittlichen Geschwindigkeiten der Fahrzeuge und damit die Verkehrsqualität. Die Verlangsamung führt folglich zu Zeitverzögerungen. Der Verkehrsfluss kann anhand der mittleren Verkehrsdichte (Fahrzeuge/km) beschrieben werden. Diese ergibt sich aus dem Verhältnis der Verkehrsstärke (Fahrzeuge/Std.) und der mittleren Geschwindigkeit (km/Std.). Jeder Wechsel von einer zur nächsten Verkehrsqualitätsstufe ist mit einer Verschlechterung des Verkehrsflusses und damit Zeitverzögerungen verbunden.

Tabelle 7: Verkehrsqualitätsstufen

Qualitätsstufe	Verkehrsfluss	Verkehrsqualität	Bewegungsspielraum des Fahrers
Stufe A	vollkommen frei	ausgezeichnet	in vollem Umfang
Stufe B	nahezu frei, stetig (oberer Geschwindigkeitsbereich)	gut	geringfügige Einflüsse durch übrige Verkehrsteilnehmer
Stufe C	teilweise gebunden, stabil (unterer Geschwindigkeitsbereich)	befriedigend	bemerkbar eingeschränkt (v.a. bei Fahrstreifenwechsel)
Stufe D	gebunden, annähernd stabil	ausreichend	stark eingeschränkt (ständige Behinderungen)
Stufe E	stark gebunden, teilweise instabil	mangelhaft	extrem eingeschränkt, kleinere Inhomogenitäten führen rasch zu Stillstand
Stufe F	Unterbrechung, Stillstand («Stop-and-go-Verkehr»), dauernd instabil	überlastet	stockender oder stillstehender Kolonnenverkehr (Überlastung)

Tabelle INFRAS. Quelle: VSS 640 017, VSS 640 018.

Ein Stau kann verschiedene Ursachen haben (Abbildung 7). Dies können Ereignisse wie Unfälle oder Baustellen sein, die die Kapazität kurzfristig mindern, oder ein hohes Verkehrsaufkommen und dadurch eine Kapazitätsüberlastung. Überlastung der Infrastruktur führt bei den Verkehrsteilnehmenden zu Verspätungen. Diese können wiederum zu Zeitkosten, zusätzlichen Betriebskosten, zusätzlichen administrativen Kosten, höheren Unfall- und Umweltkosten führen (INFRAS 1998). Im vorliegenden Grundlagenbericht werden die Stauzeitkosten (gesamte sowie verursacht durch die Verkehrsart Schwerverkehr) in Kap. 3.1 thematisiert und für das Jahr 2019 quantifiziert. Als Staukriterium wird im Sinne eines verkehrstechnischen Ansatzes dabei angenommen, dass die Geschwindigkeit unter 65% der Referenzgeschwindigkeit (Free-Flow) liegt (Keller 2019).

Abbildung 7: Stauursachen Strasse und Folgewirkungen

Ursachen	Wirkungen	Folgen
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Unfälle ▪ Kapazitätsüberlastung ▪ Baustellen ▪ weitere (Naturkatastrophen etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Langsamere Fahrt (Geschwindigkeitsreduktion) ▪ Stop and go ▪ Umwege 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zeitverluste ▪ Zusätzliche Betriebs- / Produktionskosten ▪ Zusätzliche administrative Kosten (z.B. Verkehrsregelung) ▪ Unfallkosten ▪ Umweltkosten

Grafik INFRAS. Quelle: Keller und Wüthrich 2012.

Exkurs: Statistik der Staustunden auf den Nationalstrassen (ASTRA 2022b, vgl. auch Kap. 3.2.2)

Das ASTRA publiziert jährlich einen Bericht zum Verkehrsfluss und Stauaufkommen (z.B. ASTRA 2022a). Darin weist es das Stauaufkommen (Stautunden) auf den Nationalstrassen aus und differenziert die Ursachen für den Stau. Die Anzahl Staustunden ist die Dauer von Staus von deren Beginn bis zu deren Auflösung in Stunden.

Als Stau werden im Staubericht des ASTRA die Verkehrszustände bzw. -situationen «Stau» sowie «stockender Verkehr» erfasst, da eine genaue Differenzierung heute noch nicht möglich ist bzw. mit sehr hohem Aufwand verbunden wäre.

Stau im Sinne der Verkehrsinformation ergibt sich, wenn

- auf Hochleistungs- oder Hauptstrassen ausserorts die stark reduzierte Fahrzeuggeschwindigkeit während mindestens einer Minute unter 10 km/h liegt und es häufig zum Stillstand kommt
- auf Hauptstrassen innerorts bei Knoten oder Engpässen die Verlustzeit insgesamt mehr als 5 Minuten beträgt.

Stockender Verkehr im Sinne der Verkehrsinformation ergibt sich,

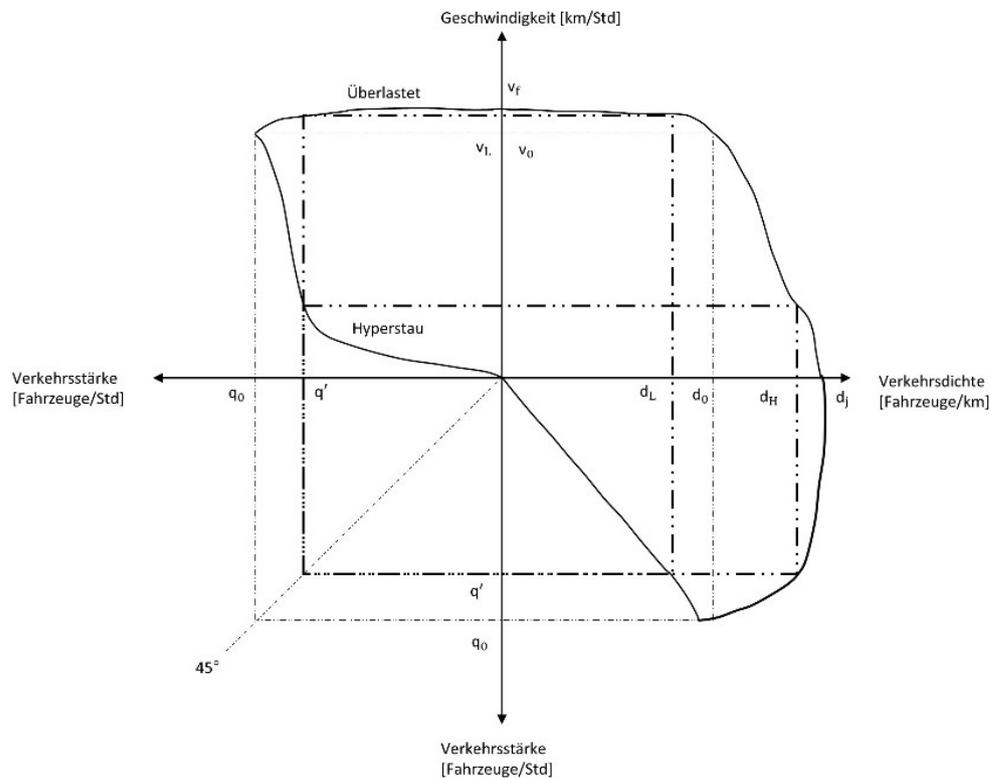
- wenn ausserorts die stark reduzierte Fahrzeug-Geschwindigkeit während mindestens einer Minute unter 30 km/h liegt und/oder es teilweise zu kurzem Stillstand kommt.

In Kap. 3.2 werden die Zeitverlustkosten aus Sicht der Verkehrsteilnehmenden quantifiziert, die entstehen, wenn die Geschwindigkeit unter der Free-Flow-Geschwindigkeit liegt. Es wird also kein Staukriterium oder eine gewisse Auslastungsstufe zugrunde gelegt. Verkehrstechnische Grundlagen bilden die Basis zur Abschätzung der volkswirtschaftlichen Kosten aus Sicht der Verkehrsteilnehmenden.

Um den Wohlfahrtsverlust und die externen Grenzzeitkosten bestimmen zu können, müssen Kenntnisse über den Verlauf der Nachfrage- und der Angebotsfunktion verfügbar sein. Die empirische Schätzung der Funktionen kann zwischen einem statischen und einem dynamischen Ansatz unterschieden werden. Modelle, die von einer gleichen Verteilung der Funktionen über ein bestimmtes Zeitintervall (Spitzenstunden, Tag) ausgehen, werden als **statisch** bezeichnet (Axhausen und Vrtic 2002).

Statische ökonomische Staumodelle beruhen auf einem Fundamentaldiagramm des Verkehrsflusses (Abbildung 8), das auf den Verkehrskenngrössen Geschwindigkeit, Verkehrsdichte und Verkehrsstärke basiert (Lindsey und Verhoef 1999). Diese Variablen werden für jedes Zeitintervall und für verschiedene Strassentypen vorab definiert. Die Form des Diagramms unterscheidet sich also zwischen den verschiedenen Strassentypen.

Abbildung 8: Fundamentaldiagramm



Grafik: INFRAS angelehnt an Lindsey und Verhoef 1999.

Die Beziehung zwischen Geschwindigkeit v und Verkehrsdichte d ist eindeutig: Die Geschwindigkeit sinkt mit steigender Verkehrsdichte. Bei einer kleinen Verkehrsdichte sind die Abstände zwischen den Fahrzeugen gross (Kehrwert der Verkehrsdichte), die Fahrzeuge fahren ungehindert mit uneingeschränkter Geschwindigkeit (*Free-Flow*) und die Verkehrsstärke ist klein. Wenn die Verkehrsstärke steigt, werden die Abstände zwischen den Fahrzeugen kleiner, die Verkehrsdichte steigt an und die Geschwindigkeit sinkt. Wenn die Kapazität einer Strasse erreicht wird, behindern sich die Fahrzeuge gegenseitig, die Verkehrsdichte steigt (die Abstände werden kleiner) und die Verkehrsstärke sinkt, weil die Geschwindigkeit sehr stark abnimmt. Aus diesem Zusammenhang lässt sich die Kontinuitätsgleichung ableiten: Das Produkt aus Geschwindigkeit v und Verkehrsdichte d ergibt die Verkehrsstärke (Greenshield 1935):

$$q = v \cdot d$$

Wenn die Verkehrsstärke unter dem Maximum liegt (unter q_0), kann der gleiche Wert entweder mit hoher Geschwindigkeit und tiefer Verkehrsdichte (Stau) oder mit tiefer Geschwindigkeit und hoher Verkehrsdichte (Hyperstau) erreicht werden.

Die Verkehrsstärke wird in der VSS-Norm 640 017a als Verkehrsbelastung je Zeitintervall an einem Querschnitt der Verkehrsanlage definiert. Walters (1961) interpretiert die Verkehrsstärke als Verkehrsbelastung pro Zeitintervall, die von einer Strasse «bereitgestellt» wird. Die Angebotskurve (Kostenfunktion) beschreibt den Einfluss der aggregierten Reisedistanz in einem Zeitintervall auf die privaten Reisezeitkosten. Die privaten Reisezeitkosten stehen in einem inversen Verhältnis zur Geschwindigkeit. Somit kann die private Durchschnittskostenfunktion (und damit das inverse Angebot) mit dem Reisezeitwert, der Reisedistanz und der Geschwindigkeit hergeleitet werden.

Auch wenn mit kurzen Zeitintervallen die Genauigkeit der Modellierung gesteigert werden kann, sind statische Modelle durch einige Einschränkungen gekennzeichnet. Bei zeitlichen Unterschieden in der Nachfrage oder in der Leistungsfähigkeit der Netzelemente sowie systematischen Überlastungen im Netz können statische Modelle die Routenwahlentscheidungen und die gezählten Querschnittsbelastungen nicht realitätsgetreu abbilden (Axhausen und Vrtic 2002). Eine statische Modellierung kann z.B. nur die Kosten bestimmen, die ein zusätzliches Fahrzeug den anderen Fahrzeugen im System auferlegt. Die Kosten, die ein zusätzliches Fahrzeug für die Fahrzeuge verursacht, welche dem System beitreten wollen, können aber nicht berechnet werden.

Die **dynamische** Modellierung der Verkehrsfunktionen versucht durch die Berücksichtigung des zeitlichen Verlaufs der Nachfrage und der Belastung des Netzes die Realität besser abzubilden. Routenänderungen, um der Verkehrsüberlastung auszuweichen, und Warteschlangenkosten können im Modell integriert werden. Die dynamischen Ansätze bauen oft auf dem «Bottleneck-Modell», entwickelt von Vickrey (1963), auf. Kuwahara (2007) stellt beispielsweise ein theoretisches Modell auf, um die dynamischen Staugrenzkosten herzuleiten. Er kombiniert dabei volkswirtschaftliche Nachfrage-Angebots-Analysen mit zeitabhängigen Warteschlangeanalysen aus der Verkehrstechnik.

Eine weitere Schwierigkeit bei der Ermittlung der Stauverlustzeiten ergibt sich daraus, dass Kapazitäten keine fixen, sondern stochastische Größen sind (Keller und Wüthrich 2016). Die Stauzeiten können somit entweder **deterministisch** oder **stochastisch** ermittelt werden. Der grösste Teil der Literatur basiert auf deterministischen Ansätzen, d.h. die Geschwindigkeit sinkt kontinuierlich mit steigender Verkehrsstärke. Jedoch sind die Speed-Flow-Kurven in einer Situation, in der die Geschwindigkeit zur minimalen Geschwindigkeit konvergiert (Hyperstau), von vielen Unsicherheiten geprägt. Die minimale Geschwindigkeit hängt in so einem Fall stark von den Verhaltensmustern der Fahrer und vom Zeitintervall ab (Doll 2002). Einige Studien integrieren daher Umstände der unvollständigen Information mithilfe einer stochastischen Modellierung, d.h. die **Wahrscheinlichkeit** einer Überlastung wird grösser, wenn die Verkehrsdichte steigt. Die Verkehrsteilnehmenden minimieren somit nicht die tatsächlichen Reisezeitkosten,

sondern die **erwarteten** Reisezeitkosten in ihrem Kalkül (Goldmann und Sieg 2021, Van Woensel und Cruz 2009).

Die Inanspruchnahme der Kapazität der Strasseninfrastruktur der verschiedenen Fahrzeugkategorien kann behelfsmässig durch Personenwageneinheiten (PWE) bzw. *passenger car units* (PCU) ausgedrückt werden. Für die normbasierten Berechnungen (Kapazität resp. Dimensionierung) gehen unterschiedliche Fahrzeugkategorien bspw. über Schwerverkehrsanteile (und auch über Steigungen, die von den Fahrzeugkategorien unterschiedlich bewältigt werden) ein.

Verkehrsökonomische Grundlagen

Aus ökonomischer Sicht sind Staus «Verspätungen [...]», die einem Fahrzeug durch andere Fahrzeuge aufgezwungen werden» (Thompson 1978, vgl. INFRAS 1998). Ab einer gewissen Auslastung behindern sich die Fahrzeuge gegenseitig. Wie in Kap. 2.1 erläutert, handelt es sich dabei um Externalitäten. Verkehrsteilnehmende berücksichtigen ihre privaten Zeitkosten, nicht aber die Zeitkosten, die sie Dritten verursachen.

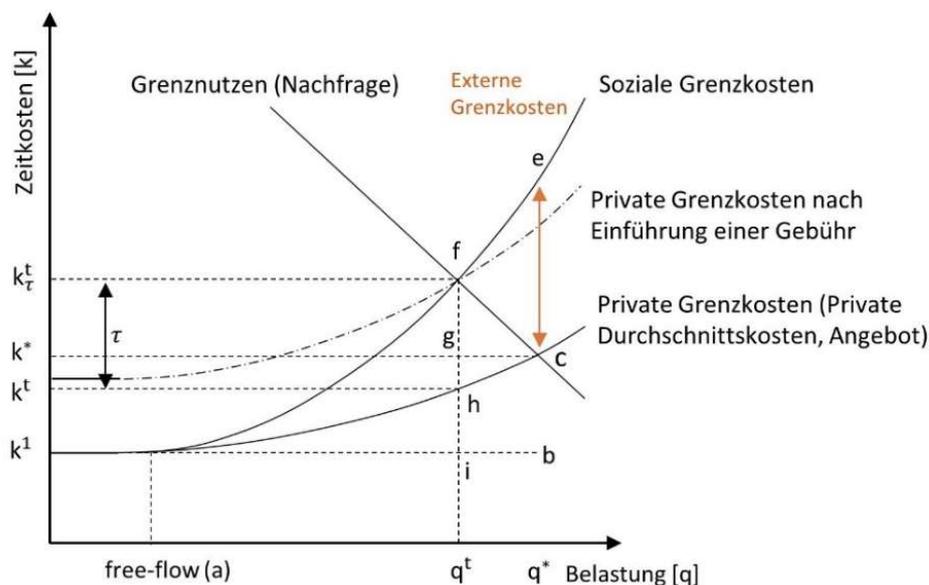
Aufgrund der Knappheitsprobleme bzw. dem Fokus auf die Effizienz der Nutzung der Strasseninfrastruktur steht daher der Grenzkosten-Ansatz hinsichtlich der optimalen Bepreisung im Vordergrund. Der Grenzkosten-Ansatz bezieht sich auf die zusätzlichen Zeitkosten aufgrund steigender Rivalität ab einer gewissen Kapazitätsauslastung der Strasse und ermöglicht die Unterscheidung zwischen internen und externen Grenzzeitkosten aus Sicht der Verkehrsteilnehmenden (Maibach et al. 2008). Hierbei ist zu beachten, dass die Kosten der Überlastung kontinuierlich mit steigender Auslastung zunehmen. Im Gegensatz zum verkehrstechnischen Ansatz wird – in Analogie zum EU-Handbuch zu den externen Kosten des Verkehrs (vgl. Kap. 2.2.1.4) – für die Bestimmung gesamter Zeitverlustkosten als Referenz eine Free-Flow-Geschwindigkeit ohne jegliche Behinderungen zugrunde gelegt. **Eine Überlastung liegt dann vor, wenn sich die Fahrzeuge gegenseitig behindern und die durchschnittliche Geschwindigkeit der Fahrzeuge auf einer Strecke unter einer zu definierenden Free-Flow-Geschwindigkeit (Referenzgeschwindigkeit) liegt.**

Abbildung 9 zeigt die Kostenfunktionen in Abhängigkeit der Belastung und das Marktgleichgewicht in der Übersicht.

Interne Grenzzeitkosten bestehen aus den durchschnittlichen privaten Kosten (wenn Konsumierende Preisnehmende sind und ihren Effekt auf die Preise ignorieren) und enthalten Kosten, die der einzelne Verkehrsteilnehmende verursacht und selbst trägt. Externe Grenzzeitkosten entsprechen dagegen den Kosten, die dem Kollektiv «Strasse» auferlegt werden und nicht vom Verursachenden selbst getragen werden (Gerike 2018). Die Summe der beiden Kosten bilden die sozialen Grenzzeitkosten. Bei geringer Belastung unterscheiden sich die privaten Zeitkosten und die sozialen Grenzzeitkosten nicht, denn ein/e zusätzliche/r Verkehrsteilnehmer/in

legt der Gemeinschaft keine zusätzlichen Kosten auf (vgl. Abbildung 9). Mit zunehmender Verkehrsnachfrage steigen die sozialen Grenzzzeitkosten stärker an als die durchschnittlichen privaten Kosten (ab Punkt a), denn ein/e zusätzliche/r Nutzer/in hindert den Verkehrsfluss und erzeugt damit Kosten für sich selbst und für die anderen Verkehrsteilnehmenden (Gerike 2018).

Abbildung 9: Marktgleichgewicht und volkswirtschaftliches Optimum auf der Strasse



Grafik INFRAS. Quelle: angelehnt an Gerike (2018).

Die **gesamten** Zeitverlustkosten können – in Analogie zum EU-Handbook (vgl. Kap. 2.2.1.4) – in Abbildung 9 mit dem Rechteck zwischen k^1 , k^* , c und b beschrieben werden. Hierbei werden die Kosten der zusätzlichen Reisezeit aufgrund der Abweichung von einer Free-Flow-Geschwindigkeit ($k^* - k^1$) aller Verkehrsteilnehmenden berücksichtigt. Der Definition der Höhe der Free-Flow-Geschwindigkeit als Referenz kommt dabei eine besondere Bedeutung zu.

Die Verkehrsteilnehmenden berücksichtigen in ihrem Nutzen-Kosten-Kalkül lediglich ihre privaten Kosten. Dies führt zu Zahlungsbereitschaften (Nachfrage), die unter den sozialen Grenzzzeitkosten liegen. Der unregulierte Wettbewerbsmarkt verhält sich ineffizient und führt zu Marktversagen (Punkt c im Vgl. zu Punkt f). Für die im Marktgleichgewicht nachgefragte Belastung (q^*) entstehen zusätzliche Kosten in Höhe von der Fläche zwischen q^t , q^* , e und f . Die Zahlungsbereitschaften entsprechen aber nur der Fläche q^t , q^* , c , f . Durch die zu tiefen Preise ergibt sich also ein Kostenüberschuss, was zu einem **Wohlfahrtsverlust** führt (Dreieck c , e und f). Die bestehenden Infrastrukturkapazitäten werden nicht volkswirtschaftlich optimal genutzt.

Um ein aus volkswirtschaftlicher Sicht optimales Gleichgewicht erreichen zu können (Punkt f), müssen die Preise in Höhe der sozialen Kosten gesetzt werden. Eine solche Situation kann

zum Beispiel mit einer Pigou-Steuer (vgl. A1) in Höhe von τ (**Staugebühr**) erzielt werden. Die Steuer erhöht die privaten Durchschnittskosten (Verschiebung der Angebotskurve nach oben) und das Gleichgewicht stellt sich im ökonomischen Optimum (Punkt f) ein. Verglichen zum Marktgleichgewicht reduziert sich die Konsumentenrente um k^* , c, f, k_{τ}^t . Einerseits sinkt die Anzahl der Nutzenden, da einige auf Fahrten verzichten ($q^* - q^t$). Andererseits haben die verbleibenden Nutzenden durch die höheren Preise Einbussen von k^* , g, f, k_{τ}^t . Sie weisen aber auch geringere Zeitkosten in der Höhe von k^t , h, g, k^* auf. Dieser Zeitgewinn wird direkt durch die Staugebühr abgeschöpft. Die höheren Kosten könnten den verbliebenen Nutzenden durch die Einnahmen aus der Staugebühr (k^t , h, f, k_{τ}^t) kompensiert werden, wenn diese tatsächlich zurückverteilt würden. Die Gesellschaft als Ganzes ist verglichen zur Ausgangssituation besser gestellt, auch wenn die individuellen Renten der Nutzenden tiefer sind. Der Gewinn entspricht dem Wohlfahrtsverlust (Dreieck e, f, c).

Die **gesamten externen Grenzeitkosten** entsprechen der Fläche unterhalb der sozialen Grenzeitkostenkurve abzüglich der Fläche unterhalb der privaten Durchschnittskostenkurve bei der jeweiligen effektiven Belastung (q^*) in Abbildung 9.

2.2.1.2. Bisherige Ermittlung der Stauzeitkosten in der Schweiz

Übersicht

Die Stauzeitkosten auf der Strasse werden seit vielen Jahren im Auftrag des Bundes quantifiziert und separat ausgewiesen. Tabelle 8 gibt einen kurzen Überblick zu den Studien seit 1998.⁵ Bis 2012 standen die gesamten Stauzeitkosten für den Verkehrsträger Strasse im Vordergrund; seit 2012 werden zusätzlich die Stauzeitkosten aus Sicht der Verkehrsart Schwerverkehr geschätzt.

Tabelle 8: Übersicht ausgewählter Schweizer Studien zur Ermittlung der Stauzeitkosten

Studie	Methodik	Kategorien	Daten	Ergebnisse
INFRAS 1998	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schätzungen der gesamten Zeitverluste auf Basis verschiedener Ansätze: ASTRA-Staustatistik, Verkehrsmodellbetrachtungen je Streckenabschnitt für Autobahnen, pauschale Hochrechnungen, Fallbeispiele Agglomerationen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ PW, LW, ÖV ▪ Autobahnen, Agglomeration ▪ Werktags, Wochenende 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ASTRA-Staustatistik ▪ Verkehrsmodelle 	1995: total 1'128 Mio. CHF (Sensitivität ohne Zeitverluste kleiner 5 min: 654 Mio. CHF)

⁵ Bereits davor gab es grobe Schätzungen zu den Staukosten des früheren Dienstes für Gesamtverkehrsfragen.

Studie	Methodik	Kategorien	Daten	Ergebnisse
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Modellbetrachtung: Differenz zwischen effektiver und Referenzgeschwindigkeit ohne oder bei schwacher Verkehrsbelastung ▪ Herleitung der resultierenden Stauzeitkosten auf Basis der Zeitwerte (<i>constant unit value approach</i>) ▪ externe Kosten aus Sicht Verkehrsteilnehmende, intern aus Sicht Verkehrssystem 			
Keller et al. 2007	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aktualisierung der Studie aus dem Jahr 1998 und Differenzierung nach Personen-, leichtem und schwerem Güterverkehr ▪ Herleitung der resultierenden Stauzeitkosten auf Basis der Zeitwerte teuerungsbereinigten Zeitwerte der Studie aus 1998 (<i>constant unit value approach</i>) ▪ externe Kosten aus Sicht Verkehrsteilnehmende, intern aus Sicht Verkehrssystem 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ PW, LI, LW ▪ Autobahnen, übriges Strassennetz 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verwendung unterschiedlicher Datenquellen und Grundlagen: Staustatistik viasuisse, Kapazitätsbewirtschaftung Strasse (KABE-WISTRA), UVEK-Verkehrmodell (VM-UVEK), ergänzende Fallstudien ▪ Herleitung der Stauzeitverluste auf Basis Staustatistik/KABWISTRA und Fallstudien 	2005: Total 1'240 Mio. (CHF) (Sensitivität ohne kleinste Zeitverluste auf dem übrigen Strassennetz: 912 Mio. CHF)
Keller und Wüthrich 2012	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Monetarisierung der gesamten Stauzeitkosten ▪ Ermittlung des Anteils der vom Schwerverkehr verursachten Stauzeitkosten nach neuer Methodik (heutige Verkehrssituation vs. theoretischer Zustand ohne Schwerverkehr) ▪ Differenz der virtuellen Situation und dem Referenzzustand entspricht externen Kosten, die durch den Schwerverkehr verursacht werden 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ LMW, SMW ▪ Autobahnen, übriges Strassennetz 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ermittlung der Fahrzeugstauzeiten auf Autobahnen basierend auf der Staustatistik sowie ASTRA Verkehrszählungen und -messungen (Staudauer), Hochrechnung für die Schweiz ▪ Ermittlung der Fahrzeugstauzeiten auf Nicht-Autobahnen basierend auf dem Verkehrsmodell Bern und Speed-Profiles, Hochrechnung für die Schweiz 	2008: Total: 883 Mio. CHF 2009: Total: 982 Mio. CHF 2010: 1'246 Mio. CHF
Keller und Wüthrich 2016	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aktualisierung der Studie aus dem Jahr 2012 und Fokus auf Nicht-Autobahnen ▪ Ermittlung der Verlustzeiten pro Streckenabschnitt und je Minute (effektiver Zeitbedarf vs. Zeitbedarf einer unbehinderten Fahrt) für 2013 ▪ Monetarisierung auf Basis der Zeitwerte der SN-Normen ▪ Ermittlung des Anteils der vom Schwerverkehr verursachten Stauzeitkosten 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ LMW, SMW ▪ Autobahnen, übriges Strassennetz 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verwendung von im Wesentlichen drei Datensätzen: die Staustatistik von Viasuisse, die automatischen Verkehrszählungen einschliesslich Geschwindigkeitsmessungen des ASTRA sowie – neu – Floating Car Data (FCD) und Floating Phone Data (FPD) des Providers INRIX ▪ Abschätzung der Entwicklung der Stauverlustzeiten 	2009: Total 950 Mio. CHF 2014: Total 1'250 Mio. CHF

Studie	Methodik	Kategorien	Daten	Ergebnisse
			für die Jahre davor (bis 2009) bzw. 2014 aus Daten der ASTRA-Zählstellen	
Keller 2019	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aktualisierung der Studie aus dem Jahr 2016 auf Basis der Entwicklung der Fahrleistungen und der Stautunden auf Autobahnen für die Jahre 2015–2017 ▪ Übernahme des Anteils der vom Schwerverkehr verursachten Stauzeitkosten gemäss Studie aus 2016 ▪ Fortschreibung der Zeitkostensätze bis 2017 ▪ Personenwageneinheiten: 1 LMW = 1 PW bzw. 1 SMW = 2 PW 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ LMW, SMW ▪ Autobahnen, übriges Strassennetz 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Keller und Wüthrich 2016 ▪ Verkehrsflussbericht ASTRA 	Totale Stauzeitkosten: 2010: 1'059 Mio. CHF 2011: 1'089 Mio. CHF 2012: 1'131 Mio. CHF 2013: 1'108 Mio. CHF 2014: 1'157 Mio. CHF 2015: 1'205 Mio. CHF 2016: 1'252 Mio. CHF 2017: 1'314 Mio. CHF

LI: Lieferwagen, LMW: Leichter Motorwagen, LW: Lastwagen, ÖV: Öffentlicher Verkehr, PW: Personenwagen, SMW: Schwere Motorwagen

Tabelle INFRAS.

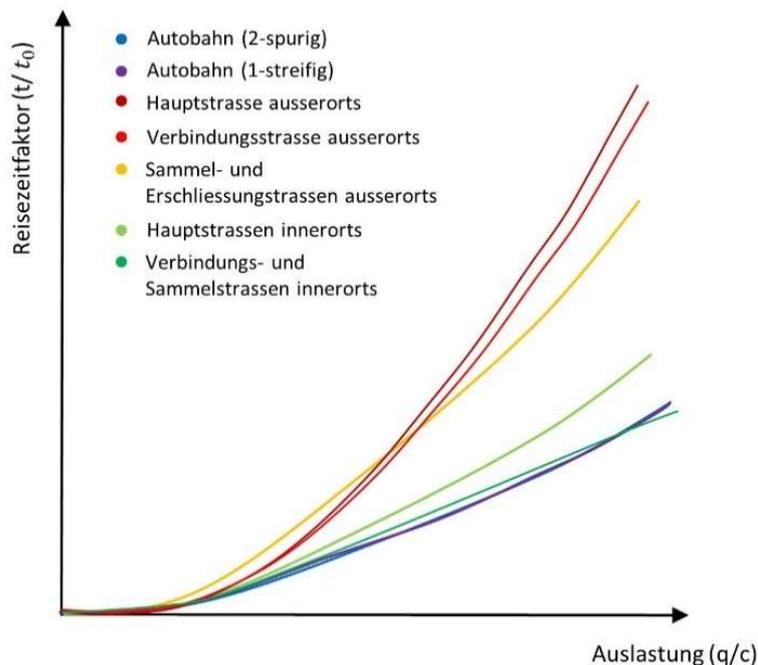
Ermittlung der gesamten Stauzeitkosten

In den ersten beiden Studien (INFRAS 1998, Keller et al. 2007) wurden die gesamten staubedingten Zeitverluste auf Basis verschiedener Ansätze ermittelt und anschliessend monetarisiert. Die Definition von Stau orientierte sich dabei an den VSS-Normen. Im Fokus lagen «markante Zeitverzögerungen pro Fahrt» (INFRAS 1998, S. 36). Es wurden sämtliche Stauursachen berücksichtigt. Je nach Sichtweise wurden sie als intern (Sicht der Verkehrsträger) bzw. extern (Sicht der Verkehrsteilnehmenden) betrachtet. Für den Modellfall Baregg schätzte INFRAS (1998) zudem die durchschnittlichen Stau- und Grenzkosten pro Fahrt und daraus die notwendige Staugebühr. Der ökonomische Ansatz bzw. die Ermittlung des Wohlfahrtsverlusts wurde jedoch nicht weiter in Betracht gezogen (Keller et al. 2007, S. 26).

Für eine vereinfachte Aufschlüsselung der gesamten Staukosten gemäss Keller et al. 2007 schlug Maibach et al. (2008) vor, mit einem pragmatischen top-down Ansatz basierend auf Capacity-Restraint-Funktionen interne und externe Kosten auf Basis der Verläufe der Durchschnitts- und Grenzkostenfunktionen zu differenzieren (vgl. hierzu auch Kap. 3.2.4). Im Verkehrsmodell UVEK werden mit den Capacity-Restraint-Funktionen durchschnittliche Verkehrssituationen für unterschiedliche Strassentypen abgebildet (vgl. Anhang A3). Damit wird der Zusammenhang zwischen Fahrzeiten bzw. Geschwindigkeiten und Auslastung dargestellt. Mithilfe der Capacity-Restraint-Funktionen können die privaten Durchschnittskosten hergeleitet werden (Maibach et al. 2008). Der Ansatz berechnet zuerst die Durchschnittskosten pro Minute Reisezeitverlängerung anhand des Reisezeitwertes und der durchschnittlichen Verkehrssituation

für die verschiedenen Strassentypen. Danach kann der Verlauf der Grenzkostenkurve für die unterschiedlichen Strassentypen mit den Capacity-Restraint-Funktionen hergeleitet werden. Abbildung 10 zeigt beispielhaft den Verlauf der seinerzeit genutzten CR-Funktionen für verschiedene Strassentypen. Eine ökonomisch korrekte Herleitung fordert jedoch einen bottom-up Ansatz, dafür ist der Verlauf der Nachfragefunktionen pro Strassentyp und die strassenspezifische Berechnung der Durchschnitts- und Grenzkosten notwendig (Maibach et al. 2008). Vorliegende Studie basiert auf einem Bottom-up-Ansatz, daher wird der externe Anteil im Folgenden nicht über die Steigung der Funktionen bestimmt.

Abbildung 10: Capacity-Restraint-Funktionen (illustratives Beispiel)



q = Belastung der Strecke; c = Kapazität der Strecke; t_0 = Fahrzeit auf unbelasteter Strecke; t = Fahrzeit bei aktueller Auslastung

Quelle: Eigene Grafik basierend auf Maibach et al. (2008).

Ermittlung der Stauzeitkosten aus Sicht der Verkehrsart Schwerverkehr

Aufgrund des Bundesgerichtsentscheids vom 21. Oktober 2009 zur Leistungsabhängigen Scherverkehrsabgabe wurde festgelegt, wie die Berechnung der externen Kosten des Schwerverkehrs (Sichtweise Verkehrsart) vorzunehmen ist. Das Bundesgericht verfügte, dass die Stauzeitkosten neu zu berechnen seien.

Es sind nur jene Stauzeitkosten zu berücksichtigen, welche der Schwerverkehr den übrigen Verkehrsteilnehmenden verursacht. Strassenstaus seien schematisch und approximativ zu quantifizieren und dem Schwerverkehr einerseits und Nichtschwerverkehr andererseits nach

Massgabe ihrer Verursacheranteile zuzuordnen. Es sei von der Irrelevanz der vom Nichtschwerverkehr dem Schwerverkehr verursachten Stauzeitkosten auszugehen. Es ist eine Situation unter Einbezug des Schwerverkehrs mit einer Situation der Strassenbenutzung ohne Schwerverkehr auszugehen, d.h. es sind dem Schwerverkehr sämtliche Stauzeitkosten zuzurechnen, welche den übrigen Verkehrsteilnehmenden entstehen. Es sind zudem alle Stauursachen zu berücksichtigen (vgl. Keller und Wüthrich 2012).

Mit der im Jahr 2012 erstellten Studie wurde der Bundesgerichtsverfügung Rechnung getragen und die Stauzeitkosten sowohl insgesamt (erlittene Stauzeitkosten auf der Strasse) als auch nach neuer Methodik aus Sicht der Verkehrsart (vom Schwerverkehr verursachte Stauzeitkosten) ermittelt. Mit der Verwendung des INRIX-Datensatzes hatte sich die Datenlage in der Studie aus dem Jahr 2016 (Keller und Wüthrich 2016) verbessert, was zu Anpassungen im Vorgehen zur Berechnung der Stauzeitverluste führte. Gleichzeitig war die Datenaufbereitung sehr aufwändig. Der Datensatz von INRIX enthält Floating Car Data (FCD) und Floating Phone Data (FPD), also d.h. Daten, die aus Fahrzeugen generiert werden, welche aktuell am Verkehrsgeschehen teilnehmen. Diese Daten liefern die mittlere Geschwindigkeit für alle Strecken des schweizerischen TMC-Strassennetzes (Traffic Message Chanel) für alle Minuten im Jahr (Keller und Wüthrich 2016). Der durchschnittliche tägliche Verkehr pro Strecke (differenziert nach Personen-, Liefer- und Lastwagen) wurde als Verkehrsnachfrage interpretiert und konnte dem nationalen Personenverkehrsmodell (NPVM) entnommen werden. Die Zahlen des täglichen Verkehrs konnten anschliessend mithilfe von typischen Jahres-, Wochen- und Tagesganglinien den Verkehrsflussdaten zugeordnet werden (Keller und Wüthrich 2016). Mit dem Vergleichen von effektiv benötigter Fahrzeit und der Fahrzeit einer unbehinderten Fahrt (Free-Flow), konnten die Verlustzeiten pro Minute und Streckenabschnitt ermittelt werden. Als Staukriterium wurde angenommen, dass die Geschwindigkeit unter 65% der Referenzgeschwindigkeit (Free-Flow) liegt.

2.2.1.3. Literatur zur Ermittlung von Zeitverlust- bzw. Stauzeitkosten aus Sicht der Verkehrsteilnehmenden

Empirische Anwendungen

Akbar und Durantón (2017) wenden eine statisch-deterministische Modellierung an, um den Wohlfahrtsverlust und die Grenzkosten verursacht durch Stau in Bogotá zu berechnen. Dabei nutzen sie, wie oben beschrieben, ein Fundamentaldiagramm zur Schätzung der Kostenkurve (Angebot). Die Reisezeitkosten werden auf die Verkehrsdichte einer Route während eines Zeitintervalls regressiert. Da sie dafür ein logarithmisches Modell anwenden, kann die Steigung der Regression als Angebotselastizität interpretiert werden. Als Datengrundlage verwenden sie einerseits des Bogotá Travel Survey und andererseits Daten aus Google Maps. Im Survey sind die

tatsächlichen Reiserouten an einem Tag von mehreren Tausend Haushalten erfasst, während die Daten aus Google Maps keine tatsächlichen Reisen, sondern kontrafaktische Reiserouten enthalten. Mit Google Maps werden die Reisezeiten an verschiedenen Tagen und zu verschiedenen Zeiten für die jeweiligen Routen vom Survey berechnet. Die Nachfrage wird geschätzt, indem mit den durch die Google Maps Daten geschätzten Reisezeiten und den tatsächlich getätigten Routen beobachtet wird, ob ein Reisender, abhängig von den potenziell anfallenden Reisekosten in einem Zeitintervall, eine Route antritt oder nicht. Da wieder ein logarithmisches Modell angewendet wird, kann der Koeffizient aus der Regression als Nachfrageelastizität interpretiert werden. Mithilfe der Elastizitäten und den aus dem Fundamentaldiagramm hergeleiteten Funktionen, können die privaten Durchschnittskosten und die sozialen Grenzkosten berechnet werden. Mit der Differenz der beiden Kosten lassen sich die externen Grenzkosten und somit die optimale Pigou-Steuer berechnen. Zum Schluss berechnen Akbar und Durantou (2017) die Fläche des Wohlfahrtsverlusts durch Integrieren der externen Grenzkosten, wobei die optimale Verkehrsstärke die untere Grenze und die tatsächliche Verkehrsstärke die obere Grenze bildet.

Das Bureau of Transport and Regional Economics (BTRE 2007) berechnet den Wohlfahrtsverlust («vermeidbare Kosten») der Verkehrsüberlastung für einige australische Grossstädte unter Verwendung eines aggregierten Modellierungsansatzes. Für alle im Modell berücksichtigten Strassentypen werden die privaten Durchschnittskosten mittels Speed-Flow-Kurven berechnet. Die sozialen Grenzkosten werden mit der ersten Ableitung der Durchschnittskosten bestimmt. Mit der Integration der beiden Kostenfunktionen berechnet das BTRE den Wohlfahrtsverlust (die obere Grenze ist dabei durch die tatsächliche Belastung und die untere Grenze durch die optimale Belastung gegeben). Für die Bestimmung der Nachfrage, verwendet das BTRE eine konstante Nachfrageelastizität von -1.2. Nach Harrison (2012) überschätzt der Bericht des BTRE den Wohlfahrtsverlust und bietet keine konkrete Orientierungshilfe für Entscheidungsträger, weil die Studie kein Mass für den Nettogewinn einer Staugebühr liefert. Harrison argumentiert, dass alle möglichen Lösungen (z.B. Staugebühr oder Strassenausbau) für die Überlastung der Transportinfrastrukturen mit effizienzbasierten Kosten-Nutzen-Analysen evaluiert werden müssten, denn der Einsatz eines falschen Instruments könnte ansonsten zu einem Wohlfahrtsverlust führen.

Doll (2002) berechnet im Rahmen einer Studie für UNITE (Unification of accounts and marginal costs for Transport Efficiency) die sozialen Grenzkosten des interstädtischen Strassenverkehrs für vier Fallstudien. Es wird wiederum ein statisches Verfahren angewendet und die Kostenfunktionen werden auch anhand von Speed-Flow Kurven geschätzt. Jedoch fügt die Studie mit einem vereinfachten Verfahren eine dynamische Staukomponente in die Kalkulation ein.

Dafür wird zwischen vorhandener Nachfrage und tatsächlich befriedigter Nachfrage unterschieden. Die Nachfrage, welche im Moment nicht befriedigt werden kann, landet in einer Warteschlange. Um die sozialen Grenzkosten möglichst genau bestimmen zu können, müssen die Stauzeitkosten für diese Fahrzeuge auch berücksichtigt werden. Doll (2000) beschreibt dafür eine vereinfachte Methodik, um den Warteschlangeffekt Ansatzweise zu integrieren.

Goldmann und Sieg (2021) berechnen die erwarteten externen Staukosten für deutsche Autobahnabschnitte mit einem statisch-stochastischen Modell. Dabei betrachten sie die Kapazität als eine stochastische Variable, somit können zufällige Strassenüberlastungen, ein Hyperstau, berücksichtigt werden. Ein Hyperstau beschreibt die Situation, in der die Strassenkapazität bei einer Überlastung sinkt. Die Wahrscheinlichkeit eines Hyperstaus wird grösser mit steigendem Verkehrsfluss. Die Wahrscheinlichkeiten werden in die Speed-Flow Daten integriert, um die privaten Durchschnittskosten zu berechnen. Die sozialen Grenzkosten können mit der Summe aus den privaten Durchschnittskosten und dem Produkt aus der Verkehrsstärke und der Ableitung der Durchschnittskosten berechnet werden. Dabei bildet das Produkt aus der Verkehrsstärke und der Ableitung der Durchschnittskosten die externen Grenzkosten (vgl. 2.2.1.1). Die Studie findet, dass Berechnungen ohne Berücksichtigung der Hyperstau-Externalitäten, bis zu einer 50% zu tiefen Stauegebühr führen können. Es kann jedoch keine Aussage über den Wohlfahrtverlust gemacht werden, da kein Nachfragemodell in den Berechnungen integriert wurde.

Russo et al. (2019) berechnen für ein breites Strassensegment in Rom die Wohlfahrtsverluste ausgelöst durch eine Überlastung der Transportinfrastrukturen. Im Modell werden einerseits Zeitverluste im MIV, andererseits aber auch Zeitverluste im öffentlichen Busverkehr berücksichtigt. Ausserdem wird die Situation eines Hyperstaus miteinbezogen. Zur Berechnung der Angebotskurve wird die Auswirkung der Verkehrsdichte auf die Reisezeit geschätzt und dann die Beziehung zwischen Reisezeit und Verkehrsstärke anhand von Fundamentaldiagrammen hergeleitet.

Um den zeitlich und örtlichen Unterschieden der externen Staukosten im MIV gerecht zu werden, nutzen Molloy et al. (2021) ein agentenbasiertes Verkehrsmodell (MATSim)⁶. Durch die agentenbasierte Modellsimulation kann die Heterogenität der Bevölkerung und der Reiseverhalten berücksichtigt und feinere Berechnungen der externen Effekte erzielt werden. Die angewandte Methodik – entwickelt von Kaddoura und Kickhöfer (2014) – ordnet die externen Kosten dem verursachenden Akteur zu, anstatt nur die angefallenen Staukosten für jeden Akteur zu berechnen. Dafür berechnet der Ansatz den Beitrag eines jeden Akteurs zu den Verspätungen auf den jeweiligen Strassenabschnitten.

⁶ MATSim ist ein Open-Source-Softwareentwicklungsprojekt für die Implementierung von agentenbasierten Verkehrssimulationen.

Ein solcher Vorgang angewendet auf die reale Welt würde bedeuten, dass sensible Daten über einen grossen Teil der Bevölkerung erhoben werden müssten. Für eine optimale Strassen-nutzungsgebühr müssten beispielsweise die Reiseroute, die Reisezeit, der Fahrstil, die Fahr-zeugtechnologie und der individuelle Zeitwert bekannt sein (Molloy et al. 2021). Mit MATSims kann eine Bevölkerung mit einem Set an Akteuren, die ihren täglichen Reiseplan über wiederholte Iterationen optimieren, modelliert werden. Die Daten zur anfänglichen Verkehrsnachfrage stammen aus dem Mikrozensus Verkehr und Mobilität (MZVM). Die Methodik von Kad-doura und Kickhöfer (2014) berechnet die durch jeden Akteur verursachten Überlastungen auf jedem Strassenabschnitt. Die bei einem Akteur entstandenen Verspätungen werden auf die Ak-teure weiter vorne in der Schlange verteilt, bis die Verspätungen vollständig internalisiert sind. Mit diesem Algorithmus können die durchschnittlichen verursachten Verspätungen auf einem Strassenabschnitt zu einem bestimmten Zeitpunkt berechnet werden:

$$x_{l,t} = \frac{\sum_a x_{l,t,a}}{A_{l,t}}$$

wobei:

$A_{l,t}$ = Anzahl Akteure im Strassenabschnitt l

$x_{l,t}$ = Durchschnittliche Verspätung verursacht im Strassenabschnitt l

$x_{l,t,a}$ = Verspätung verursacht durch Akteur a zum Zeitpunkt t im Strassenabschnitt l

Damit kann die durchschnittliche marginale Verspätung verursacht durch eine Fahrt berechnet werden. Idealerweise würde man alle erlebten Zeitverluste mit individuellen Zeitwerten mone-tarisieren bevor man sie aggregiert. Da diese Information nicht vorhanden ist, benutzen die Au-toren die Schweizer Norm. Analog zu Keller und Wüthrich (2016) werden in dieser Studie Ver-spätungen erfasst, wenn die Reisegeschwindigkeit weniger als 65% der Free-Flow Geschwindig-keit beträgt. Molloy et al. (2021) vergleichen ihre totalen Stauzeitkosten mit den Werten von Keller und Wüthrich (2019). Sie erhalten Kosten in der Höhe von 1'422 Mio. CHF (berechnet mit pro Kilometerkosten innerhalb des 95% Perzentils), während Keller und Wüthrich (2019) Kos-ten in der Höhe von 1'314 Mio. CHF ermittelten.

Ungehinderte und optimale Geschwindigkeit

Zur Herleitung der gesamten Zeitverlustkosten ist eine Referenzgeschwindigkeit zu definieren. Es ist zu klären, welche Referenzgeschwindigkeit zur Berechnung der Reisezeitverluste verwen-det werden soll. In der ökonomischen Literatur wird meistens die unbehinderte Fahrt (Free-Flow) als Referenzgeschwindigkeit angenommen. Wenn die unbehinderte Fahrtgeschwindig-keit als Referenzgeschwindigkeit definiert wird, ergeben sich die Zeitverlustkosten aus der Dif-ferenz zwischen den Kosten, die bei der tatsächlichen Fahrtgeschwindigkeit anfallen und den

Kosten, die bei einer unbehinderten Fahrt anfallen (Santos 2000). Die Free-Flow-Geschwindigkeit wird im Folgenden als Referenzgeschwindigkeit für die Schätzung der gesamten Zeitverluste bzw. -kostenzugrunde gelegt. Zeitverlustkosten treten auf, wenn die tatsächliche Geschwindigkeit unter der Referenzgeschwindigkeit liegt. Dies weicht von den bisherigen Schätzungen zu den Stauzeitkosten ab, da diese als Staukriterium eine Referenzgeschwindigkeit in Höhe von 65% der Free-Flow-Geschwindigkeit definieren. Die Ergebnisse sind daher nicht vergleichbar.

Aus ökonomischer Sicht ist es in den meisten Fällen jedoch volkswirtschaftlich ineffizient, wenn alle Fahrzeuge auf allen Strassen und zu jeder Zeit die unbehinderte Geschwindigkeit erreichen können. Ergänzend zur Referenzgeschwindigkeit ist zur Herleitung des Wohlfahrtsverlusts und der optimalen Staugebühr die optimale Auslastung und damit Geschwindigkeit notwendig (vgl. Abbildung 9). Die optimale Geschwindigkeit bzw. der Level of Service (LoS) sollte so gewählt werden, dass die Qualitätsstufen C oder D (Tabelle 7 in Kap. 2.2.1.3) erreicht werden können (Litman 2011). Die volkswirtschaftlich optimale Auslastung kann aber auch bestimmt und daraus die optimale Geschwindigkeit abgeleitet werden. Im Folgenden wird für die Ermittlung des Wohlfahrtsverlusts die optimale Auslastung für die jeweilige Strecke bestimmt. Bei der optimalen Auslastung liegt die volkswirtschaftlich effiziente Geschwindigkeit unter der Free-Flow-Geschwindigkeit.

Value of Time und Value of Reliability

In der Literatur werden die Reisezeitkosten in der Regel anhand eines Zeitkostensatzes hergeleitet. Dieser monetäre Zeitwert kann einerseits durch eine Stated Preference Befragung durch die Zahlungsbereitschaft für die Reduktion der Reisezeit ermittelt werden oder als Opportunitätskosten anhand der lokalen Lohnstrukturen (Opportunitätskosten) errechnet werden. Für die Schweiz werden die Zeitkostensätze gemäss den SP-Befragungen (ARE 2016) und der VSS-Norm 41 822a (Zeitkosten im Personenverkehr) bzw. SN-Norm 641 827 (Betriebskosten von Strassenfahrzeugen) verwendet.

Tabelle 9 zeigt die im Rahmen der letzten beiden Studien zu den Stauzeitkosten verwendeten Zeitkostensätze bezogen auf die Fahrzeugstunden. Diese werden für die Berechnungen für die Jahre ab 2018 und 2019 aktualisiert und im Folgenden zugrunde gelegt (vgl. Kap. 3).

Tabelle 9: Zeitkostensätze (CHF pro Fahrzeugstunde)

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
PW	39.7	40.2	40.6	41.0	41.4	41.7	41.9	42.2	42.4
LI	37.4	37.8	38.1	38.4	38.7	39.0	39.1	39.3	39.5
LMW	39.6	40.1	40.5	40.9	41.2	41.6	41.7	42.0	42.2
Car/Reisebus	313.5	316.0	318.8	321.3	323.4	325.5	326.5	328.5	330.1
SNF	64.9	65.4	65.9	66.2	66.5	66.8	66.7	67.0	67.3
SMW	77.6	78.1	78.9	79.6	80.0	80.8	81.1	81.7	82.5

LI: Lieferwagen, LMW: Leichte Motorwagen, PW: Personenwagen, SMW: Schwere Motorwagen, SNF: Schwere Nutzfahrzeuge.

Tabelle INFRAS. Quelle: Keller und Wüthrich 2017, Keller 2019.

Einige Studien berücksichtigen mit einem Verspätungsbewertungsfaktor, dass eine Verspätung stärker bewertet wird als der allgemeine Reisezeitwert (Eliasson 2004, Bates 2001, Noland und Polak 2002). Die Studie von Doll (2002) verwendet einen Multiplikator von 1.5, um den Zeitwert in einer überlasteten Situation anzupassen. Ausserdem können die Faktoren nach Tageszeit und nach Reisezweck unterschieden werden (geschäftlich, Freizeit etc.). Des Weiteren gibt es Studien, die zusätzliche Kosten aufgrund von unerwarteter Reisezeitvariabilität berücksichtigen. Stauzeitkosten im Strassenverkehr können unterschieden werden zwischen Kosten, die wegen eines unerwarteten Vorfalls (z.B. Unfall) anfallen und alltäglich stabile Stauzeitkosten, die vorhersehbar sind (Noland und Polak 2002). Die unerwartete Reisezeitvariabilität verursacht Kosten für die Reisenden aufgrund der erhöhten Unsicherheit bezüglich der Ankunftszeit. Mit einem Faktor werden diese zusätzlich anfallenden Kosten aufgrund mangelnder Verlässlichkeit geschätzt. Tabelle 10 fasst die in der Literatur verwendeten Faktoren zusammen. Im Folgenden werden keine Verspätungsbewertungsfaktoren berücksichtigt (vgl. Kap. 3). Insbesondere auch da die Zeitkostensätze in der Schweiz im Verhältnis zum Ausland und beispielsweise zum EU Handbook (Van Essen et al. 2019) verhältnismässig hoch sind.

Tabelle 10: Bewertung von unerwarteten Reisezeitveränderungen (Zuverlässigkeitsverhältnis)

Quelle	Land	Verkehrsträger	Verkehrsmittel	Differenzierung	Bewertungsfaktor ⁷
Eliasson 2004	SE	Strasse	MIV	Morgenverkehr	5.3
				Nachmittagsverkehr	3.9
				Geschäftliche Fahrten	3.5
Bates et al. 2001		Strasse	MIV		1.3
				Strasse/Schiene	ÖV
Ehrecke et al. 2015	DE	Strasse/Schiene	ÖV	Ausbildung	0.9
				Arbeit	1.0
				Einkauf	0.7
				Freizeit	0.9
				Geschäftlich	1.7
				insgesamt	0.9
Weis et al. 2017	CH	Strasse	MIV	Geschäftlich	1.6
				Ausbildung	1.4
				Einkauf	2.1
				Nutzfahrt	1.8
				Freizeit	2.5
				Durchschnitt	2.0
VSS Norm 41 825 ⁸	CH	Strasse	MIV		1.625
				Strasse	SV ⁹
Weis et al. 2017	CH	Strasse/Schiene	ÖV	Geschäftlich	2.3
				Ausbildung	2.1
				Einkauf	2.6
				Nutzfahrt	2
				Freizeit	3.1
				Durchschnitt	2.5
Doll 2002		Strasse	MIV, SV		1.5
Batley und Ibáñez 2012		Schiene	Zug	Kurzstrecke, geschäftlich	1.25
				Kurzstrecke, Pendler	1.31
				Kurzstrecke, andere	2.69
				Langstrecke, geschäftlich	1.49
				Langstrecke, Pendler	2.19
				Langstrecke, andere	2.18

CH: Schweiz, DE: Deutschland, SE: Schweden.

Tabelle INFRAS.

⁷ Der Bewertungsfaktor entspricht dem Verhältnis von der Zahlungsbereitschaft für eine Stunde weniger Verspätung und der Zahlungsbereitschaft für eine Stunde weniger Fahrzeit, d.h. der Faktor gibt an, um wie viel Verspätungen stärker bewertet werden als die erwartete Reisezeit.

⁸ Vorliegend wurden die Faktoren bei Verfrühung von 0.25 nicht aufgeführt.

⁹ Im Schwerverkehr wird ein Fahrzeug einer Person gleichgesetzt, d.h. der Faktor bezieht sich auf den Zeitkostensatz im Personenverkehr gemäss VSS Norm 41 822a.

2.2.1.4. Der Ansatz im EU Handbook und die Ergebnisse für die Schweiz

Das EU Handbook on the external costs of transport (van Essen et al. 2019) berechnet die Stauzeitkosten für die EU-Mitgliedsstaaten, Norwegen und die Schweiz. Dabei wird zwischen urbanen und inter-urbanen Strassen und drei Verkehrssituationen (über Kapazität, überlastet, nahe Kapazität) unterschieden. Die Berechnungen basieren auf zwei verschiedenen Ansätzen: Dem Wohlfahrtsverlust- und dem Verspätungskosten-Ansatz. Die Berechnungen folgen einem Top-down-Ansatz.

Der Verspätungskosten-Ansatz definiert die Stauzeitkosten als den verlorenen Reisezeitwert. Als Reisezeitreferenz wird die Reisezeit zu unbehinderter Geschwindigkeit verwendet. Die Verspätungskosten beinhalten sowohl interne als auch externe Kosten. Mit dem Wohlfahrtsverlust-Ansatz kann die ökonomisch optimale Lösung hergeleitet und die externen Kosten berechnet werden. Zur Berechnung des Wohlfahrtsverlust werden zunächst die privaten sowie sozialen Grenzkosten (Euro je Fahrzeugkilometer) für die verschiedenen Verkehrssituationen und Strassenkategorien sowie Verkehrsmittel geschätzt.

Alle Kosten werden im EU Handbook einerseits als «verursachte Kosten» (*generated costs*) und andererseits als «getragene Kosten» (*borne costs*) ausgewiesen. Die «getragenen Kosten» sind Kosten, die die Verkehrsteilnehmenden erleiden. Die «verursachten Kosten» sind die Kosten, die die Verkehrsteilnehmenden den anderen Verkehrsteilnehmenden auferlegen. Gemäss EU Handbook sind die «verursachten Kosten» als externe Kosten zu verstehen (Van Essen et al. 2019, S. 112).

Die privaten Durchschnittskosten werden mithilfe von strassenspezifischen Speed-Flow-Funktionen und nationalen Zeitwerten hergeleitet. Die Parameter der Durchschnittskostenkurve sind über die Länder konstant. Die Zeitwerte im Personenverkehr sind nach Streckenlängen (Kurzstrecke, Langstrecke) und nach Reisezwecken (geschäftliche Reisen, persönliche Reisen) differenziert (vgl. Tabelle 11). Um zu berücksichtigen, dass nicht nur der/die Fahrer/in, sondern alle Passagiere Stauzeitkosten erleiden, wird ein durchschnittlicher Besetzungsgrad berücksichtigt. Für den Güterverkehr wird ein definierter Faktor pro Tonne und ein durchschnittliches Frachtgewicht verwendet. Um den Zeitwert pro Fahrzeug im Güterverkehr zu berechnen, wurde der durchschnittliche Auslastungsfaktor pro Land für schwere Nutzfahrzeuge mit dem Wert pro Tonne multipliziert und anschliessend zum Zeitwert des Fahrers bzw. der Fahrerin addiert.

Tabelle 11: Zeitwert im Personen- und Güterverkehr Schweiz (Euro/Stunde pro Person oder Euro/Stunde pro Tonne, Preisstand 2016)

Personenverkehr				Güterverkehr	
Kurzstrecke		Langstrecke		Wert pro Tonne	Fahrpersonalkosten pro Std.
Geschäftliche Reisen	Persönliche Reisen	Geschäftliche Reisen	Persönliche Reisen		
21.4	9.9	26.2	9.9	1.3	28.5

Kurzstrecke: Weniger als 32 km; Langstrecke: Mehr als 32 km

Tabelle INFRAS. Quelle : van Essen et al. (2019).

Die soziale Grenzkostenkurve wird mit der ersten Ableitung der privaten Durchschnittskostenkurve hergeleitet. Die Nachfragekurve wird anhand von Elastizitäten (Tabelle 12) geschätzt, dabei wird zwischen Spitzen- und Nebenzeiten differenziert. Die Elastizitäten werden als Steigung der Nachfragekurve interpretiert.

Tabelle 12: Nachfrageelastizitäten basierend auf Litman (2011) und Oum et al. (1990)

Verkehrsmittel	Städtisch	Interstädtisch
PW: Pendler- /Geschäftsfahrten	-0.49	-0.56
PW: Persönliche Fahrten	-0.58	-0.67
Lastwagen	n.a.	-0.30
Reisebus	n.a.	-0.30

Tabelle INFRAS. Van Essen et al. (2019) basierend auf Litman (2011) und Oum et al. (1990).

Um die optimale Nachfrage zu bestimmen, wird ein iterativer Prozess angewendet, bis die soziale Grenzkostenkurve und die Nachfragekurve das gleiche Verhältnis zwischen Strassenbelastung und -kapazität liefern. Der Prozess zur Herleitung und die Höhe der optimalen Nachfrage bzw. Belastung sind im EU Handbook nicht näher beschrieben und werden auch auf Nachfrage bei den Projektbearbeitern nicht zur Verfügung gestellt. Es ist daher nicht nachvollziehbar, wie die optimale Auslastung und damit Geschwindigkeit bestimmt wurde. Vergleiche der Ergebnisse sind aufgrund dessen nicht möglich.

Mit den sozialen Kosten, den privaten Durchschnittskosten, dem optimalen Verhältnis und dem tatsächlichen Verhältnis zwischen Strassenbelastung und -kapazität kann der gesamte erlittene bzw. getragene Wohlfahrtsverlust und die erlittenen Verspätungskosten berechnet werden. Die «verursachten Kosten» für die anderen Verkehrsmittel wurden mithilfe des Personenwagenäquivalents und den Fahrleistungen der jeweiligen Fahrzeugkategorie auf allen Strassen berechnet (vereinfachter Ansatz). Die verwendeten Personenwagenäquivalente sind in Tabelle 13 zusammengefasst.

Tabelle 13: Personenwagenäquivalent verwendet im EU Handbook (2019)

PW	LI	LW und Reisebus
1	1.5	2

LI: Lieferwagen, LW: Lastwagen, PW: Personenwagen.

Tabelle INFRAS. Van Essen et al. (2019).

Tabelle 14: Gesamte Wohlfahrtsverluste und Verspätungskosten verursacht nach Verkehrsmitteln für die Schweiz, vereinfachter Ansatz (Milliarden Euro/Jahr, Preisstand 2016)

	Urban					Inter-Urban					Total
	PW	LI	LW	Reise- bus	Total	PW	LI	LW	Reise- bus	Total	Total
Wohlfahrtsverluste	0.321	0.043	0.016	0.004	0.384	0.187	0.022	0.008	0.002	0.219	0.603
Verspätungskosten	1.882	0.251	0.091	0.021	2.245	1.069	0.123	0.044	0.012	1.248	3.493

LI: Lieferwagen, LW: Lastwagen, PW: Personenwagen.

Tabelle INFRAS. Quelle : Van Essen et al. (2019).

Mit der Verkehrsvolumen-Kapazität-Relation kann der durchschnittliche Wohlfahrtsverlust pro Fahrzeugkilometer hergeleitet werden. Die Resultate für die Schweiz werden in Tabelle 15 und Tabelle 16 dargestellt.

Tabelle 15: Übersicht durchschnittlicher Wohlfahrtsverlust und Verspätungskosten verursacht pro Fahrzeugkilometer für die Schweiz, vereinfachter Ansatz (Cent/Fzkm, Preisstand 2016)

Kosten	Urban				Inter-Urban			
	PW	LI	LW	Reisebus	PW	LI	LW	Reisebus
Wohlfahrtsverluste	2.19	3.29	4.38	4.38	0.17	0.26	0.39	0.35
Verspätungskosten	12.58	18.86	25.15	25.15	0.94	1.41	2.13	1.91

LI: Lieferwagen, LW: Lastwagen, PW: Personenwagen.

Tabelle INFRAS. Quelle : Van Essen et al. (2019).

Die sozialen Grenzkosten pro Fahrzeug- bzw. Personenkilometer werden in der Studie als externe Grenzkosten interpretiert (van Essen et al. 2019, S. 313). Tabelle 16: Soziale Grenzkosten verursacht pro Fahrzeugkilometer für die Schweiz, vereinfachter Ansatz (Cent/Fzkm, Preisstand 2016)

Verkehrsmittel	Urban					
	Fernstrasse			Andere		
	Über Kapazität	Stau	Nahe Kapazität	Über Kapazität	Stau	Nahe Kapazität
PW	43.0	33.2	23.3	88.8	77.9	63.2
LW	85.9	66.3	46.7	177.6	155.9	126.4
LI	64.5	49.7	35.0	133.2	116.9	94.8
	Inter-Urban					
	Autobahn			Andere		
	Über Kapazität	Stau	Nahe Kapazität	Über Kapazität	Stau	Nahe Kapazität
PW	38.6	29.8	20.9	60.9	52.0	40.9
LW	77.1	59.5	41.9	121.8	104.0	81.9
LI	57.8	44.6	31.4	91.4	78.0	61.4

Verkehrsvolumen/Kapazitäts-Relation (V/K)

über Kapazität: $V/K > 1.2$; Stau: $1 < V/K < 1.2$; nahe Kapazität: $0.8 < V/K < 1$

LI: Lieferwagen, LW: Lastwagen, PW: Personenwagen.

Tabelle INFRAS. Quelle : Van Essen et al. (2019)

2.2.2. Luftverkehr

Im Folgenden werden volkswirtschaftliche Kosten der Überlastung im Luftverkehr theoretisch behandelt. Das Fazit ist: Da die Kapazitäten an Flughäfen vorab vergeben werden, wird eine Überlastung über die Kapazitätsgrenze nicht zugelassen. Es entstehen daher keine Überlastungskosten vergleichbar zur Strasse. Eine Quantifizierung von möglichen Kosten der Überlastung im Luftverkehr war daher nicht Gegenstand des Auftrags.

Überlastung im Luftverkehr

Im Luftverkehr sind Überlastungen sowohl der Flughäfen (Slots für Starten / Landen, Rampen, Gate etc.) als auch in der Luft in Bezug auf die Flugsicherung (en-route) relevant.

Da die Kapazitäten an Flughäfen vorab vergeben werden, d.h. wie auf der Schiene zentral koordiniert werden, wird eine Überlastung über die Kapazitätsgrenze nicht zugelassen (Knieps 2007, S. 45). In diesem Sinne besteht ab einer gewissen Auslastung Rivalität im Konsum von beispielsweise Start- und Landerechten. Bei zentral koordinierten Infrastrukturen sind einerseits Knappheitskosten (*scarcity costs*) aufgrund eines Nachfrageüberhangs bei der Slot-Vergabe relevant, wenn die potenzielle Nachfrage das Kapazitätsangebot übersteigt. Aufgrund einer temporären Überlastung einzelner Infrastrukturteile können aber andererseits auch Verspätungen (Stau-/Verspätungskosten, *reactionary delay*) resultieren und damit zusätzliche Zeitkosten. Aus Sicht der Verkehrsteilnehmenden sind insbesondere die zusätzlichen Zeitkosten aufgrund der Überlastung (Verspätungskosten) relevant. In Zentral koordinierten Infrastrukturen entstehen den Verkehrsteilnehmenden aufgrund der Knappheit bei der Zuweisung von Slots (*scarcity*) hingegen keine zusätzlichen Zeitkosten.

In Bezug auf Infrastrukturen mit ex-ante Kapazitätzzuteilung differenzieren van Essen et al. (2019, S. 105) daher zwei Kostenkategorien und definieren diese wie folgt:

- **Knappheitskosten (*scarcity costs*)** entstehen, wenn das Vorhandensein eines Liniendienstes den Betrieb eines anderen Liniendienstes verhindert oder ihn bei der Zuweisung von Kapazitäten zwingt, einen schlechteren Slot einzunehmen. Daher entstehen Knappheitskosten immer dann, wenn ein Slot reserviert wird. Im Wesentlichen bezeichnen Knappheitskosten die Opportunitätskosten, die den Dienstleistern für die Nichtverfügbarkeit der gewünschten Abfahrts- oder Ankunftszeiten entstehen.
- **Stau- bzw. Verspätungskosten** entstehen, wenn ein fahrplanmässiger Dienst einen anderen verspätet. Obwohl die Flugpläne so gestaltet sind (bzw. die Slots vorab so vergeben werden), dass diese Kosten minimiert werden, kann es sein, dass bei hoher Auslastung das Vorhandensein eines zusätzlichen Liniendienstes zu einer zusätzlichen Verspätung bei anderen führt (Reaktionsverspätung bzw. *reactionary delay*). Damit kann ein (vermutlich geringerer) Teil

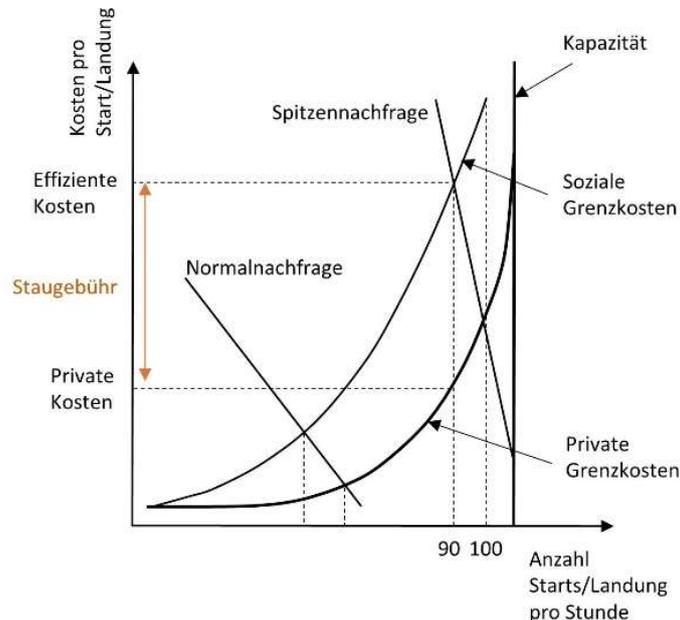
der Verspätungskosten als Überlastungskosten interpretiert werden. Verspätungen haben aber in der Regel andere Ursachen (z.B. defekte Flugzeuge).

Das EU Handbook definiert den Anteil der Stau- und Knappheitskosten als extern, der anderen Verkehrsteilnehmenden und der Gesellschaft zusätzlich verursacht wird (van Essen et al. 2019, S. 33). Weist jedoch keine Verspätungs- oder Knappheitskosten und daher auch keinen externen Anteil daran aus. Die Definition und konkrete Vorgehensweise kann daher nicht nachvollzogen werden.

Knappheitskosten (*scarcity costs*) und optimale Stauegebühr

Als Antwort auf Knappheitsprobleme bzw. zur Allokation knapper Kapazitäten können Knappheitsgebühren (oder auch Stauegebühren genannt) in Höhe der Differenz zwischen sozialen und privaten Grenzkosten zur Internalisierung der negativen Externalitäten ermittelt und an Flughäfen erhoben werden (vgl. z.B. Knieps 1992, vgl. auch Abbildung 11).

Abbildung 11: Negative Externalitäten im Luftverkehr



Grafik: INFRAS angelehnt an Knieps 1992, S. 647.

Kurzfristig sind die Kapazitäten gegeben und damit fix, langfristig können diese jedoch ausgebaut werden. Unter diesem Gesichtspunkt ist zu beachten, dass «auch bei einem optimalen Investitionsniveau in Spitzenzeiten [...] Staus [entstehen]. Ihre Nachteile sind aber geringer als die Investitionskosten einer weiteren Ausbreitung der Kapazitäten» (Knieps, S. 650).

Auch die Auktion von Start- und Landerechten kann eine mögliche Antwort auf Knappheitsprobleme sein. Durch Versteigerung der Rechte würden Marktpreise ermittelt werden, die zusätzlich zur optimalen Staugebühr auch eine Knappheitsrente umfassen (Knieps 1992, S. 646).

Nash et al. (2003) stellten fest, dass in Bezug auf Knappheitskosten noch Forschungsbedarf besteht. Mittlerweise gibt es jedoch vor allem zu Fragen der optimalen Bepreisung von Start- und Landerechten zahlreiche Literatur.

Verspätungskosten

Im Luftverkehr werden grundsätzlich primäre und reaktionäre Verspätungsursachen unterschieden (Abbildung 12). Der mit Abstand grösste Verursacher an den durchschnittlichen Verspätungsminuten sind die Fluggesellschaften (Eurocontrol 2020). Wie weiter oben aufgeführt, können reaktionäre Verspätungen als Überlastungskosten interpretiert werden.

Abbildung 12: Verspätungsursachen im Luftverkehr

	Ursache	Wirkungen	Folgen
primär	Fluggesellschaft (Passagier, Gepäck, Störung am Flugzeug, Crew etc.)	Direkt: • Flugverspätung oder -ausfall Folgewirkungen: ▪ Verlängerung Reise-/Transportzeiten ▪ zusätzliche Wartezeiten	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zeitverluste (Verspätung) ▪ Zusätzliche Betriebs- / Produktionskosten ▪ Zusätzliche administrative Kosten ▪ Rückerstattungen, entgangene Einnahmen ▪ Umweltkosten
	Flughafen		
	En-route (Flugsicherung)		
	Behördlich (Sicherheit, Immigration)		
	Wetter		
	Verschiedenes		
reaktionär	Reaktionäre Verspätungen (aufgrund verspäteter Ankunft von Flugzeugen, Crew oder Passagieren)		

Verspätungen werden durch die Fluggesellschaften erfasst (IATA delay codes, Airport Handlung Manual (AHM) 730 & 731).

Grafik INFRAS. Quelle: basierend auf Eurocontrol 2020.

Im Fokus verschiedener Studien sind die Verspätungskosten aus Sicht der Fluggesellschaften (z.B. Cook und Tanner 2011, Cook 2015) und die Ermittlung der optimalen Staugebühren (*congestion pricing*) aus Sicht der Flughäfen (z.B. Pels und Verhoef 2003, Brueckner 2005). Vergleichsweise wenig Literatur berücksichtigt Verspätungs- bzw. Zeitkosten aus Sicht der Verkehrsteilnehmenden (Passagier / Tonne). In Bezug auf Verspätungskosten werden in einzelnen Studien die Kompensationszahlungen der Fluggesellschaften an die Passagiere bei Verspätungen berücksichtigt (z.B. Yuan 2007, Cook und Tanner 2011).

Folgende Studien berücksichtigen verschiedene Sichtweisen:

- Die ITA (2000) schätzt die gesamten Verspätungskosten der Passagiere (Zeitkosten / Opportunitätskosten, Kosten des Parkens, Berücksichtigung von Kompensationszahlungen) in Europa. Es wird hierbei sowohl die Differenz zwischen geplanter und optimaler sowie die Differenz zwischen tatsächlicher und geplanter Zeit berücksichtigt.
- Ball et al. 2010 monetarisieren die gesamten Verspätungskosten für die USA und bestimmen den Wohlfahrtsgewinn bei Eliminierung der Verspätung. In dieser Studie wird aus Sicht der Verkehrsteilnehmenden die Differenz zwischen tatsächlicher und geplanter Ankunftszeit berücksichtigt. Der *schedule buffer* wird separat ausgewiesen. Die Verspätungskosten berücksichtigen verspätete und ausgefallene Flüge sowie verpasste Anschlussflüge.

Für die Schweiz schätzten Maibach et al. (2005, S. 212) die durchschnittlichen Staukosten (bzw. Verspätungskosten) im Luftverkehr in Höhe von 630 Rp. Pro Passagier bzw. 28'470 pro Tonne. Hierbei stützten sie sich auf Suter et al. (2002), die im Rahmen des EU-Projekts UNITE (Unification of cost accounts) die Zeitverluste und zusätzlichen Kosten aufgrund der Verspätung im Luftverkehr im Passagierlinien- und Charterverkehr quantifizierten. Grenzkosten wurden für den Luftverkehr aufgrund der schlechten Datenlage keine ausgewiesen. In der Vertiefungsstudie zur Weiterentwicklung der Transportkostenrechnung wurden die Verspätungskosten im Luftverkehr dann nicht mehr berücksichtigt (Maibach et al. 2008).

Eine Differenzierung von Verspätungskosten aufgrund der Überlastung und Differenzierung in interne und externe Anteile liegt in den Studien für die Schweiz nicht vor. Eine solche Differenzierung ist aber auch zu hinterfragen, weil eine Zuordnung der Effekte eines zusätzlichen Fluges auf die Verspätungen aus Sicht der Verkehrsteilnehmenden kaum möglich ist. Auch in anderen Studien zu den externen Kosten im Luftverkehr werden keine externen Zeitkosten aufgrund der Überlastung ausgewiesen (z.B. Dings et al. 2003).

Zwischenfazit

Da die Kapazitäten an Flughäfen vorab vergeben werden, wird eine Überlastung über die Kapazitätsgrenze nicht zugelassen. Es entstehen daher keine Überlastungskosten analog der Strasse. Die Quantifizierung wurde daher im Rahmen dieses Auftrags nicht durchgeführt.

Bei zentral koordinierten Infrastrukturen sind einerseits Knappheitskosten (*scarcity costs*) aufgrund eines Nachfrageüberhangs bei der Slot-Vergabe relevant. Aufgrund einer Überlastung einzelner Infrastrukturteile können aber andererseits auch Verspätungen (Stau-/Verspätungskosten, *reactionary delay*) durch Überlastungen resultieren und damit zusätzliche Zeitkosten.

Verspätungskosten wurden im Luftverkehr in verschiedenen Studien quantifiziert. Der Fokus der Studien zu den Verspätungskosten liegt v.a. auf dem Passagierverkehr. Zum Luftfrachtverkehr sind wenig Studien verfügbar.

Zur Ermittlung von gesamten Verspätungskosten in der Schweiz liegen für die «nationalen» Flughäfen Datengrundlagen (BAZL, AIRSTAT) vor. Diese umfassen die Flugbewegungen ab und nach der Schweiz (Pistenzeiten, on dock, off dock Zeit) im Linien- und Charterverkehr vor. Zum Teil werden die Verspätungscodes (retard 1, retard 2) sowie die Anzahl Sitze und Passagiere erfasst. Die gesamten Verspätungskosten im Passagierluftverkehr könnten demnach grob quantifiziert werden. Hierfür bedürfte es weiterer Analysen und v.a. Datenerhebungen.

2.2.3. Schiene

2.2.3.1. Überblick

Hinsichtlich der Fragestellung Verspätungskosten aufgrund überlasteter Infrastruktur im Schienenverkehr und des Einflusses einzelner Reisender auf die Reisezeit der übrigen Verkehrsteilnehmenden wird im Folgenden die Literatur zu Verspätungskosten aufgrund (weiterer) Betriebsstörungen und zu Fahrgastwechselzeiten zum Ein- und Aussteigen der Reisenden in Zügen unterschieden. Zudem wird noch auf die kurz- und langfristige Betrachtung eingegangen.

2.2.3.2. Fahrplanbetrieb und Betriebsstörungen Schiene

Bahnbetrieb: Fahrpläne und Verspätungen

Anders als der Strassenverkehr ist der Schienenverkehr wie auch der Luftverkehr nicht selbstorganisierend. Die Infrastrukturressource Schiene wird deshalb in der Form von diskreten Zeit-Weg Einheiten den Zügen zur Verfügung gestellt: Trassen. Eine Trasse ist die Erlaubnis, eine bestimmte Strecke zu einem definierten Zeitpunkt eines im Voraus angemeldeten Zuges, zu befahren. Verkehrsvolumen können daher im Gegensatz zum Strassenverkehr nicht bis hin zur Kapazitätsgrenze des Gefässes kontinuierlich zunehmen. Anhand dieser betrieblichen Eigenschaft können per Definition im Zugverkehr keine Überlastkosten entstehen, da jeder zusätzliche Verkehrsteilnehmer (hier Züge) von vornherein eine Trasse zugewiesen werden muss. Im Rahmen der Jahresfahrplanerstellung werden Trassen bestellt. Besteht ein Nachfrageüberhang nach Trassen gelten prinzipiell die gleichen Überlegungen wie oben zum Flugverkehr. In der Praxis sorgt die Trassenvergabestelle Schweiz (TVS) für die diskriminierungsfreie Trassenvergabe. Für den Jahresfahrplan bestellen die Antragsteller aktuell rund 17'000 Trassen. Behindern oder schliessen sich Netznutzungswünsche gegenseitig aus, sucht die TVS gemeinsam mit den beteiligten Unternehmen und Fahrplanerstellern nach Alternativen, welche das Führen aller Züge zum Ziel haben. Alternativen sind zeitlich veränderte Fahrplanlagen, andere Routen oder gemeinsam mit den Unternehmen entwickelte geringfügige Anpassungen der Angebotskonzepte. Kann ein Konflikt nicht einvernehmlich gelöst werden, entscheidet die TVS auf der Basis der gesetzlichen Grundlagen, namentlich der Prioritätenregel, wer den Zuschlag erhält. In den letzten beiden Jahren ergab sich diesbezüglich das folgende Bild:

- Im Jahr 2019 (Bestell- und Zuteilungsprozess zum Jahresfahrplan 2020) wurden 424 Trassenkonflikte durch die TVS koordiniert. Nach der Koordination mussten 16 Anträge ganz oder teilweise abgelehnt werden. Es wurde kein Bietverfahren durchgeführt.
- Im Jahr 2018 (Bestell- und Zuteilungsprozess zum Jahresfahrplan 2019) wurden 275 Konflikte koordiniert. 16 Anträge mussten ganz oder teilweise abgelehnt werden. In vier Konfliktfällen wurde der Zuteilungsentscheid mit Bietverfahren getroffen.

Bei neuen oder veränderten Angeboten im Güterverkehr oder bei Extrafahrten im Personenverkehr können auch unterjährig Trassen bestellt werden. Diese beschränken sich auf die noch verfügbare Restkapazität und werden nach dem Prinzip «first come, first served» zugeteilt (Genehmigung nach der Reihenfolge des Eingangs der Anträge). Daraus resultieren Fahrpläne, in denen von den Trassenplanern diverse Reserven eingebaut wurden, um bei gegebener Infrastruktur einen stabilen Fahrplanbetrieb zu ermöglichen.

Für den Deutschen Bundesverkehrswegeplan wurde zudem in Grundlagenstudien der Zusammenhang von Infrastrukturausbau und Zuverlässigkeit untersucht. Mikro- und Makrosimulationen zeigten keine bewertungsrelevanten Änderungen der Pünktlichkeit für den Schienenpersonenverkehr (SPV) bei einem Ausbau der Verkehrsinfrastruktur. Der Sachverhalt wurde als plausibel eingeschätzt, da die Fahrpläne in der Regel so konstruiert sind, dass diese – ausser im Falle exogener Beeinträchtigungen – störungsfrei fahrbar sind und der taktfahrplanbasierte SPV Vorrang vor dem SGV hat und damit von Betriebsstörungen tendenziell weniger betroffen ist (PTV/TCI Röhling/Mann, Hans Ulrich 2016).

Mit Bezug zur Aufgabeneingrenzung «Überlastung der Infrastruktur» und «Kosten aus Sicht der Verkehrsteilnehmenden» ist somit zunächst festzuhalten, dass ein zusätzlicher Reisender oder eine zusätzlich transportierte Tonne in den geplanten Zügen die Auslastung der Infrastruktur nicht verändert und somit auch keine Veränderung der Reisezeiten für die übrigen Verkehrsnachfrager auftreten dürften, wenn die Reserven ausreichend bemessen sind und der Fahrplan stabil ist.

Es ist aber festzuhalten, dass aufgrund von Betriebsstörungen der Fahrplan für Personen- und Güterzüge nicht immer eingehalten wird und es unerwartete Reise- und Transportzeitveränderungen gibt.

Die folgende Abbildung zeigt exemplarische Ursachen, Wirkungen und Folgen.

Abbildung 13: Exemplarische Verspätungsursachen auf der Schiene

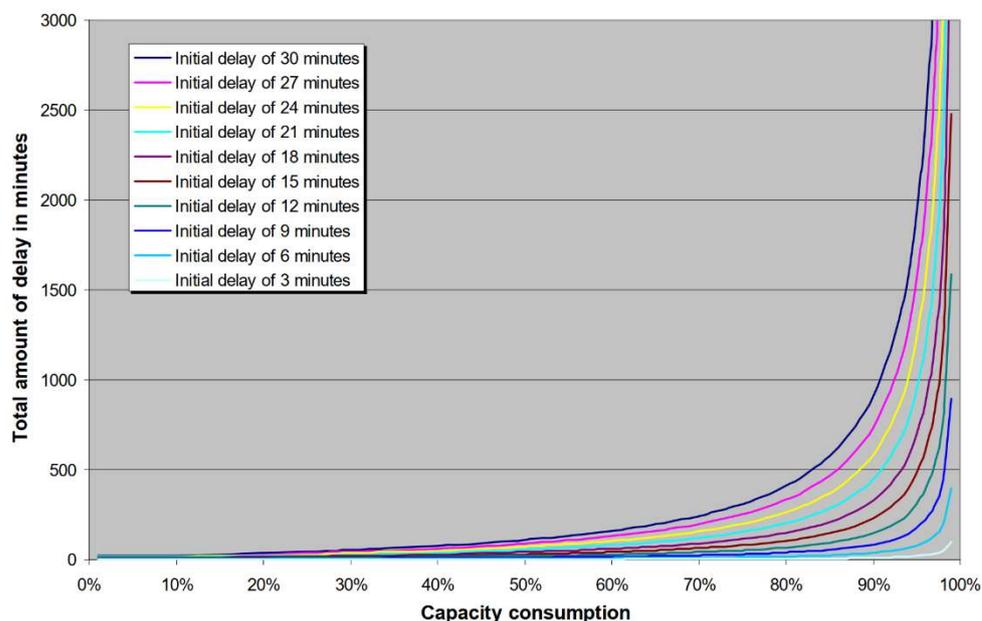
Ursachen	Wirkungen	Folgen
Höhere Gewalt (Unwetter etc.) und Suizide	Direkt:	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zeitverluste (Verspätung) ▪ Zusätzliche Betriebs- / Produktionskosten ▪ Zusätzliche administrative Kosten (z.B. Betriebsführung Infrastruktur, Kundenlenkung) ▪ Rückerstattungen ▪ Umweltkosten
durch Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) verursachte Störungen (Rollmaterial, Personal etc.)	<ul style="list-style-type: none"> • Zugausfall • Zugverspätung 	
durch Infrastrukturbetreiberin (ISB) verursachte Störungen (Anlagenstörungen, Strecken- oder Knotenüberlastung)	Folgewirkungen:	
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Anschlusszugverspätungen ▪ Verlängerung Reise-/Transportzeiten ▪ zusätzliche Wartezeiten 	

Grafik EBP.

Betriebsstörungen: Grössere Auswirkungen bei hoher Auslastung der Infrastruktur

Bei einer hohen Auslastung der Infrastruktur wirken Betriebsstörungen nicht nur auf den Zug, der der Störung ausgesetzt ist, sondern auch auf weitere Züge. Dieser Sachverhalt wird durch Simulationen bestätigt (z.B. Landex (2008), Abbildung 14) und wird in der Fachliteratur als Resilienz des Eisenbahnsystems bezeichnet.

Abbildung 14: Summe der Verspätung der Züge auf einer Strecke anhand der Initialverspätung eines einzelnen Zuges nach Anzahl Züge auf der Strecke (*capacity consumption*)



Grafik INFRAS. Quelle: Landex (2008).

Bešinović (2020) untersucht Studien zur Resilienz in Eisenbahnsystemen und zeigt, dass die meisten diese Problematik aus einer Optimierungsperspektive angehen. Diese haben als Ziel, Algorithmen zu entwickeln, um die Resilienz bzw. die Stabilität eines Eisenbahnnetzes zu steigern.

Andererseits gibt es aber keine Literatur dazu, inwieweit eine hohe Auslastung der Strecken und Knoten anhand genereller Parameter bestimmt werden kann. Grund dafür ist die hohe Komplexität der Streckenkapazität. Die Streckenkapazität ergibt sich aus einer Wechselwirkung zwischen einer Vielfalt von Parametern wie z.B. die Heterogenität der Züge, die auf einer Strecke verkehren, Blockabstände, Signalsystem (im Schweizer Normalspurnetz kommen z.B. drei unterschiedliche Signalsysteme zum Einsatz), Anzahl und Verteilung der Halte, einge-

plante Reserven, Fahrtassistenzsysteme. Abbildung 15 zeigt anhand des Beispiels der Bahnstrecke Zürich HB – Pfäffikon SZ wie das Zusammenspiel dieser Faktoren zu unterschiedlichen Kapazitäten auf unterschiedlichen Streckenabschnitten führt.

Abbildung 15: Verspätungen gegenüber Dichte der Fahrzeuge für verschiedene Streckenabschnitte der Strecke Zürich HB-Pfäffikon SZ



Quelle: Corman & Henken (2021).

Aus Abbildung 15 lassen sich einige Eigenschaften des Systems Bahn herauslesen. Es zeigt sich, wie die Kapazität verschiedener Streckenabschnitte signifikante Unterschiede aufweist. Diese ist am höchsten auf dem Streckenabschnitt, der zum Hauptknoten Zürich HB führt, und wo die Nachfrage am höchsten ist, und am niedrigsten am Streckenabschnitt mit der geringeren Nachfrage, der zu Pfäffikon SZ führt. Die Infrastruktur, konkret hier vor allem die Blockabstände, sind am dichtesten nahe an Hauptknoten, um deren Kapazität gegenüber sekundären Streckenabschnitten zu erhöhen. Des Weiteren gibt es je Streckenabschnitt nur eine sehr geringe Anzahl Beobachtungen, die den Bereich mit höchster Fahrzeugdichte und auch Verspätungen ausmachen. Das hängt mit der Ursache dieser Fälle für Verspätungen zusammen: Diese entstehen

nämlich aus den unplanbaren Ursachen, die in Abbildung 13 aufgeführt werden und bilden Ausnahmen und keine Regelfälle ab. Eine Übersicht der Literatur zur Untersuchung von Streckenkapazitäten anhand der Infrastrukturnutzung ist in Corman & Henkel (2021) vorhanden. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bei höherer Ausnutzung der Schieneninfrastruktur das Ausmass von Verspätungen bei Betriebsstörungen wächst, die hohe Auslastung aber nicht per-se der Grund für Verspätungen ist.

Bewertung der Zuverlässigkeit / Verspätungskosten

Parbo et al. (2016) bemängeln die fehlende Verbindung zwischen den Reisezeitzuverlässigkeiten aus der Passagierperspektive mit der betrieblichen Perspektive der Resilienz in der Literatur. Dies, weil die Autoren – wie auch verschiedene weitere Quellen – festhalten, dass Reisende die Zuverlässigkeit der Reisezeit höher bewerten als Reisezeitverkürzungen (Parbo et al. 2016). Um im Falle von Betriebsstörungen Unzuverlässigkeit zu bewerten, müssten z.B. nicht nur Informationen zu der Anzahl Reisende vorliegen, sondern auch Informationen zur gesamten Reisekette, so dass mögliche Anschlussbrüche auch berücksichtigt werden könnten.

International bestehen verschiedene SP-Befragungen für den öffentlichen Personenverkehr aus denen sich Verhältnisse zwischen der Bewertung der Reisezeit und der Pünktlichkeit herleiten lassen (vgl. auch Tabelle 10). Diese sind hier aber nicht relevant, da für die Schweiz eigene SP-Befragungen (ARE, 2017) vorliegen, aus denen dieses Verhältnis hergeleitet werden kann. Laut der SP-Analyse ist der Reisezeitwert jeder verspäteten Minute im öffentlichen Personenverkehr ca. 2,4-mal so hoch wie die Reisezeitwert ohne Verspätungen.

Die Kosten einer Verspätung entsprechen dann diesem Verspätungskostensatz (in CHF/min). Wardman & Batley (2014) zeigen exemplarisch wie diese signifikant sein können und aufgrund der Nachfrage auch schwanken können.

Auch im Güterverkehr wird die Pünktlichkeit höher gewichtet als die Reisedauer (Rapp Trans & IVT, 2008). Rapp Trans & IRE (2002) schätzen die Zahlungsbereitschaft für eine Pünktlichkeitszunahme als 3-mal so hoch wie der einer Reisezeitabnahme. Dieselbe Grössenordnung wird auch für Deutschland gefunden (BVU et al., 2016). Für den Güterverkehr auf der Schiene werden Veränderungen der Pünktlichkeit durch Infrastrukturmassnahmen im BVWP berücksichtigt. Der mittlere Wertansatz für die Pünktlichkeit in EUR/%-Punkt erhöhter Pünktlichkeit und Tonne liegt je nach Transportsegment zwischen 0.159 (Steine und Erden) und 1.376 (Fahrzeuge und Maschinen) (PTV/TCI Röhling/Mann, Hans Ulrich 2016).

Verspätungskosten in der Schweiz

INFRAS/Ecoplan 2007 haben im Auftrag der SBB die volkswirtschaftlichen Gesamtkosten für Zugverspätungen und -ausfälle für die SBB in Höhe von rund 200 Mio. CHF für 2006 berechnet.

Darin sind die Kosten aus Verspätungen und Ausfällen auch unter Berücksichtigung verpasster Anschlüsse enthalten.

Tabelle 17: Bewertung von unerwarteten Reisezeitveränderungen (Zuverlässigkeitsverhältnis)

GESAMTKOSTEN BETRIEBSSTÖRUNGEN 2006 (IN MIO. CHF)				
ALLE URSACHEN				
Kostenkategorie	Störungsursache			
	EVU's	Infrastruktur	Externe/ Verschiedenes	Total
Betriebswirtschaftliche Kosten	50	34	10	94
Volkswirt. Kosten: Verspätungskosten	146	38	24	207
Volkswirt. Kosten: Unfallkosten	3	5	87	95
Gesamtkosten	199	77	120	397

Tabelle 17

EVU's: Durch Bahnbetrieb verursacht

Infrastruktur: Durch Infrastruktur verursacht (Gleiskörper, Signalisation)

Quelle: SBB INFRAS/Ecoplan 2007

Die Arbeiten basierten auf der Ereignisdatenbank Zugmeldungen (ErZu) und dem Frequenzauswertesystem (FRASY) der SBB:

- ErZu (Ereignis Zugmeldungen) ist eine IT-Applikation für die verursacherorientierte Erfassung von Verspätungen im Zugsverkehr auf der Infrastruktur der SBB. Das Hauptziel besteht darin, dass die Prozessverantwortlichen die Vorfälle analysieren, Massnahmen zur Ereignisminimierung respektive Pünktlichkeitsverbesserung evaluieren, initiieren und auch umsetzen können. Dementsprechend werden vor allem technische Gründe für die Verspätungen erfasst, wie z.B. »Triebfahrzeugstörung«, »Wagenstörung«, »geplante Baustelle« etc.
- Das Frequenzauswertesystem (FRASY) beinhaltet «rohe» Passagierzählungen. Darin wird für jeden Kurs die Anzahl Personen auf jeden Streckenabschnitt für alle gezählten Züge erfasst. Die Erhebung umfasst die folgende Stichprobe:
 - Regionalverkehr: ca. 20% aller Kurse, da nur 20% des Rollmaterials im Regionalverkehr mit automatischen Zählsystemen ausgestattet sind.
 - Fernverkehr: 100%. Im Fernverkehr sind mehr Züge mit Zählsystemen ausgestattet, was zu einer höheren Anzahl gezählter Kurse führt. Für die restlichen Kurse sind die Zugbegleiter dazu verpflichtet, Schätzungen zur Belastung abzugeben.

Die FRASY-Datenbank wird in dieser Form bereits seit Anfang der 2000-er Jahre mehr oder weniger unverändert geführt.

Maibach et al. (2008) definieren die volkswirtschaftlichen Zeitkosten im Schienenverkehr (sprich Verspätungskosten) aus Sicht der Verkehrsteilnehmenden generell als extern.

In der internationalen Literatur gibt es ähnliche Ansätze, die die Summe der Verspätungen der Reisenden nehmen und diese mit erhöhten Zeitkostensätzen für Verspätungskosten monetär bewerten.

Zwischenfazit: Weitere Behandlung im Rahmen dieser Studie

Die Literatur fokussiert somit auf die Fahrplanstabilität bzw. auf die Bewertung von Verspätungen in der Summe. Die Ursachen für die Verspätungen werden nicht aufgezeigt. Hinweise auf Auswertungen finden sich nur für (sehr) stark überlastete Systeme in grossen Metropolen. Ferner ergibt sich als Fazit der Untersuchungen, dass im Falle einer Betriebsstörung die Verspätungen umso grösser sind, je höher die Infrastrukturausnutzung ist. Bezüglich der Aufgabenstellung Überlastung der Transportinfrastruktur ergeben sich keine differenzierten Aussagen, insbesondere nicht, inwieweit die Überlastung durch die Anzahl Züge (Auslastung) oder durch die Verkehrsteilnehmenden induziert ist.

Vom Projektziel her sollten Verspätungskosten auf der Schiene aufgrund von Überlast der Transportinfrastruktur ermittelt und allenfalls externe Kosten der Überlast aufgrund zusätzlicher Reisenden und Tonnen berechnet werden. Dazu werden zunächst Verspätungsdaten benötigt. Diese können den OTT (OpenTimeTable) Daten der SBB entnommen werden. Seitens SBB Infrastruktur werden zudem Gründe für die Verspätungen erfasst. Hier braucht es aber eine eindeutige Zuordnung der Ursache «Überlastung Infrastruktur» für die Verspätungen. Das Projektteam konnte keine entsprechende Datengrundlage ermitteln. Anfragen beim BAV und bei der SBB haben ergeben, dass solch eine präzise Zuordnung, die ohne Zweifel zu Überlast der Infrastrukturen aufzeigt, nicht existiert. Es werden zwar Gründe für Verspätungen erfasst, diese sind aber lediglich technischer Natur. Entsprechend der obigen Ausführungen überrascht dies auch nicht.

Verspätungen aus Überlast der Infrastruktur auf der Schiene können hier somit nicht ermittelt werden. Dazu wäre noch Grundlagenforschung zu leisten. Da Fahrpläne bei systematischen Verspätungen mittels Fahrplanänderungen, Ausbaumassnahmen oder organisatorische Massnahmen angepasst werden und die Bahnunternehmen Fahrzeitreserven in der Fahrplan-konstruktion vorsehen, ist es zudem auch inhaltlich begründet, dass die Zeitkosten der Überlastung der Schiene nicht ermittelt werden.

2.2.3.3. Fahrgastwechselzeiten

Fahrgastwechselzeiten und Verkehrsnachfrage

Fahrgastwechselzeiten sind ein Teil der Haltezeit eines Zuges am Perron, während der die Zugtüren geöffnet sind und Reisende in den Zug ein- und aussteigen. Bei hohem Verkehrsaufkommen können sich die Reisenden gegenseitig behindern, beispielsweise weil wartende Einsteigende den Raum für die Aussteigenden einengen oder sie schon einsteigen, während andere Reisende noch aussteigen. Damit können die eingeplanten Fahrgastwechselzeiten bei hohem Reisendenaufkommen evtl. nicht eingehalten werden. Können die verlängerten Fahrgastwechselzeiten in den Haltezeiten (die z.B. auch die Zeit zur Herstellung der Betriebsbereitschaft des Zuges zur Abfahrt inkl. Schliessung der Türen etc. beinhalten) oder im Betrieb nicht kompensiert werden, kann es zu Verspätungen kommen.

Bei gegebenem Angebot kann somit ein zusätzlicher Reisender die Fahrgastwechselzeit verlängern und damit Verspätungen verursachen. Die Fahrgastwechselzeiten aufgrund einer hohen Verkehrsnachfrage können dabei auch durch eine Überlastung der Infrastruktur bedingt sein, wie zum Beispiel von Perrondesign, wenn diese nicht breit genug sind oder es zu wenig oder schlecht positionierte Ausgänge vom Perron gibt. Daneben werden die Fahrgastwechselzeiten aber massgeblich vom Rollmaterial (Türanordnung, Türbreite, Innenlayout) beeinflusst.

Gysin (2018) hat die Variation der Haltezeiten von Zügen exemplarisch für zwei Schweizer Bahnhöfe untersucht. Die Fahrgastwechselzeiten erklären die Variationen der Haltezeiten am Bahnhof Hardbrücke in Zürich aber lediglich zu 30%. Wichtigere Einflussfaktoren sind z.B. das eingesetzte Rollmaterial (Breite und Anordnung der Türen) oder das Wetter. Diese Befunde stimmen mit den früheren Erkenntnissen von Weidmann (1994) überein.

Das Bundesamt für Verkehr (BAV 2015) untersuchte die Folgen einer zunehmend älteren Bevölkerung und einer wachsenden Anzahl Reisenden auf die Haltstellenaufenthaltszeiten und die Umstiegszeiten der Reisenden zwischen zwei Zügen. Ergebnis ist, dass die Haltstellenaufenthaltszeiten der Züge in Zukunft zunehmen dürften. Eine Umfrage bei den TU bestätigte, dass viele bereits mit längeren Haltezeiten planen und damit auch verlängerte Fahrgastwechselzeiten im Normalfall bereits im Fahrplan eingebaut werden.

Mit Bezug zur Aufgabenstellung ist zudem noch festzuhalten, dass eine längere Haltezeit nicht automatisch zu einer Ankunftsverspätung der Reisenden führt. In der Fahrplankonstruktion wird von einer Fahrgeschwindigkeit unter der zulässigen Streckengeschwindigkeit ausgegangen. Verspätungen können daher durch beschleunigtes Fahren zu einem gewissen Grad abgebaut werden.

Zwischenfazit: Weitere Behandlung im Rahmen dieser Studie

Für eine Berücksichtigung entsprechender Verspätungskosten in dieser Studie müssten die verlängerten Fahrgastwechselzeiten (über die im Fahrplan berücksichtigten Zeiten hinaus) und eine präzise Zuordnung der Ursachen (z.B. Türschaden Rollmaterial vs. Blockierung der Türe durch aufdrängende Fahrgäste) vorliegen. Zudem müsste dann bekannt sein, inwieweit eine verspätete Abfahrtszeit resultierte, die dann auch noch zu einer Verspätung des Zuges führte. Verschiedene städtische Verkehrsbetriebe (z.B. Basel und Zürich) verfügen über Daten für jeden Kurs, wie lange die Trams und Busse an der Haltestelle standen und wieviel Personen ein- und ausgestiegen sind und ob die Abfahrt entsprechend Fahrplan erfolgte. Gründe für eine verspätete Abfahrt, wie z.B. Defekte Tür, Lichtsignal, Abwarten den Fahrweg querender Fuss- und Radfahrer, Stau) werden nicht erfasst, weshalb eine Zuordnung einer Verspätung zu hohem Fahrgastaufkommen nicht möglich ist. Für die Bahn konnte das Projektteam keine entsprechende Datengrundlage ermitteln. Anfragen beim BAV und bei der SBB haben ergeben, dass eine solche präzise Zuordnung nicht vorliegt. Der Aspekt kann in der weiteren Untersuchung nicht berücksichtigt werden.

Exkurs: Kurz- und langfristige Betrachtung (Mohring-Effekt)

Gemäss Literatur können ÖV-Überlastungen auch eine positive Externalität im Sinne des Mohring-Effektes zur Folge haben. Eine Überlast kann mittel- bis langfristig zu einem Ausbau des Angebots führen (Mohring, 1972). Höhere Taktfrequenzen erhöhen dann den Nutzen für alle ÖV-Reisenden, indem a) mehr Fahrmöglichkeiten zur Verfügung stehen, so dass die Anpassungszeiten der Reisenden sinken, und es könnte b) der Komfort steigen.

Aufgrund der folgenden Überlegungen verfolgen wir diese Gedanken hier nicht weiter:

- Das ARE möchte eine jährliche Aktualisierung der Kosten der Überlast berechnen. Damit stehen die kurzfristigen Kosten im Vordergrund. Angebotserweiterungen und damit z.B. eine Reduktion der Komfortkosten (siehe Kapitel 2.3) werden dann im Zeitablauf erkennbar.
- In der Bewertung und Priorisierung neuer Angebote werden heute bereits die Veränderung der Anpassungszeiten berücksichtigt (vgl. BAV-Bewertungsverfahren NIBA). Diese Studie kann dazu keine neuen Erkenntnisse bringen. Sie bringt aber die heute fehlende systematische, verkehrsträgerübergreifende Betrachtung ein
- Generell lässt sich die Argumentation des Mohring Effektes auch auf andere Verkehrsmittel übertragen: Eine Überlast auf der Strasse führt zum Ausbau der Strasse und alle Reisenden profitieren davon. Diese Ausbaulogiken sollten in dieser Studie nicht hinterlegt werden, dies, zumal die Ergebnisse ja auch eine Grundlage für nachfragesteuernde Preise liefern soll, durch die Ausbauten bzw. Angebotserweiterungen vermieden werden sollen.

Für die weiteren Arbeiten gehen wir von kurzfristigen Kosten- und Nutzenfunktionen aus. Das heisst, dass für ein mögliches Pricing die Angebote als fix betrachtet werden. Bei der Frage nach Veränderungen des Angebots werden dann Kosten-Nutzen-Analysen als Entscheidungsgrundlage benötigt.

2.3. Überlastung der Verkehrsmittel: Komfortkosten im öffentlichen Verkehr

Wohlfahrtseffekte einer Überlastung der ÖV-Verkehrsmittel

Die bisherige Literatur zu Überlastkosten im ÖV fokussiert darauf, Reisezeitwerte in überlasteten Reisezuständen abzuleiten, während Stauzeitkosten im Strassenverkehr regelmässig in Berechnungen zu negativen Externalitäten im Verkehr einfliessen. So ist die Studie von Haywood & Koning (2013) die uns einzige bekannte, in der die marginalen externen Kosten aus Überlast vergleichbar für ÖV und MIV vorliegt.

Überlastungen wirken sich im Strassenverkehr v.a. als Zeitverluste aus. Im ÖV hingegen, führen, mit der Ausnahme von Extremfällen, Überlastungen der Verkehrsmittel nicht zu Verspätungen, sondern zu Komfortverlusten. Diese sind nicht direkt messbar und werden je nach Person unterschiedlich bewertet. Es ist zum Beispiel zu erwarten, dass Individuen, die im Nahverkehr ohnehin lieber stehen, keinen Wohlfahrtsverlust erfahren, wenn keine Sitzplätze frei sind. Andere hingegen fühlen sich vom durch den Ticketkauf erworbenen Recht zu sitzen beraubt, falls kein Sitzplatz vorhanden ist.

Weitere in der Literatur genannte psychologische Effekte der Überlastungen im ÖV sind Reizüberflutung, Mangel an Verhaltensfreiheit oder Privatsphäre, welche durch ein dichtes Beieinandersein an sich sowie mit dessen Konsequenzen (z.B. höhere Lautstärke, Geruch, Schmutz) entstehen. Wener et al. (2005) zeigen, dass hohe Passagierdichten im ÖV Auswirkungen auf die Gesundheit haben können wie z.B. Stressentwicklung, höhere Sterberaten und geringere Produktivität am Arbeitsplatz (allerdings in Extremfällen). Nebst dem, gibt es auch die praktische Auswirkung eines überfüllten Verkehrsmittels, dass Reisende ihre Reisezeit im schlimmsten Fall nicht für andere Aktivitäten nutzen können, welche den Reisezeitwert reduzieren wie Molin et al. (2020) darlegen. Dass die Nutzung der Reisezeit für andere Tätigkeiten die Kosten der Reisezeit reduziert, ist auch eine Erklärung für die deutlich niedrigeren Zeitkossätze des ÖV im Vergleich zum MIV in den VSS 41 622a.

Eine ÖV-Reise im überfüllten Zustand hat also negative Auswirkungen auf das Wohlbefinden und kann dazu führen, dass man die Reisezeit nicht für geplante Aktivitäten nutzen kann. Diese Effekte führen zu einem Wohlfahrtsverlust, welcher sich durch einen geringeren Nutzen (bzw. höheren generalisierten Kosten) einer Reise im überlasteten Zustand gegenüber dem unbelasteten Zustand zeigt.

Bewertung Wohlfahrtseffekte mittels Zeitwertmultiplikatoren je Komfortklasse

Da der Wohlfahrtsverlust durch Überlastungen im ÖV vom Zeitraum abhängt in der dieser erfahren wird, weist die Literatur einen VTT-Multiplikator (Value of Travel Time – Multiplikator)

aus. Dieser Kennwert weist das Verhältnis zwischen dem Reisezeitwert für eine Reise im überlasteten gegenüber einer Reise im unbelasteten Zustand aus. Tabelle 18 zeigt VTT-Multiplikatoren aus verschiedenen Studien.

Tabelle 18: VTT-Multiplikatoren aus der Literatur

VTT-Multiplikator	Bezug	Region	Quelle
1.10 – 6.05	Variabel – Meta Analyse aus 17 Studien	ÖV-Bahn Grossbritannien	Wardman & Whelan (2011) – Meta Analyse
0.86 – 2.93	Auslastung 50% – 200%	ÖV-Bahn Grossbritannien	Wardman & Whelan (2011) – Eigene Modellschätzung
1.50	Falls Reisende nicht einen Sitzplatz finden	ÖV Frankreich	Rapport Boiteux – Ministère de l'Équipement (2005)
1.30 – 1.90	Gleichwertig zu einer zusätzlichen Reisezeit von 5min, resp. 20 min falls die ÖV-Fahrt im Stehen durchgeführt werden muss.	ÖV Frankreich	Kroes et al. (2014)
1.30 – 1.40	Gleichwertig zu einer zusätzlichen Reisezeit von 5.7min, resp. 8.7 min falls die ÖV-Fahrt im Stehen durchgeführt werden muss.	Pariser U-Bahn	Haywood & Koning (2013)
1.05 – 1.57	2 – 6 Passagiere/m ² gegenüber Referenz von 1 Pass./m ²	Pariser U-Bahn	Haywood & Koning (2015)
1.06-1.47	(40% Wahrscheinlichkeit stehen zu müssen und 2 pass/m ² – >70% Wahrscheinlichkeit stehen zu müssen und 6 pass/m ²)	Hong-Kong U-Bahn	Bansal, Hörcher & Graham (2020)
1.01-2.13	Sitzend, 1 Person/m ² – Stehend, 8 Personen/m ²	Schweden ÖV-Nahverkehr	Björklung & Swärdh (2015)
1.11 – 2.04	Sitzend, 1 Person/m ² – Stehend, 6 Personen/m ²	Grossbritannien, Fernverkehr	Whelan & Crocket (2009)
1.08 – 2.37	Auslastung 100% – 200%	Grossbritannien, Fernverkehr	Whelan & Crocket (2009)
1.00 – 1.74	100% Sitzplätze belegt – 100% Sitzplätze belegt und stehende Pass. Dichte 3/m ²	Den Haag	Yap et al. (2020)
1.20 – 1.84	Auslastung (100% – 265%)	Washington D.C.	Yap & Cats (2021)

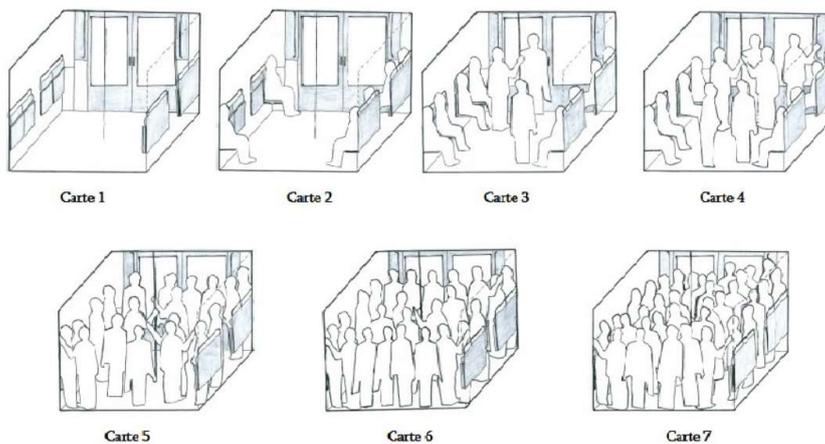
Tabelle EBP.

Ausser einzelnen Studien in Grossbritannien (Wardman & Whelan, 2011) untersuchen die Studien sehr stark überlastete Nahverkehrssysteme, vor allem U-Bahnen in Grossmetropolen. Die

Bewertung der VTT-Multiplikatoren betragen somit Werte von ca. 2-mal den Reisezeitwert im unbelasteten Zustand bei Spitzenbelastungen von 6 – 8 Personen/m².

Diese Bewertungen basieren immer auf Stated-Preference Befragungen mit ÖV-Reisenden, in denen dem Befragten eine Wahl zwischen einer kürzeren Reisezeit in einem überlasteten Zustand gegenüber einer längeren Reise mit hohem Komfort angeboten wird. Aus dieser Abwägung (*trade-off*) lassen sich dann die VTT-Multiplikatoren ableiten. Abbildung 16 zeigt exemplarisch die Auslastungsstufen der Befragung von Haywood & Koning (2013).

Abbildung 16: Auslastungsstufen der SP-Befragung von Haywood & Koning (2013)



Quelle: Haywood & Koning (2013)

VTT-Multiplikatoren können laut Haywood & Koning (2013) deshalb auch als die längere Reisezeit interpretiert werden, die man bereit wäre, um eine Reise in einem unbelasteten Zustand durchzuführen. Demnach wäre man bei einer Auslastung von 8 Personen/m² bereit, eine 2-mal längere Fahrzeit in Kauf zu nehmen, um in einer hohen Komfortklasse zu Reisen. Solch ein Verhalten wird in Metropolen mit chronischen Überlastprobleme auch tatsächlich beobachtet, z.B. indem einige U-Bahn Reisende es bevorzugen während der Hauptverkehrszeit zu einer Haltestelle am Anfang einer Linie zu fahren, damit man für die Reise einen Sitzplatz ergreifen kann.

Da in der Literatur eher kürzere Reisen untersucht werden, wird in der Regel nicht die Variation der VTT-Multiplikatoren mit steigender Reisezeit untersucht. Diese Untersuchung wird von uns anhand der SP-Befragung für die Schweiz in Kapitel 4 vorgenommen. Dies ist wichtig, da in der vorliegenden Studie Nah- und Fernverkehr betrachtet werden.

Externe Kosten der Überlast

Haywood & Koning (2013) sind die einzigen Autoren, die den Versuch unternommen haben, externe Kosten der Überlast zu berechnen. Die Autoren weisen externe Kosten der Überlastungen im ÖV in Paris in der Höhe von 0.17 EUR/Personenkilometer aus. Für Überlastungen im Strassenverkehr beträgt dieser Wert in derselben Studie 0.43 EUR/Personenkilometer.

Die von Haywood & Koning (2013) angewandte Methode zur Berechnung der externen Kosten der Überlast folgt einer ähnlichen Logik wie die Grenzkostenbetrachtung im Strassenverkehr (Terminologie und Formeln hier im Folgenden entsprechend Haywood & Koning (2013)): Die marginalen Kosten einer Fahrt entsprechen dem Komfortverlust aufgrund eines zusätzlichen Reisenden und sind gleich den externen Kosten der Überlast. Gleichzeitig ergibt die Summe der privaten generalisierten Kosten (GC) und der marginalen (=externen) Kosten (MC) die sozialen Grenzkosten. Somit sind die sozialen Kosten (SC) einer Auslastungsstufe k im Vergleich zu einer Auslastungsstufe $h = 0$ folgendermassen definiert (Haywood & Koning, 2013):

$$SC_h = GC_h + MC_h = GC_h + (GC_h - GC_{h=0})$$

Dabei sind die generalisierten Kosten, die Summe der Ticketkosten (p) mit den Reisezeitwert (VTT) mal die Reisezeit (t). Der Reisezeitwert für eine Auslastungsstufe k wird mit dem VTT-Multiplikator (Tm_h) zusätzlich multipliziert.

$$GC_h = p + (Tm_h) \cdot VTT \cdot t$$

3. Zeitverlustkosten Strasse

Im vorliegenden Kapitel werden die Herleitung der Zeitkosten Strasse beschrieben und für das Jahr 2019 berechnet. Kapitel 3.1 fasst die Aktualisierung der Stauzeitkosten – insgesamt und die von der Verkehrsart Schwerverkehr verursacht werden – zusammen.

In Kapitel 3.2 werden mögliche Datengrundlagen, die Auswertung und Analyse der verwendeten Datengrundlagen, das Vorgehen zur Berechnung der volkswirtschaftlichen Kosten der Überlastung der Strasseninfrastruktur und die Ergebnisse beschrieben.

Kapitel 3.3 fasst die Ergebnisse der Plausibilisierungen zusammen.

3.1. Aktualisierung der Stauzeitkosten aus Sicht der Verkehrsart Schwerverkehr

3.1.1. Vorbemerkungen

Die bisherigen Studien quantifizieren die Stauzeitkosten, d.h. effektiv erlittene Verlustzeiten aufgrund von Stau. Keller und Wüthrich (2016, S. 11/12) halten hierzu fest: Als «Staukriterium» wurde das von INRIX üblicherweise verwendete Geschwindigkeitsverhältnis verwendet, d.h. nur Fahrten mit einer Geschwindigkeit $< 65\%$ der Referenzgeschwindigkeit (=unbehinderter Fahrt) wurden als staurelevant betrachtet.

Die Stauzeitkosten aus Sicht der Verkehrsart Schwerverkehr, wie sie vom Bundesgericht definiert ist, sollen ebenfalls quantifiziert werden, können aber aus den Zeitkosten aus Sicht der Verkehrsteilnehmenden nicht abgeleitet werden. Die Sichtweisen weichen grundsätzlich voneinander ab. Die Sicht der Verkehrsart Schwerverkehr konzentriert auf die vom Schwerverkehr verursachten Stauzeitkosten, was dem grenzkostenbasierten Ansatz widerspricht. Die Stauzeitkosten aus Sicht der Verkehrsart Schwerverkehr werden daher aufgrund einer vereinfachten Aktualisierung der Studie aus dem Jahr 2016 (Keller und Wüthrich 2016) analog Keller (2019) ermittelt.

Die externen Kosten spielen u.a. im Kontext der Leistungsabhängigen Schwerverkehrsabgabe (LSVA) eine wichtige Rolle. Nebst dem Grundsatz, dass die Stauzeitkosten zu den externen Kosten gehören, hat das Bundesgericht (BG) auch die grundsätzliche Methodik, wie diese zu ermitteln sind, vorgegeben. Die vorliegende Studie schätzt die Stauzeitkosten für die Jahre 2018 und 2019. Diese umfassen einerseits die Stauzeitkosten für den Verkehrsträger Strasse insgesamt, andererseits die vom Schwerverkehr verursachten Stauzeitkosten.

Das methodische Vorgehen der vorliegenden Aktualisierung basiert auf der Methode der letzten Aktualisierung aus dem Jahre 2019 und wird in Kap. 3.1.2 erläutert. Die Ergebnisse fassen wir in Kap. 3.1.3 zusammen.

3.1.2. Methodisches Vorgehen

Methodik zur Ermittlung der Gesamtstauzeitkosten

Ausgangspunkt für die Berechnung der Gesamtstauzeitkosten sind die letzten Staustudien «Neuberechnung der Staukosten Schweiz 2010 – 2014» (Keller und Wüthrich 2016) und die Aktualisierung aus dem Jahre 2019 (Keller 2019). Das methodische Vorgehen der vorliegenden Aktualisierung ist die Anwendung der Methode der letzten Aktualisierung aus dem Jahre 2019 (Keller 2019). Ziel ist die Erweiterung der Zeitreihe der Staukosten auf die Jahre 2018 und 2019¹⁰. Dabei wird auch weiterhin zwischen der Situation auf Autobahnen und dem übrigen Strassennetz unterschieden.

Wie in der Aktualisierungsstudie aus dem Jahr 2019 (Keller 2019) bilden zwei Datensätze die Grundlage für die Aktualisierung der Entwicklung der Staukosten auf Autobahnen für die Jahre 2018 und 2019. Dies sind die Staustatistik mit Angaben zur Staudauer von Viasuisse, und die Online-Daten der ASTRA-Zählstellen¹¹, welche beide in den Jahresbericht zum Verkehrsfluss (ASTRA 2020) fliessen. Die Herleitung der zeitlichen Entwicklung mittels Online-Daten wird in der Studie 2016 (vgl. Keller und Wüthrich 2016, S. 92/93) und in der Studie 2019 (vgl. Keller 2019, S. 15) beschrieben.

Für die Entwicklung auf Nicht-Autobahnen wurde wie von Keller (2019) vereinfachend unterstellt, dass sich die Fahrzeug-Staustunden im Zeitraum 2017 bis 2019 nicht verändert haben und deshalb dieselben Werte wie im Zeitraum 2014 bis 2017 verwendet werden.

Aktualisiertes Mengengerüst

Für die vorliegende Aktualisierung wurden keine methodischen Neuerungen berücksichtigt. Floating Car Data, wie sie im Rahmen von Keller und Wüthrich (2016) verwendet wurden, lagen uns für den Zeitraum 2018–2019 zum Zeitpunkt der Berechnungen nicht vor. Wie in der Studie 2019 wird auch in der vorliegenden Aktualisierung die Entwicklung der Staudauer gemäss Staustatistik – stellvertretend für die Entwicklung der Fahrzeug-Staustunden – verwendet. Ausgangspunkt sind die Entwicklungen der zwei Parameter Fahrzeugkilometer (Fzkm, auf AB) und Staudauer gemäss ASTRA-Jahresbericht zum Verkehrsfluss (ASTRA 2020). Für die Jahre 2018 und 2019 stellt das ASTRA die entsprechenden Werte zur Verfügung (vgl. Tabelle 1). Die Angaben bis 2017 entsprechen den Angaben von Keller (2019).

¹⁰ Für die Fortschreibung der Kostensätze sind die Indizes zum Nominal- und Reallohn sowie des LIK (Landesindex der Konsumentenpreise) notwendig. In der letzten Studie waren die Werte für das Jahr 2017 noch nicht publiziert und durch eine einfache Berechnung ersetzt worden. In der jetzigen Aktualisierung wurden die berechneten Annahmen durch die richtigen Jahreswerte ersetzt. Die Abweichung ist mit -0.24% vernachlässigbar klein.

¹¹ <https://www.astra.admin.ch/astra/de/home/dokumentation/daten-informationsprodukte/verkehrsdaten/daten-publikationen/automatische-strassenverkehrszaehlung.html>.

Tabelle 19: Entwicklung von jährlicher Fahrleistung und Staudauer auf Autobahnen

	Gesamtverkehr AB *		LMW		SMW		StauStd.	% ggü. Vorjahr
	Mio. Fzkm/a	% ggü. Vorjahr	Mio. Fzkm/a	% ggü. Vorjahr	Mio. Fzkm/a	% ggü. Vorjahr		
2010	25'161		23'653		1'508		15'958	
2011	25'874	2.8%	24'339	2.9%	1'535	1.8%	19'149	20.0%
2012	25'947	0.3%	24'436	0.4%	1'511	-1.6%	19'919	4.0%
2013	25'169	-3.0%	23'640	-3.3%	1'529	1.2%	20'596	3.4%
2014	25'416	1.0%	23'873	1.0%	1'543	0.9%	21'541	4.6%
2015	26'484	4.2%	24'939	4.5%	1'545	0.1%	22'828	6.0%
2016	27'131	2.4%	25'564	2.5%	1'567	1.4%	24'066	5.4%
2017	27'680	2.0%	26'089	2.1%	1'591	1.5%	25'842	7.4%
2018	27'696	0.1%	26'098	0.0%	1'598	0.4%	27'406	6.1%
2019	27'799	0.4%	26'150	0.2%	1'649	3.2%	30'230	10.3%

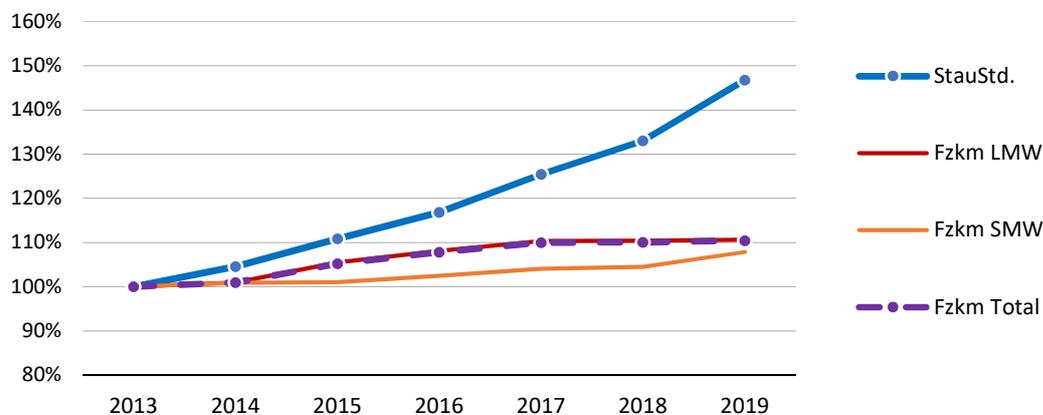
* Die Angaben zu den Fahrleistungen bis 2012 basieren auf einer alten Methodik; ab 2013 wurde eine neue Methodik verwendet. Erläuterungen dazu finden sich z. B. im ASTRA-Jahresbericht 2016, Kap. 6 (ASTRA 2016).

LMW: leichte Motorwagen, SMW: schwere Motorwagen, AB: Autobahnen, Fzkm: Fahrzeugkilometer, /a: pro Jahr.

Tabelle INFRAS. Quelle: Keller 2019 (bis 2017), ASTRA 2020 (ab 2018).

Die Staudauer nimmt erwartungsgemäss überproportional zur Fahrleistung zu. Die Zahlen zur Fahrleistung bis 2012 basieren allerdings auf einer alten Methodik, so dass die Reduktion 2012/13 methodisch bedingt ist und die Fahrzeugkilometer erst ab 2013 vergleichbar sind. Dies gilt entsprechend auch für die Staudauer.

Abbildung 17: Relative Entwicklung von Fahrleistung und Staudauer auf Autobahnen ab 2013 (Index 2013 = 100)



Fzkm: Fahrzeugkilometer, LMW: leichte Motorwagen (Personenwagen und leichte Nutzfahrzeuge), SMW: schwere Motorwagen (schwere Nutzfahrzeuge und Reisebusse)

Grafik INFRAS. Quellen: Keller 2019 (bis 2017), ASTRA 2020 (ab 2018).

Unter der Annahme, dass sich die Fahrzeug-Staustunden proportional zur Staudauer entwickeln (Keller 2019), ergeben sich die Ergebnisse gemäss Tabelle 20. Die Aufteilung des Wachstums der Fahrzeug-Staustunden auf die beiden Fahrzeugkategorien LMW (leichte Motorwagen) bzw. SMW (schwere Motorwagen) erfolgt proportional zur Entwicklung der Fahrleistung¹², wobei diese in Personenwagen- (PW)- Einheiten ausgedrückt werden (Annahme: 1 LMW = 1.0 PW-Äq., 1 SMW = 2.0 PW-Äq.)¹³. Dabei ist zu beobachten, dass der relative Fahrleistungsanteil der schweren Motorwagen am Wachstum stark gestiegen ist, allerdings auf absolut tiefem Niveau bleibt.

Tabelle 20: Abschätzung der Fahrzeug-Staustunden 2014 bis 2019

	Staustunden (ASTRA)	ggü. Vor- jahr	FzStaustd. Total (Mio.)	ggü. Vor- jahr	FzStaustd. LMW (Mio.)	ggü. Vor- jahr	FzStaustd. SMW (Mio.)	ggü. Vor- jahr
2014	21'541	-	17.491	-	16.620	-	0.871	-
2015	22'828	6.0 %	18.536	6.0 %	17.662	6.3 %	0.875	0.4 %
2016	24'066	5.4 %	19.542	5.4 %	18.601	5.3 %	0.941	7.6 %
2017	25'842	7.4 %	20.984	7.4 %	19.922	7.1 %	1.062	12.8 %
2018	27'406	6.1 %	22.253	6.1 %	20.445	2.6 %	1.808	70.3 %
2019	30'230	10.3 %	24.547	10.3 %	21.212	3.8 %	3.335	84.4 %

LMW: leichte Motorwagen (Personenwagen und leichte Nutzfahrzeuge), SMW: schwere Motorwagen (schwere Nutzfahrzeuge und Reisebusse)

Tabelle INFRAS. Quellen: Keller 2019 (bis 2017), ASTRA 2020, eigene Berechnungen (ab 2018).

Für die Herleitung der Entwicklung der Stauzeitkosten 2010–2014 wurde in Keller 2019 ein differenzierterer Ansatz anhand der ASTRA-Zählraten (Anzahl Fahrzeuge) verwendet und dann in Relation zu den Ergebnissen des Jahres 2013 gesetzt. Dies führte dazu, dass die Zunahme der Fahrzeug-Staustunden (+5.3%) leicht grösser war als die Zunahme der Staudauer (+ 6.1%), oder anders ausgedrückt: die Stauintensität hat tendenziell zugenommen. In diese Sinne ist die Annahme der konstanten Stauintensität eher konservativ.¹⁴

¹² Wie in der Studie 2019 wird auch hier vereinfachend die Entwicklung der Fahrleistung der schweren Nutzfahrzeuge (SNF) stellvertretend für jene der schweren Motorwagen (SMW = SNF + Reisebusse) verwendet.

¹³ Entwicklung der Fzkm (Mio.) auf Autobahnen (Quellen: Keller 2019, ASTRA 2020)

	Fzkm total	LMWKm	SMWKm	PWE-km total	Anteil am Wachstum		LMW % ggü 2014	SMW % ggü 2014
					LMW	SMW		
2014	25'416	23'873	1'543	26'959				
2015	26'484	24'939	1'545	28'029	99.6%	0.4%	104.5%	100.1%
2016	27'131	25'564	1'567	28'698	93.4%	6.6%	107.1%	101.6%
2017	27'680	26'089	1'591	29'271	91.6%	8.4%	109.3%	103.1%
2018	27'696	26'098	1'598	29'293	41.2%	58.8%	109.3%	103.5%
2019	27'799	26'150	1'649	29'448	33.5%	66.5%	109.5%	106.9%

¹⁴ Für detailliertere Informationen gibt es in der Studie 2019 einen ergänzenden Kommentar (vgl. Keller 2019, S. 18).

Aktualisierung Mengengerüst übriges Strassennetz

Die Reisezeiten weisen auf den meisten Routen gleich wie in Keller 2019 eine stabile Entwicklung auf. Markante Differenzen sind auf spezifische Sondersituationen zurückzuführen (Baustellen, Streckensperrungen, neue Verkehrsführungen etc.). Das Fazit deckt sich mit der bereits von Keller und Wüthrich (2016) getroffenen Annahme unveränderter Verhältnisse bzgl. Entwicklung SMW und LMW. Diese Annahme wird deshalb auch für das Mengengerüst der Jahre 2018 und 2019 übernommen. Das bedeutet konkret:

- 11.22 Mio. Fahrzeug-Staustunden für die leichten Motorwagen,
- 0.22 Mio. Fahrzeug-Staustunden für den Schwerverkehr.

Aktualisierte Kostensätze

Die Kostensätze wurden wie in der Studie 2019 auf die Schweizer VSS-Normen abgestützt (vgl. Kap. 2.2.1.2 bzw. 2.2.1.3).¹⁵ Die Details der Herleitung sind in Keller und Wüthrich 2016 (Annex A5 Kenngrössen zur Herleitung der Kostensätze) beschrieben. Die nachstehende Tabelle zeigt die Ergebnisse für die Jahre bis 2017 sowie die Jahre 2018 und 2019; die Details der Herleitung finden sich in Annex A4.¹⁶

Tabelle 21: Aktualisierte Kostensätze (in CHF pro Fahrzeugstunde)

	LMW	SMW
2010	40.1	78.1
2011	40.5	78.9
2012	40.9	79.6
2013	41.2	80.0
2014	41.6	80.8
2015	41.7	81.1
2016	42.0	81.7
2017	42.1	82.4
2018	41.9	83.1
2019	42.4	84.1

LMW: Leichte Motorwagen (Personenwagen und leichte Nutzfahrzeuge), SMW: Schwere Motorwagen (Lastwagen und Reisebusse).

Tabelle INFRAS. Quellen: Keller 2019 (bis 2017), BFS 2021a, BFS 2021b, eigene Berechnungen (ab 2018).

¹⁵ Es wird demnach für alle PW die Schweizer Zeitkostensätze zugrunde gelegt und keine Differenzierung nach Herkunft der Personen vorgenommen.

¹⁶ Für die Fortschreibung der Kostensätze sind die Indizes zum Nominal- und Reallohn sowie des LIK (Landesindex der Konsumentenpreise) notwendig. In der letzten Studie waren die Werte für das Jahr 2017 noch nicht publiziert und durch eine einfache Berechnung ersetzt worden. In der jetzigen Aktualisierung wurden die berechneten Annahmen durch die richtigen Jahreswerte ersetzt. Die Abweichung ist mit -0.24% vernachlässigbar klein.

Aktualisierung der vom Schwerverkehr verursachten Stauzeitkosten

Wie die vom Schwerverkehr verursachten Stauzeitkosten zu ermitteln sind, hat das Bundesgericht im Grundsatz vorgegeben, nämlich aus einem Vergleich der effektiven Verkehrsfluss-Situation (MIT Schwerverkehr) mit einer fiktiven Verkehrsfluss-Situation OHNE Schwerverkehr. Das erfordert zwangsläufig eine Modellierung, da es für die fiktive Verkehrsfluss-Situation OHNE Schwerverkehr keine empirischen Grundlagen gibt. In der Studie 2016 wurde dazu eine methodische Erweiterung entwickelt (vgl. Keller und Wüthrich 2016, Kap. 2.6.1 und 2.6.2). Die aus den Daten 2013 abgeleiteten relativen Anteile der vom Schwerverkehr verursachten Stauzeitkosten für alle Jahre (2010–2017) wurden konstant gehalten (62 % auf der Autobahn) und auf die Staukosten der Jahre 2018 und 2019 appliziert. Der entsprechende Wert auf Nicht-Autobahnen wurde ebenfalls als fix angenommen (21 %). Inwiefern dies zu einer Unter- oder Überschätzung der Staukosten führt, kann nicht beurteilt werden. Eine Neuberechnung der Anteile war nicht Gegenstand dieser Studie.

3.1.3. Ergebnisse

Aktualisierte Stauzeitkosten 2018 und 2019

Aus der Multiplikation von Mengengerüsten (Fahrzeug-Staustunden) und Kostensätzen ergeben sich die aktualisierten Gesamt-Stauzeitkosten für die Jahre 2018 und 2019. Die nachstehenden Tabellen zeigen die aktualisierten Mengengerüste (Fahrzeug-Staustunden) und die Stauzeitkosten für die Jahre 2010 bis 2019. Die Werte 2010 bis 2016 sind unverändert aus der Studie 2019 übernommen, bei den Stauzeitkosten des Jahres 2017 wurde die Herleitung der Kostensätze aktualisiert¹⁷ und die Werte 2018 und 2019 basieren auf den oben erläuterten Annahmen.

¹⁷ Für die Fortschreibung der Kostensätze sind die Indizes zum Nominal- und Reallohn sowie des LIK (Landesindex der Konsumentenpreise) notwendig. In der letzten Studie waren die Werte für das Jahr 2017 noch nicht publiziert und durch eine einfache Berechnung ersetzt worden. In der jetzigen Aktualisierung wurden die berechneten Annahmen durch die richtigen Jahreswerte ersetzt. Die Abweichung ist mit -0.24% vernachlässigbar klein.

Tabelle 22: Fahrzeug-Staustunden in Mio. pro Jahr für 2010–2019

	AB		Nicht-AB		Alle Strassen		alle
	LMW	SMW	LMW	SMW	LMW	SMW	
2010	15.19	0.79	11.23	0.22	26.42	1.00	27.42
2011	15.68	0.81	11.23	0.22	26.90	1.03	27.93
2012	16.45	0.85	11.23	0.22	27.68	1.07	28.75
2013	15.67	0.82	11.23	0.22	26.90	1.04	27.93
2014	16.62	0.87	11.23	0.22	27.85	1.09	28.94
2015	17.66	0.87	11.23	0.22	28.89	1.09	29.98
2016	18.60	0.94	11.23	0.22	29.83	1.16	30.99
2017	19.92	1.06	11.23	0.22	31.15	1.28	32.43
2018	20.45	1.81	11.23	0.22	31.67	2.03	33.70
2019	21.21	3.33	11.23	0.22	32.44	3.55	35.99

AB: Autobahnen. LMW: leichte Motorwagen (Personenwagen und Leichte Nutzfahrzeuge), SMW: schwere Motorwagen (Lastwagen und Reisebusse);

Tabelle INFRAS. Quellen: Keller und Wüthrich 2016, Keller 2019 (bis 2017), ASTRA 2016, ASTRA 2020, BFS 2021a, BFS 2021b, eigene Berechnungen (ab 2018).

Tabelle 23: Fahrzeug-Stauzeitkosten in Mio. CHF pro Jahr für 2010–2019

	AB		Nicht-AB		alle Strassen			Veränd. Alle ggü. Vorjahr
	LMW	SMW	LMW	SMW	LMW	SMW	alle	
2010	608.7	61	450	17	1'059	78	1'137	-
2011	634.3	64	454	17	1'089	81	1'170	2.9 %
2012	672.2	68	459	17	1'131	85	1'216	4.0 %
2013	645.7	66	463	17	1'108	83	1'191	-2.0 %
2014	690.6	70	467	18	1'157	88	1'245	4.5 %
2015	736.6	71	468	18	1'205	89	1'293	3.9 %
2016	780.9	77	471	18	1'252	95	1'347	4.1 %
2017	839.5	87	473	18	1'313	105	1'418	5.3 %
2018	856.9	150	471	18	1'328	168	1'496	5.4 %
2019	898.5	281	476	18	1'374	299	1'673	11.8 %

Abkürzungen: LMW: leichte Motorwagen (Personenwagen und Leichte Nutzfahrzeuge), SMW: schwere Motorwagen (Lastwagen und Reisebusse); AB: Autobahnen.

Tabelle INFRAS. Quellen: Keller und Wüthrich 2016, Keller 2019 (bis 2017), ASTRA 2016, ASTRA 2020, BFS 2021a, BFS 2021b, eigene Berechnungen (ab 2018).

Vom Schwerverkehr verursachte Stauzeitkosten 2018 und 2019

In der Studie 2019 wurde angesichts der Unsicherheiten in der Modellierung¹⁸ aus dem Jahr 2016 auf eine jahresweise Eruiierung des Anteils der vom Schwerverkehr verursachten Stauzeitkosten verzichtet und der relative Anteil für alle Jahre konstant belassen. Aufgrund einer Nutzen-Aufwand-Abwägung wurde für die vorliegende Aktualisierung beschlossen, den gleichen vereinfachten Ansatz auch für die Jahre 2018 und 2019 anzuwenden. Konkret bedeutet dies die Übernahme folgender Anteilswerte (vgl. ARE 2016, Kap. 2.6.3, S. 104):

- Anteil Werktagsverkehr: Weil der Schwerverkehr praktisch ausschliesslich am Werktag Mitverursacher von Staus ist, wird lediglich dieser Anteil in Rechnung gestellt, d.h. in der Berechnung werden lediglich 79.3 % der LMW-Staukosten auf Autobahnen berücksichtigt, auf Nicht-Autobahnen 84.6 %.
- Anteil der vom Schwerverkehr verursachten Stauzeitkosten: Gemäss der Modellierung in der Studie 2016 würden die Fahrzeugstauzeiten der LMW an Werktagen um 61.6 % zurückgehen, falls kein Schwerverkehr auf den Strassen zirkulieren würde; auf Nicht-Autobahnen ist der Schwerverkehrsanteil deutlich geringer, entsprechend ist auch dessen Anteil an der Stausituation kleiner (21.1 %).

Setzt man diese Werte auf die gesamten Stauzeitkosten an, so resultieren daraus die Werte gemäss nachfolgender Tabelle.

¹⁸ Eine Neuberechnung der Stauzeitkosten MIT wie auch OHNE Schwerverkehr für alle Zählstellen, und strenggenommen müsste dies auch eine Überprüfung der zählstellenspezifischen Fundamentaldiagramme für die verschiedenen Jahre miteinschliessen, bringt verschiedene Unsicherheiten mit sich. In Keller 2019 ist die Modellierung detailliert beschrieben.

Tabelle 24: Totale Stauzeitkosten und vom Schwerverkehr verursachte Stauzeitkosten in Mio. CHF pro Jahr

	Fahrzeugstauzeitkosten total (Mio. CHF/a)			Stauzeitkosten an Werktagen (Mio. CHF/a)			Vom Schwerverkehr verursachte Stauzeitkosten (Mio. CHF/a)		
	AB	NichtAB	total	AB	NichtAB	total	AB	NichtAB	total
	LMW	LMW	LMW	LMW	LMW	LMW			
2010	608.7	449.9	1'058.6	482.5	380.5	863.0	297.4	80.5	377.9
2011	634.3	454.4	1'088.7	502.9	384.3	887.2	310.0	81.3	391.3
2012	672.2	458.8	1'131.0	532.8	388.0	920.9	328.5	82.1	410.5
2013	645.7	462.7	1'108.4	511.8	391.4	903.2	315.5	82.8	398.3
2014	690.6	466.6	1'157.1	547.4	394.6	942.1	337.5	83.4	420.9
2015	736.6	468.3	1'204.9	583.9	396.1	980.0	359.9	83.8	443.7
2016	780.9	471.4	1'252.3	619.0	398.7	1'017.8	381.6	84.3	465.9
2017*	839.5	473.2	1'312.6	665.5	400.2	1'065.7	410.2	84.6	494.9
2018	856.9	470.6	1'327.6	679.3	398.1	1'077.4	418.7	84.2	502.9
2019	898.5	475.6	1'374.1	712.2	402.3	1'114.5	439.0	85.1	524.1

Annahmen gemäss Keller und Wüthrich 2016 (Kap. 2.6.3, S. 104):

- Anteil Werktägliche Stauzeitkosten: AB 79.3 %, Nicht-AB 84.6 %.

- Anteil vom Schwerverkehr verursacht: 61.6 %, Nicht-AB 21.2 %.

LMW: leichte Motorwagen (Personenwagen, leichte Nutzfahrzeuge), SMW: schwere Motorwagen (Lastwagen, Reisebusse);
AB: Autobahnen. /a: pro Jahr.

* Siehe Fussnote 18.

Tabelle INFRAS. Quelle: Keller 2019 (bis 2017); eigene Berechnungen (ab 2018).

Zusammenfassende Übersicht

Die beiden nachstehenden Tabellen zeigen die Ergebnisse für die gesamten Stauzeitkosten bzw. die vom Schwerverkehr verursachten Stauzeitkosten. Der deutliche Anstieg der Stauzeitkosten im Jahr 2019 gegenüber dem Vorjahr ist auf den Anstieg der Fahrleistungen insgesamt und des deutlich gestiegenen Fahrleistungsanteils des Schwerverkehrs zurückzuführen.

Die Gesamtstauzeitkosten betragen 2018 rund 1.5 Mrd. CHF. Gegenüber 2010 entspricht dies einer Zunahme um 32 %. Im Jahr 2019 betragen die Gesamtstaukosten 1.67 Mrd. CHF. Dies ist ggü. 2010 ein Anstieg von 47 %. Der Anteil der vom Schwerverkehr verursachten Stauzeitkosten stagnierte im Jahr 2018 auf 33 % und stieg im Jahr 2019 auf rund 38 % an. In den beiden Zeitreihen sind allerdings methodische Änderungen enthalten, so dass nur eine beschränkte Vergleichbarkeit mit den Angaben vor 2013 gegeben ist.

Tabelle 25: Aktualisierte Fahrzeug-Stauzeitkosten in Mio. CHF pro Jahr 2010–2019

	LMW	% ggü. Vor- jahr	SMW	% ggü. Vor- jahr	Total	% ggü. Vor- jahr
2010	1'059		78		1'137	
2011	1'089	2.8%	81	3.2%	1'170	2.9 %
2012	1'131	3.9%	85	5.1%	1'216	4.0 %
2013	1'108	-2.0%	83	-2.5%	1'191	-2.0 %
2014	1'157	4.4%	88	6.0%	1'245	4.5 %
2015	1'205	4.1%	89	0.8%	1'293	3.9 %
2016	1'252	3.9%	95	6.9%	1'347	4.1 %
2017	1'313	4.8%	105	11.3%	1'418	5.3 %
2018	1'328	1.1%	168	59.7%	1'496	5.4 %
2019	1'374	3.5%	299	77.5%	1'673	11.8 %

LMW: leichte Motorwagen (Personenwagen, leichte Nutzfahrzeuge), SMW: schwere Motorwagen (Lastwagen, Reisebusse).

Tabelle INFRAS. Quelle: Keller und Wüthrich 2016, Keller 2019, ASTRA 2016, ASTRA 2020, BFS 2021a, BFS 2021b, eigene Berechnungen.

Tabelle 26: Vom Schwerverkehr verursachte Stauzeitkosten in Mio. CHF pro Jahr 2010–2019

	AB	% ggü. Vor- jahr	Nicht-AB	% ggü. Vor- jahr	Total	Anteil SV
2010	297		80		378	33.2 %
2011	310	4.2%	81	1.0%	391	33.4 %
2012	328	6.0%	82	1.0%	411	33.8 %
2013	316	-3.9%	83	0.9%	398	33.4 %
2014	337	7.0%	83	0.8%	421	33.8 %
2015	360	6.7%	84	0.4%	444	34.3 %
2016	382	6.0%	84	0.7%	466	34.6 %
2017	410	7.5%	85	0.4%	495	34.9 %
2018	419	2.1%	84	-0.5%	503	33.6 %
2019	439	4.8%	85	1.1%	524	31.3 %

AB: Autobahnen

Tabelle INFRAS. Quelle: Keller und Wüthrich 2016, Keller 2019, ASTRA 2016, ASTRA 2020, BFS 2021a, BFS 2021b, eigene Berechnungen.

3.2. Zeitverlustkosten aus Sicht der Verkehrsteilnehmenden

3.2.1. Vorbemerkungen

Aufgrund des Auftrags, gesamte Zeitverlustkosten als auch den Wohlfahrtsverlust grob zu quantifizieren, steht der grenzkostenbasierte Ansatz im Vordergrund der Studie, der in Kapitel 2.2.1.1 dargestellt und auch von Van Essen et al. (2019) angewandt wurde. Dieser Ansatz fokussiert auf die Sicht der Verkehrsteilnehmenden.

Zur Berechnung der Zeitkosten aus Sicht der Verkehrsteilnehmenden sind eine Referenzgeschwindigkeit und die tatsächliche Geschwindigkeit sowie die zugehörige Belastung relevant. Zur Herleitung des Wohlfahrtsverlusts ist zusätzlich die optimale Geschwindigkeit bzw. Auslastung (basierend auf der Kosten- und Nachfragekurve) zu definieren. Zur Herleitung der Belastung und der Geschwindigkeit im belasteten Zustand auf dem jeweiligen Streckenabschnitt sind grundsätzlich zwei Ansätze möglich:

- Verkehrsmodellierung mit typischen Auslastungen und funktionalen Zusammenhängen zu den Geschwindigkeiten,
- Beobachteter Verkehrszustand in Bezug auf Geschwindigkeit bzw. Fahrzeit sowie Auslastung (z.B. Zählstellen-Daten, Mobilfunk- resp. Floating Car Daten).

Für die streckenspezifischen Kostenfunktionen sind Capacity-Restraint-Funktionen (CR-Funktionen) zu definieren.

Im Idealfall würde für ein Jahr für jede Strecke und jedes auf ihr verkehrende Fahrzeug die Information zur tatsächlich benötigten Fahrzeit verwendet. Aus Gründen der Datenbeschaffung und -verfügbarkeit, des Datenhandlings sowie der später vorzunehmenden Aktualisierung wird der Idealansatz auf Basis ausschliesslich beobachteter Daten kaum realisierbar sein. Die eingesetzte Methodik zur Herleitung der gesuchten Daten stellt eine Mischung der oben genannten Ansätze dar. Würde lediglich auf die Verkehrsmodellierung abgestellt, besteht die Gefahr, dass die Zeitverluste nicht in Ihrem gesamten Umfang erfasst werden, da Verkehrsmodelle und die darin verwendeten Capacity-Restraint Funktionen auf den durchschnittlichen Werktag und langfristige Planungen ausgerichtet sind.

3.2.2. Beschreibung möglicher Datengrundlagen

Datengrundlagen werden einerseits zur Beschreibung der tatsächlichen Verkehrszustände resp. zur Ermittlung der Überlastungsereignisse und andererseits zur Definition der optimalen Situationen benötigt. Die Abbildung der optimalen Situation kann auf vergleichbaren Datengrundlagen basieren. Daher werden für beide Aufgaben die Datengrundlagen gemeinsam behandelt.

Grundsätzlich lassen sich dazu die theoretisch denkbaren Datengrundlagen wie folgt differenzieren:

Tabelle 27: Generelle Datengrundlagen zum Verkehrszustand auf der Strasse

Datengrundlage	Kurzbeschreibung
Staudaten	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Datenbanken zu erfassten Stauereignissen ▪ Erstellung und Bewirtschaftung im Auftrag ASTRA durch Viasuisse
Zählraten	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Datenbanken zu querschnittsbezogenen Ereignissen ▪ Erstellung und Bewirtschaftung durch ASTRA, Kantone, Gemeinden
Floating Car Data	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Datenbanken mit in Echtzeit erfassten Daten mobiler Personen oder Gegenständen ▪ Erfassung und Bewirtschaftung durch (privatwirtschaftliche) Mobilfunk- und Datendienstleister
Verkehrsmodelle	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Modelle zur Abbildung typischer Verkehrszustände ▪ Erstellung und Betrieb (im Auftrag) öffentlicher Hand (Bund, Kantone) oder zu Forschungszwecken durch universitäre Einrichtungen

Tabelle INFRAS.

Staudaten (Viasuisse / ASTRA)

Das Unternehmen Viasuisse erfasst im Auftrag des ASTRA Zustandsinformationen zum (übergeordneten) Verkehrsnetz der Schweiz, wobei der Fokus auf den Nationalstrassen liegt. Folgende Punkte beschreiben diesen Datensatz in Kurzform:

- Erfasst werden Ereignisse, welche räumlich verortet und zeitlich eingeordnet werden.
- Die räumliche Verortung bezieht sich auf das so genannte TMC-Netz (Traffic Message Channel). Dieses Netz ist vergleichsweise grob aufgelöst und die den Ereignissen zugeordneten Abschnitte sind je nach Netzdichte relativ lang. Ein (automatisiertes) Matching mit anderen Netzen (bspw. zur Attributgewinnung) ist nicht möglich; manuell wäre dies (sehr aufwändig) machbar.
- Der Zeitbezug besteht aus Ereignisbeginn und Ereignisende (Datum und Uhrzeit).
- Der Zustandsbeschreibung ist hoch aggregiert und unterscheidet zwischen Verkehrssituationen mit Stau oder mit stockendem Verkehr:
 - Von Stau wird gesprochen, wenn auf Hochleistungsstrassen oder Hauptstrassen eine reduzierte Fahrzeuggeschwindigkeit während mindestens einer Minute unter 10 km/h vorliegt, oder auf Hauptstrassen (vorwiegend innerorts) bei Verlustzeiten an Knoten und Engpässen von mehr als 5 Minuten.
 - Stockender Verkehr ist definiert als (ausserorts) teilweise kurzer Stillstand und/oder Fahrzeuggeschwindigkeiten während mindestens einer Minute unter 30 km/h, aber über 10 km/h.

- Beide Verkehrssituationen werden bspw. im Verkehrsflussbericht des ASTRA dem Begriff Stau zugeordnet, eine genaue Unterscheidung der Zustände benötigt netzweite und dynamische Verkehrs- und Geschwindigkeitsdaten, die heute noch nicht verfügbar sind (Keller und Wüthrich 2016).
- Zusätzliche detailliertere Geschwindigkeitsinformationen liegen nicht vor.
- Weitere Informationen, die für die Zeitkostenberechnung relevant wären, sind in diesem Datensatz nicht enthalten (es gibt noch Angaben zur Stauursache). So liegen insbesondere mengenbezogene Daten nicht vor (betroffene Fahrzeuge, Fahrzeugkategorien).
- Dieser Staudatensatz ist über das ASTRA verfügbar.

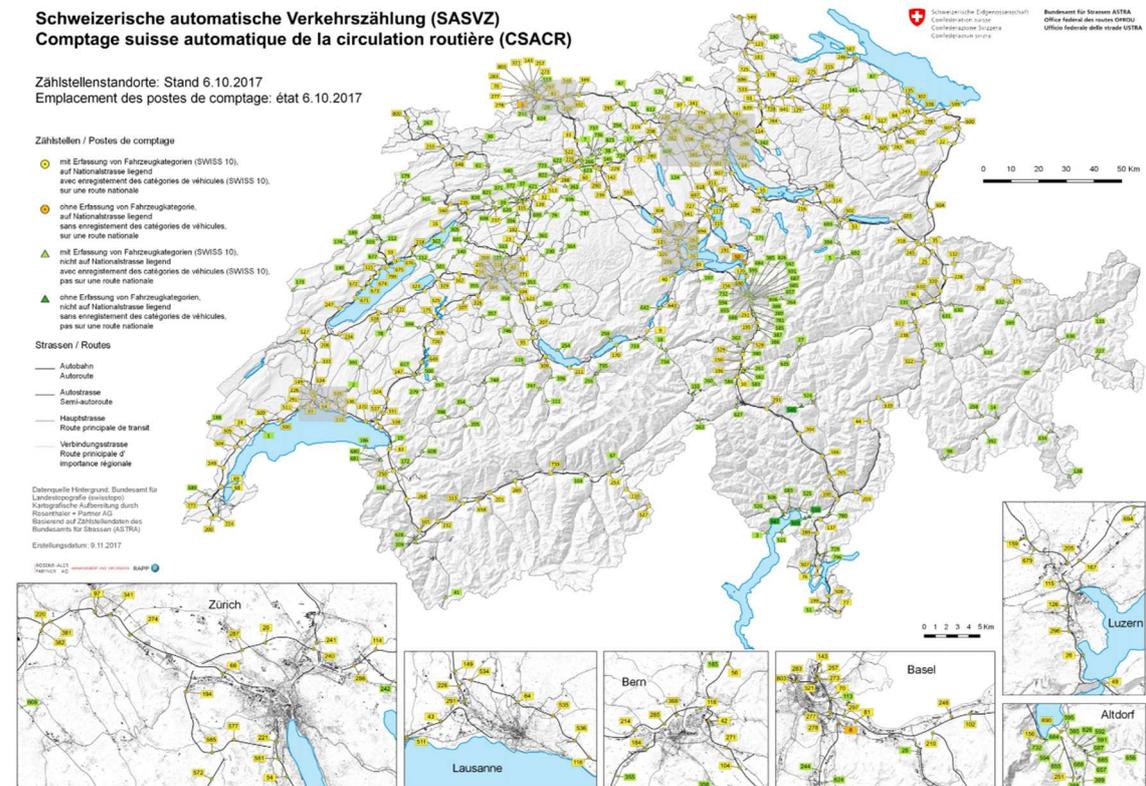
⇒ Zur Ermittlung der Zeitkosten Strasse nicht unmittelbar geeignet, da hierfür die zustandsbeschreibenden Kenngrößen aus der Staudatenbank nicht umfassend genug sind. Zur Plausibilisierung von Zustandsberechnungen kann dieser Datensatz jedoch herangezogen werden. Es wird jedoch vorgezogen, andere Daten für die Plausibilisierung zu verwenden, die besser geeignet und weniger aufwändig sind.

Zähldaten

Bund, Kantone und (teilweise) Gemeinden betreiben ein Netz an Zählstellen, mit denen querschnittsbezogene Daten erfasst werden. Dazu sind folgende Punkte relevant:

- Prinzipiell könn(t)en Zählstellen diverse Daten, welche auch zur Zeitkostenermittlung von Belang wären, erfassen. Dazu gehören insb. Anzahl Fahrzeuge, Fahrzeugkategorien und auch Geschwindigkeiten. In der Praxis hängt dieser Erfassungsumfang jedoch von der Art der Zählstelle und deren technischen Möglichkeiten ab.
- Die Zählstellen können entweder ortsfest oder variabel sein. Nicht ortsfeste Zählungen werden zumeist nur zu ausgewählten Zeiträumen vorgenommen; diese Daten werden dann allenfalls hochgerechnet. Ortsfeste Anlagen operieren i.d.R. ganzjährig, jedoch kann es zu Einschränkungen im Betrieb kommen (techn. Störungen, Wettereinflüsse etc.).
- Je dichter das Zählstellennetz ist, desto besser wären diese Daten auch für den Beschrieb von Verkehrsflüssen geeignet. Da jedoch Installation und Betrieb solcher Anlagen sehr aufwändig sind, gibt es keine flächendeckende Verbreitung. Das ASTRA hat ca. 350 Anlagen auf dem Nationalstrassennetz, dazu kommen nochmals ca. 100 Anlagen der Kantone.

Abbildung 18: Zählstellennetz SASVZ



Quelle: ASTRA.

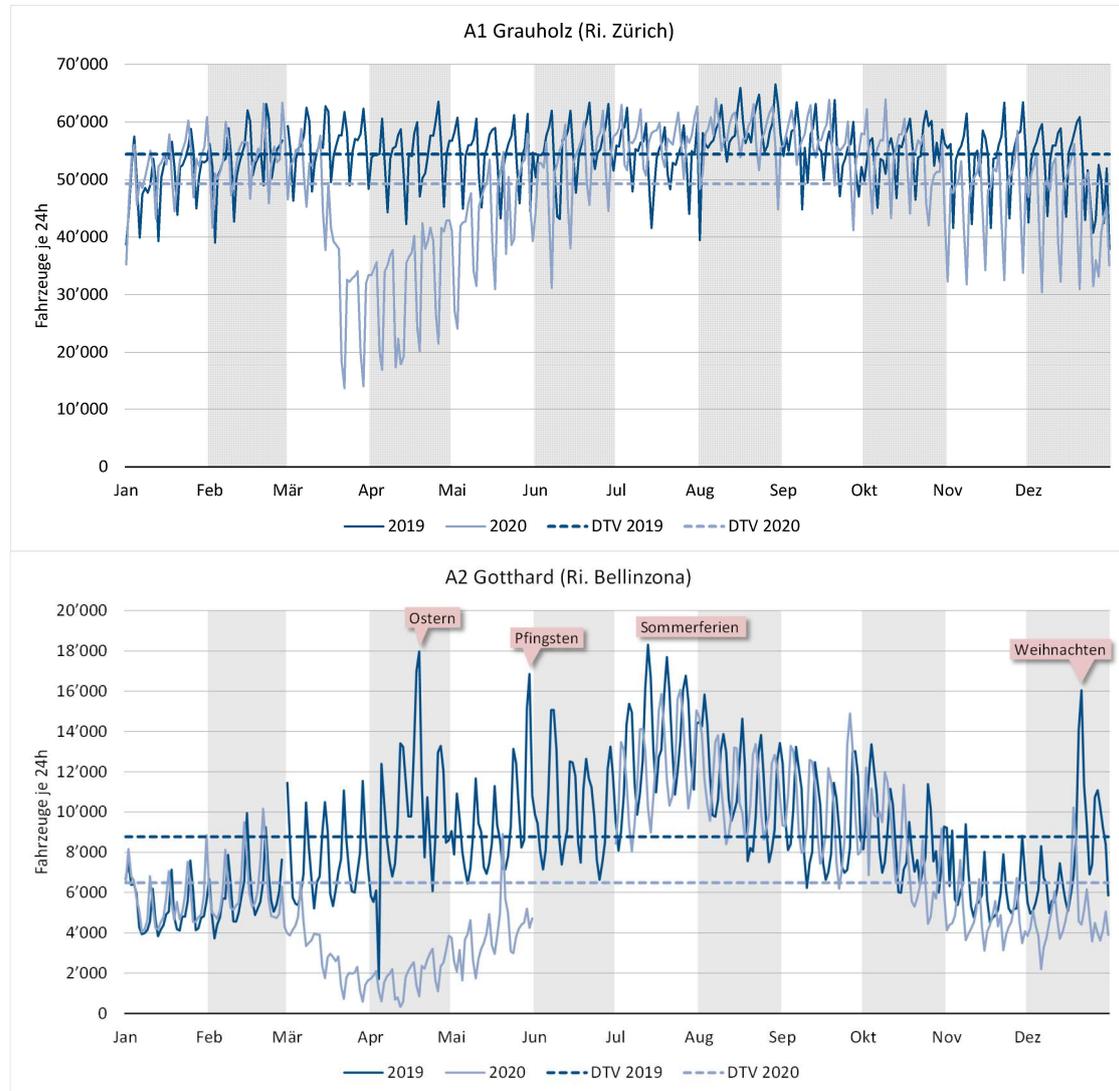
- Die zur Zustandsbeschreibung wichtige Kenngrösse der gefahrenen Geschwindigkeit (am Querschnitt) ist nur an wenigen Zählstellen verfügbar.
- Die zeitliche Auflösung ist – zumindest in den Rohdaten – sehr hoch, weil jedes Zählereignis einen Zeitstempel erhält.
- Eine eigentliche Zustandsbeschreibung des Verkehrsflusses ist hier «naturgemäss» nicht enthalten; dafür werden die Zähldaten auch nicht erhoben. Es wären also zwingend weitere externe Daten notwendig, so dass sich daraus Zustandsbeschreibungen ableiten liessen. Die Zählstellendatenbank beinhaltet ausser dem Strassenbezug keine Attribute zu den Strassenquerschnitten an sich (Fahrstreifen, signalisierte Geschwindigkeiten etc.).
- Die Zähldaten vom Nationalstrassennetz werden vom ASTRA verarbeitet, plausibilisiert und je nach Anforderung aufbereitet resp. zur Verfügung gestellt. Mit den Anlagen zur Erfassung von LSVA-pflichtigen Fahrzeugen besitzt auch das Bundesamt für Zoll und Grenzsicherheit (BAZG) Zähldaten, jedoch nur an ausgewählten wenigen Querschnitten, ebenso wie einige Anlagen mit integrierter Gewichtserfassung (weigh in motion, WIM) – diese Daten sind via BAZG verfügbar.

⇒ Zur Ermittlung der Zeitkosten Strasse nicht unmittelbar geeignet, da hierfür die räumliche Dichte der zur Zustandsbeschreibung notwendigen Kenngrößen zu gering ist. Aber: Mit den Zähldaten lassen sich typische Zustände (Jahresgang, Wochengang, Tagesgang) ermitteln und – in Abhängigkeit bspw. von Streckentypen und/oder Raumtypen – verallgemeinern (je nach Methode). Zur Plausibilisierung von Zustandsberechnungen sind diese Daten ebenfalls gut geeignet. Für einzelne Strecken erfolgten Plausibilisierungen der Tagesganglinien der HERE-Daten mit den Zählstellendaten (vgl. Kap. 3.2.3, Abbildung 27).

Exkurs: Ganglinien aus Zähldaten

- Würden Modelldaten (mit Durchschnittswerten) zur Herleitung der gesuchten Daten (Belastung) verwendet werden, so könnten sie mittels jahresspezifischer Zähldaten angepasst werden.
- Insbesondere wäre es möglich, mittels Ganglinien auf die konkreten Belastungen (und allfällige Stauereignisse) im Betrachtungsjahr schliessen zu können. Dazu sind Jahresgang (Saisonalität), Wochengang (werktags vs. Wochenende) und Tagesgang (Spitzen- vs. Nebenstunden) geeignet.

Abbildung 19: Beispiele Jahresganglinien => hier sind für jede Stunde im Jahr Belastungsdaten verfügbar



Quelle: ASTRA (SASVZ) / Grafik: INFRAS.

Floating Car Data

Mit neuen Technologien werden vermehrt «mobile Daten» erfasst. Im Strassenverkehr werden diese beim Bezug auf eine Fahrt in Fahrzeugen auch als Floating Car Data (FCD) bezeichnet. Theoretisch wären damit sehr gute Grundlagen vorhanden, um Verkehrszustände beschreiben zu können. Im Verbund mit deren räumlichen Verortung ergeben sich hier auch Optionen zum Beschrieb der optimalen Zustände. Folgende Punkte sind hier hervorzuheben:

- Die Daten werden entweder mit mobilen Geräten oder mit Festeinbauten in Fahrzeugen erfasst. Mobile Geräte sind i.d.R. Mobiltelefone, und (in immer geringerem Masse) mobile Navigationsgeräte. Festeinbauten sind Bestandteil der Fahrzeugelektronik – bis dato war dies zumeist an ein (festeingebautes) Navigationsgerät im Fahrzeug gebunden, während dies künftig unabhängig davon sein wird, weil (neuzugelassene) Fahrzeuge entsprechende Ortungs- und Kommunikationseinrichtungen serienmässig beinhalten (müssen).
- Mittels Ortungsfunktion – i.d.R. via GPS, aber auch oder in Kombination mit anderen funkbaasierten Technologien wie bspw. Wifi, Bluetooth, Mobilfunknetz – wird die Position kontinuierlich und somit die Ortsveränderung erfasst. Damit geht (theoretisch) ein hoher Umfang an entsprechenden Daten einher (Koordinaten und Zeitpunkte, woraus Wegpunkte und Geschwindigkeiten etc. abgeleitet werden), so dass sich daraus Informationen zum Verkehrsfluss (in Verbindung mit weiteren netzbeschreibenden Informationen) ableiten lassen.
- Mit Blick auf den gesuchten Datenumfang ist anzumerken, dass diese Datensätze zumeist bereits einen Strecken- resp. Netzbezug besitzen. D.h. die gesuchten Kenngrößen Anzahl Fahrzeuge (allenfalls auch Typen) und Geschwindigkeiten (oder bereits klassierte Zustände) sind mit Netzabschnitten verbunden. Die räumliche Auflösung dieser Abschnitte resp. der Netze ist i.d.R. sehr hoch, allenfalls für die Fragestellung sogar zu hoch, so dass wieder aggregiert werden müsste.
- Entsprechend der Gerätestruktur (Mobile Devices, Festeinbauten) sind die Datenherrschaften und somit die potenziellen Quellen solcher Datengrundlagen gegliedert:
 - Mobilfunkanbieter wie bspw. Swisscom, der entsprechende Datensätze auf Anfrage und gegen Gebühr anbietet. Das ASTRA hat inzwischen eine vertragliche Vereinbarung mit der Swisscom und TomTom zur projektspezifischen Nutzung solcher Datensätze; nach Absprache mit dem ASTRA sind testweise Auszüge nach Festlegung entsprechender Spezifikationen einsehbar. Aus Sicht Netzbeschreibung (Typen, Kapazitäten, Fahrstreifen etc.) ist hier weniger zu erwarten, wobei Swisscom mit einem Navigationsanbieter zusammenarbeitet (TomTom), der mit seinen Netzen entsprechende Daten zur Verfügung stellen kann.
 - Softwarehersteller im Bereich der Betriebssysteme von Mobile Devices, was sich faktisch auf Google und Apple beschränkt. Beide Unternehmen vermarkten ihre Daten in Eigenregie (bspw. Verkehrslage innerhalb Google Maps); erfahrungsgemäss stellen die Softwarehersteller die Daten Dritten zur weiteren Verwendung nicht zur Verfügung.
 - Navigationsanbieter in Form von Dienstleistern, welche mobile Daten aufbereiten, verarbeiten, analysieren und vermarkten (bspw. ebenfalls zur Verkehrslagedarstellung in entsprechenden Applikationen oder Geräten). Hierzu zählen Unternehmen wie TomTom, In-

rix, Garmin oder Here (siehe Exkurs unten). Diese beziehen die Rohdaten i.d.R. von Mobilfunkanbietern, Softwareherstellern und/oder Fahrzeugherstellern (siehe unten).

Navigationsanbieter verfügen auch über entsprechende Netzdaten. Deren Detaillierungsgrad ist aber ähnlich wie bei den Zustandsdaten variabel und abhängig von der Anfrage und dem Budget. Strassenkategorisierungen sind vorhanden, aber nicht harmonisiert, d.h. die Kategorien entsprechen nicht der Abgrenzung National-, Kantons- und Gemeindestrassen. Fehlend sind Daten zu Kapazitäten, aber mit den Angaben zu Fahrstreifen im Verbund mit der Typisierung könnte dies abgeleitet werden. Signalisierte Geschwindigkeiten liegen vielfach vor, alternativ könnten aber auch Geschwindigkeiten aus unbelasteten Verkehrszustände (Level of Service (LOS) A, vgl. Tabelle 7) insb. zu den Nachtstunden bezogen werden.

- Fahrzeughersteller verfügen i.d.R. auch über entsprechende Datensätze, welche über die inzwischen fast standardmässig eingebauten Kommunikations- und Ortungsgeräte gewonnen werden. Vielfach werden diese Geräte und/oder Daten von Zulieferern oder anderen Dienstleistern eingebracht und bearbeitet, wobei dies zumeist die oben dargestellten Navigationsanbieter betrifft (Here ist bspw. ein Gemeinschaftsunternehmen von Volkswagen, BMW und Mercedes Benz, das aber auch Drittherstellern Dienstleistungen anbietet).
- Problematisch ist die Verfügbarkeit der Datensätze. Da sämtliche Datenherrschaften privatwirtschaftlich organisiert sind, gibt es keinen Automatismus zum Bezug. Am ehesten sind noch Mobilfunkbetreiber und Navigationsanbieter bereit, Datensätze (auf Anfrage) an Dritte gegen Gebühren abzugeben.
- Ebenfalls problematisch sind bei diesen Datensätzen Art und Umfang allfälliger Bearbeitungen der Rohdaten. Je nach Datensatz, eventuell auch je nach Anforderung und Vereinbarung, werden die Rohdaten bereits von den Dateneignern bearbeitet. Dies beinhaltet vielfach auch Methoden zur Hochrechnung bis hin zur Modellierung. Dementsprechend lässt sich nicht immer eruieren, mit welchen Einschränkungen solche bereits bearbeiteten Datensätze verbundenen sind.

⇒ Zur Ermittlung der Zeitkosten Strasse sind diese Datensätze trotzdem gut geeignet und die beste Wahl. Neben der den Ansprüchen genügenden Datentiefe ergibt sich vielfach auch die Option zum gleichzeitigen Bezug weiterer netzbezogener Attribute (insb. bei den Navigationsanbietern).

Exkurs: Datenbeispiel vom Anbieter HERE

HERE ist (im weitesten Sinne) ein Telematikdienstleister, der a) Geodaten und – in Verbindung mit diesen Geodaten – b) FCD-Daten anbietet. HERE ist ein Gemeinschaftsunternehmen der Autokonzerne BMW, Mercedes und Volkswagen, welche den Dienstleister von Nokia erworben haben (der zuvor unter dem Namen Navteq bereits vergleichbare Dienstleistungen angeboten hat). Inzwischen haben sich weitere Autohersteller (Mitsubishi) resp. Zulieferer (Bosch, Continental) und sonstige Investoren beteiligt. Die Dienstleistung (Karten, Verkehrsdaten) kann sowohl im B2C via App auf Natels (Here WeGo) wie auch B2B in entsprechenden Fahrzeugsystemen der Autohersteller genutzt werden, wobei neben den genannten Eignern (und all deren Konzernmarken) inzwischen auch diverse Dritte die HERE-Daten (in jedoch unterschiedlicher Tiefe) nutzen, u.a. Stellantis (Fiat, PSA), GM, Honda, Toyota, Renault/Nissan, Jaguar/Land Rover, Volvo. Faktisch ist damit ein Grossteil der (Neufahrzeug-)Flotte mit HERE-Daten ausgerüstet und liefert entsprechende FCD zurück. Seit 2018 ist sowohl in der EU wie auch in der Schweiz mit eCall ein fahrzeugeigenes Notrufsystem obligatorisch, womit unabhängig der vom Kunden «gekauften» Ausstattung jedes (Neu-)Fahrzeug GPS- resp. GALILEO-basierte Positions- und Geschwindigkeitsdaten via SIM-Karte generiert (und zumindest offiziell nur dann an die herstellereigenen Server überträgt, wenn auch die entsprechende Ausstattung erworben wurde – diese ist aber inzwischen fast Standard).

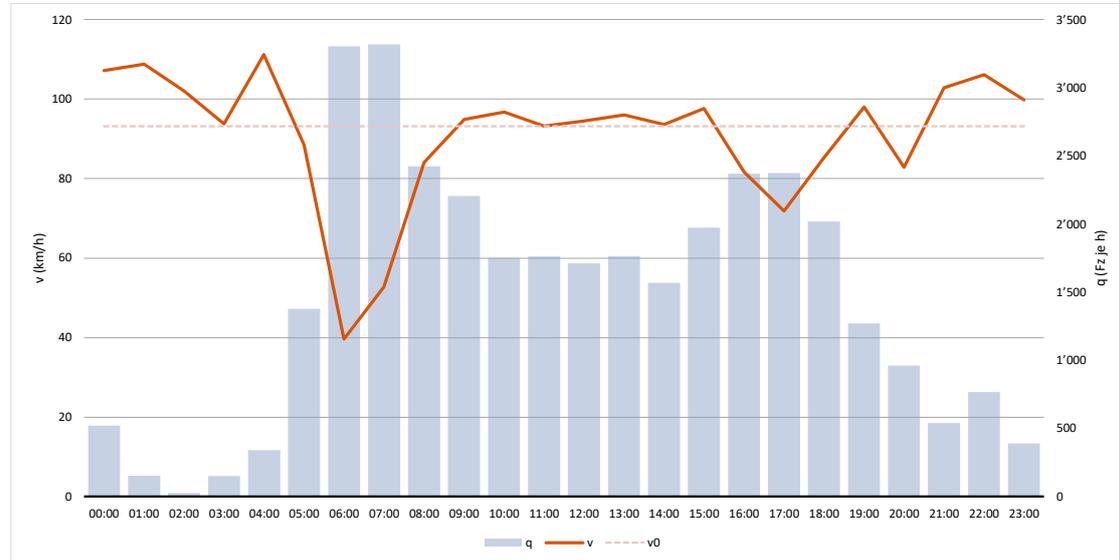
- HERE liefert streckenspezifische Geschwindigkeitsdaten (je nach Wunsch aufgelöst = gemittelt auf 5, 15 oder 60 Minuten).
- Bezogen werden diese «Speedprofiles» entweder (kann ausgewählt werden)
 - auf das TMC-Netz. Für die hier benötigten Zwecke nicht geeignet, da zu stark generalisiert und nicht mit Netz des Nationalen Verkehrsmodells Personenverkehr (NPVM) matchbar, oder
 - auf das HERE-eigene Netz (Produktname «HERE Maps»)
- Zeitraum und räumlicher Bezug sind frei wählbar, allenfalls durch Datengrösse beschränkt

Tabelle 28: Übersicht und Kurzbeschreibung Daten HERE

Daten HERE (Maps)	Erläuterung
Lage	<ul style="list-style-type: none"> Strecke (Link) als (sehr) lagegenaues Polygon
Count = Stichprobe	<ul style="list-style-type: none"> Anzahl Fahrzeuge, welche die Geschwindigkeitsdaten «geliefert» haben Entspricht rund 1–5% der gesamten Belastung Ist nicht nach Fahrzeugkategorien differenziert
Date-Time = Zeitpunkt	<ul style="list-style-type: none"> Datum und Start-Uhrzeit des Minutenrasters (5, 15 oder 60)
Free-Flow = v_0	<ul style="list-style-type: none"> Geschwindigkeit bei unbehindertem Verkehrsfluss wird von HERE definiert, ohne weitere Hintergrundinfos
Speedlimit	<ul style="list-style-type: none"> signalisierte Geschwindigkeit
Mean = v	<ul style="list-style-type: none"> mittlere Geschwindigkeit im angeforderten Minutenraster
diverse Statistik	<ul style="list-style-type: none"> Statistikmasse zum Geschwindigkeitswert (Min, Max, Standardabw., Konfidenz)
Gapfill	<ul style="list-style-type: none"> hier wird (mit Yes oder No) angegeben, ob zum gewünschten Minutenraster überhaupt Beobachtungen vorlagen lagen keine Beobachtungen vor, hat HERE die mittlere Geschwindigkeit berechnet

Tabelle INFRAS.

Abbildung 20: Datenbeispiel HERE zu einem TMC-Link (Stundenwerte auf Basis aggreg. 5-min-Raster)



Quelle: HERE / Grafik: INFRAS.

- Ein erster Test zum Georeferenzieren und Datenaustauschen zwischen HERE-Maps und dem Netz NPVM hat positive Ergebnisse gezeigt – auch wenn die Links offenbar nicht metergenau übereinander liegen (was jedoch mit GIS-Funktionalitäten wie bspw. Buffering «überbrückt» werden kann). Ebenfalls gibt es sehr gute Übereinstimmungen bei den Streckentypen, so dass die hier im Vordergrund stehenden HVS-Strecken identifiziert werden können.

Abbildung 21: Überlagerung der Netze NPVM und HERE (Beispiel-Ausschnitt Ebikon-Buchrain)



Quellen: ASTRA (NPVM), HERE / Grafik: INFRAS.

Zwischenfazit zu HERE resp. zu Datensätzen vergleichbarer Anbieter (bspw. TomTom): Es ist möglich, via Georeferencing die HERE-Daten an das Netz NPVM «ranzuspielen». Damit können – je nach Methodik – die Daten zwischen beiden Quellen ausgetauscht resp. ergänzt werden. Damit ist es auch möglich, über die CR-Funktionen der Modelle (siehe unten) auf die Belastungen rückschliessen zu können.

Verkehrsmodelle

Verkehrsmodelle generieren synthetische Daten unter Einbezug empirischer und netzbeschreibender Grundlagen. Aus Sicht Datengrundlagen wären folgende Punkte relevant:

- Mit strukturellen Daten und verhaltensbeschreibenden Parametern wird eine Netzbelastung modelliert und an Beobachtungsdaten kalibriert. Im Vordergrund steht damit (beim Straßenverkehr) die Fahrzeugbelastung von einzelnen Strecken. Aber quasi als «Abfallprodukt» liegen auch (modellierte) Geschwindigkeiten im Belastungszustand vor.
- Verkehrsmodelle generieren Daten für exakt abgegrenzte Zeitscheiben, i.d.R. in Bezug auf den durchschnittlichen Werktag (DWV) oder typische Spitzenstunden.
- Der Netzbezug bietet die Möglichkeit, entsprechende Attribute zu beziehen (Typen, Kapazitäten, Geschwindigkeiten im unbelasteten Zustand).

- Diese Modelle werden von der öffentlichen Hand betrieben, die Daten sind entsprechend gut verfügbar (allenfalls eingeschränkt durch Datennutzungsverträge mit Drittanbietern).

⇒ Zur Ermittlung der Zeitkosten Strasse als Alternative zu den Beobachtungsdaten bedingt geeignet. Vorteil wäre insb. die Kompatibilität zu anderen Bundesarbeiten oder Publikationen, welche ebenfalls auf Grundlagen bspw. des nationalen Personenverkehrsmodells (NPVM) basieren. Belastungen (DWV) liegen pro Streckenabschnitt differenziert nach Fahrzeugkategorien vor. Ebenso von Vorteil wäre die Verwendung der in den Modellen vorhandenen, bewährten resp. plausibilisierten Zusammenhänge wie bspw. der CR-Funktionen. Die verfügbaren Netzattribute sind ein weiterer Verwendungsbereich der Verkehrsmodelle. Nachteile sind, dass die Verkehrsbelastungen für durchschnittliche Werktage geschätzt werden, aber nicht für einzelne Tage und damit auch nicht für Wochenenden vorliegen. Zudem werden die Modelle nicht jährlich aktualisiert.

Exkurs: Netz und Geschwindigkeitsbeispiel aus dem NPVM

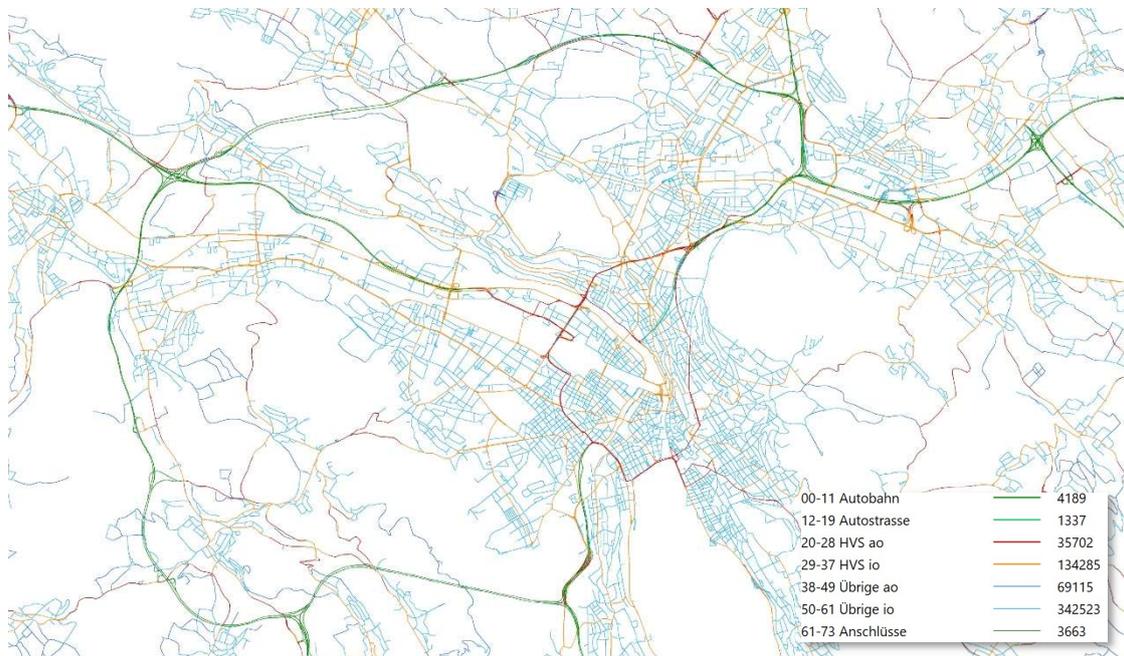
Mit dem NPVM stehen netzbezogene Informationen zur Verfügung, welche es ermöglichen sollten, die gesuchten Zeitkosten auf Basis der CR-Funktionen zu ermitteln:

Daten NPVM		Erläuterung
netz- beschreibende Attribute	Lage	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Strecke (Link) als (sehr) lagegenaues Polygon, geokodiert im LV95 ▪ ein «Link» muss nicht zwingend von Knoten (Kreuzung) zu Knoten gehen, es können zwischen 2 Knoten auch mehrere Links angeordnet sein ▪ ein Link = ein Datensatz
	Länge	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Länge je Link in m
	Kapazität	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Stunden-Kapazität in Personenwagen-Einheiten (PWE) je Richtung
	Typ	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Streckentyp gemäss Liste (insgesamt 74; Details siehe unten)
verkehrs- beschreibende Daten (alle richtungs- getrennt vorhanden)	DWV	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Werktagsbelastung 2017
	DTV	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Durchschnittliche Tagesbelastung 2017 (x365 = Jahresbelastung)
	MSP	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Belastung zur werktäglichen Morgenspitze (7–8) 2017
	ASP	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Belastung zur werktäglichen Abendspitze (17–18) 2017
	Fahrzeuge	<ul style="list-style-type: none"> ▪ alle Belastungen differenziert nach PW, LI, LW, LZ (d.h. LW und LZ sind mit bspw. Faktor 2 in PWE umzurechnen)

Streckentypen

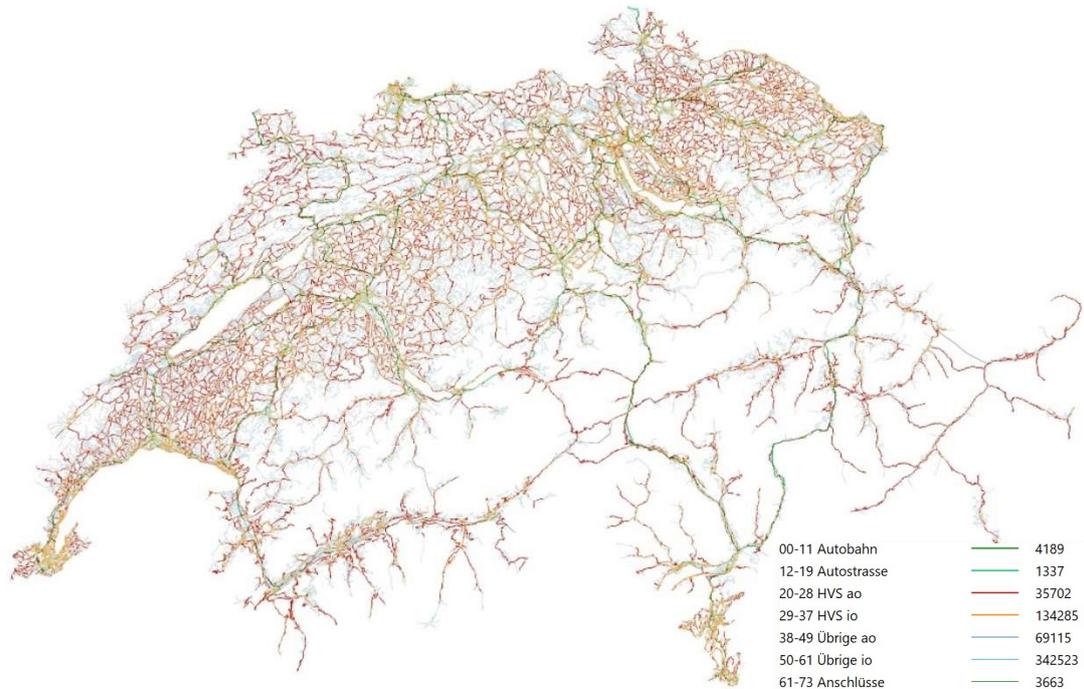
- Im gesamten Datensatz sind ca. 960'000 Strecken (Links) = Datensätze enthalten.
- Davon sind gut 5'000 den Hochleistungsstrassen HLS (Autobahn, autobahnähnlich) zugeordnet, ca. 170'000 Links sind den Hauptverkehrsstrassen HVS zugeordnet (es wird noch unterschieden zwischen innerorts und ausserorts, jedoch hat dies vermutlich eher umlegungstechnischen als tatsächlich geografischen Bezug).
- Beide Typen zusammengenommen dürften für die Betrachtungen zur Kostenermittlung genügen, da die restlichen Strecken dem örtlichen Erschliessungsnetz dienen und kaum von Überlasten betroffen sein sollten (vgl. nachfolgende Abbildungen zum Netz: Strecken Nebennetz in blau).
- Der gesamte netzbeschreibende Datensatz lässt sich aus dem GIS exportieren und je nach Umfang in entsprechenden Programmen bearbeiten (Excel, Access, R). Somit wären auf Basis NPVM im zu berücksichtigenden Hauptnetz ca. 175'000 Datensätze zu bewältigen (wenn die ursprünglich im NPVM separierte Richtungstrennung auf 1 Datensatz je Link, aber mit entsprechend richtungsbezogenen Spalten zusammengefasst wird).

Abbildung 22: Streckentypen im NPVM am Beispiel Region Zürich



Quelle: ARE (NPVM) / Grafik: INFRAS

Abbildung 23: Streckentypen im NPVM im Gesamtnetz Schweiz



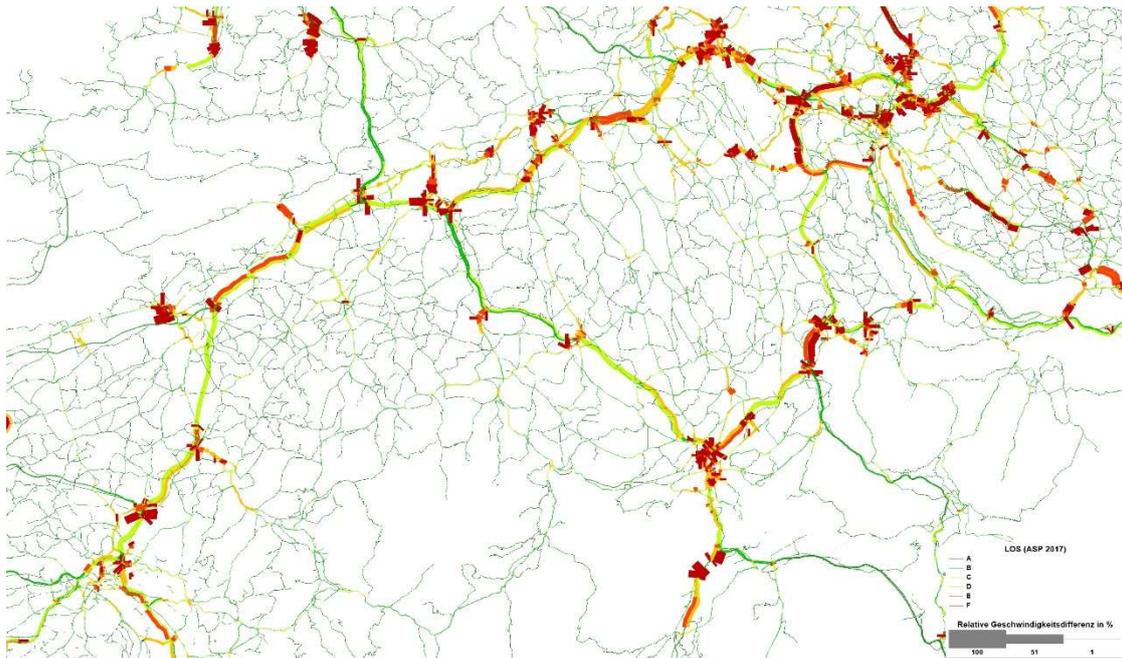
Anmerkung: Das zur Kostenermittlung vorgeschlagene Netz (Typen 0 bis 37 und zzgl. Anschlussstypen 61-73) ist farblich hervorgehoben (grün/rot/gelb), das vermutlich vernachlässigbare Nebennetz ist blau/hellblau dargestellt.
Quelle: ARE (NPVM) / Grafik: INFRAS.

Bezug zu CR-Funktionen:

- Im NPVM werden zum Routing streckentypspezifische CR-Funktionen verwendet.
- Im Bericht zum Modell ist dokumentiert, wie der Bezug zwischen Streckentyp und Funktion (mit jeweiligen Parametern) hergestellt wird.
- Für die oben zur Auswahl empfohlenen Streckentypen sind schlussendlich «nur» 6 Funktionen relevant, wobei immer der gleiche Funktionstyp betroffen ist (BPR-2, vgl. Anhang A3).
- Jeder CR-Funktion – und damit implizit jedem Streckentypen – sind Ausgangsgeschwindigkeiten für das unbelastete Netz zugeordnet (v_0). Somit lässt sich das Netz um ein entsprechendes Attribut v_0 ergänzen; für die HLS-Streckentypen sind im Bericht zum Modell eigene Ausgangsgeschwindigkeiten dokumentiert.
- Aus den Daten zu Kapazität, v_0 und Stundenbelastung (MSP, ASP) lassen sich somit in Verbindung mit der CR-Funktion die Geschwindigkeiten zum belasteten Zustand (richtungsgetreunt) ermitteln (v_{MSP} , v_{ASP}); daraus lassen sich weitere Kenngrößen ableiten (bspw. LOS).

Beispielhaft wurden nun das Hauptnetz um entsprechende CR-Parameter erweitert und die Geschwindigkeit im belasteten Zustand zur Abendspitze v_{ASP} sowie der zugehörige LOS ermittelt. Das Ergebnis sieht schweizweit recht plausibel aus (Abbildung mit Ausschnitt Bern-Zürich):

Abbildung 24: Anwendung CR-Funktion mit Geschwindigkeitsdifferenz (in%) und LOS zur ASP 2017



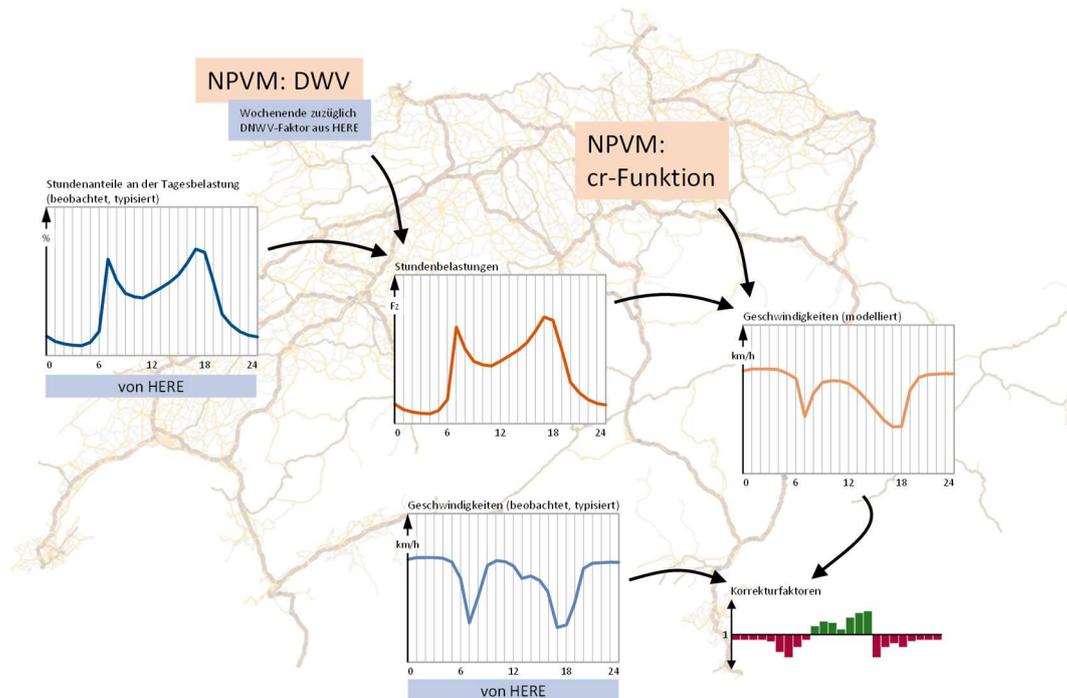
Anmerkung: aus technischen Gründen ist auf nicht fahrbahngetrennten Strecken nur der Maximal-LOS abgetragen (intern liegt er richtungsgetreunt vor).

Quelle: ARE (NPVM), eigene Berechnungen / Grafik: INFRAS.

3.2.3. Beschreibung der Datenanalyse und -aufbereitung

Der hier vorgeschlagene Ansatz zur Ermittlung von streckenbezogenen Fahrzeitverlusten lässt sich verkürzt in einem Satz wie folgt beschreiben: Verknüpfung der im NPVM modellierten Tagesbelastungen (differenzierte Auslastungen) mit typisierten Tagesganglinien und Geschwindigkeitsprofilen aus dem Datensatz HERE (Datensatz 2019). Je Streckenabschnitt und Tagesstunde ist eine CR-Funktion definiert, die Basis der Kostenkurven sind, um die optimale Belastung und daraus den Wohlfahrtsverlust bestimmen zu können (vgl. hierzu auch Kap. 2.2.1.1).

Abbildung 25: Schema zum generellen Ansatz



Grafik INFRAS. Hintergrund: HERE.

- Die im NPVM modellierte «individuelle» richtungsbezogene Tagesbelastung **einer jeden Strecke** wird mit einer auf HERE-Daten basierenden, typisierten und der jeweiligen NPVM-Strecke zugeordneten Tagesganglinie in Stundenbelastungen «zerlegt».
- Mittels NPVM CR-Funktion werden stundenbezogene Geschwindigkeiten – für jede Strecke «individuell» in Abhängigkeit der Stundenbelastungen – ermittelt.
- Aus den HERE-Daten werden – vergleichbare, typisierte Geschwindigkeitsprofile erstellt. Im Vergleich mit den aus dem NPVM ermittelten Geschwindigkeiten (stundengenau gemäss Belastungsverteilung der HERE-Daten) lassen sich für das Analysejahr Korrekturfaktoren für die CR-Funktion ableiten. Bei den Korrekturfaktoren handelt es sich um Faktoren, mit welchen die Geschwindigkeiten gemäss CR-Funktion (aus dem NPVM) multipliziert werden können, sodass man die typisierten Geschwindigkeiten (aus den HERE-Daten) erhält. Sie unterscheiden sich für jedes Streckensegment und jede Stunde.
- Diese Korrekturfaktoren können dann einerseits für jährliche Aktualisierungen auf Basis aktualisierter modellierter Tagesbelastungen verwendet werden. Andererseits liegen damit CR-Funktionen vor, die Basis der Kostenkurven sind.

- Im Vergleich mit der «Free-Flow-Geschwindigkeit» (berechnet aus den HERE Durchschnittsgeschwindigkeiten in der Nacht (0–5 Uhr)) resultieren dann die jeweiligen Verlustzeiten.

Die Analyse der im Datensatz HERE enthaltenen, stundenbezogenen Daten ermöglicht:

- die Ableitung von **Tagesganglinien** (Anteile der Stundenbelastungen) via Anteil der von HERE erfassten Beobachtungen (Fahrzeuge) an der Tagessumme dieser Beobachtungen,
- die Ableitung von **Geschwindigkeitsprofilen** über den Tagesverlauf zur stundenspezifischen Ausprägung der tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeiten (und somit implizit der Fahrzeiten), wobei diese «Profile» resp. deren Stundenwerte via Regression in Abhängigkeit der Typen und der Ausgangsgeschwindigkeiten abgeleitet werden,
- basierend auf den HERE-Daten Anpassung der CR-Funktionen des NPVM je Tagesstunde und Streckenabschnitt (Korrekturfaktoren).

Diese Ableitungen erfolgen typisiert nach:

- Tagestyp (Werktag, Wochenende),
- Strassentyp (Functional Classes von HERE),
- Spitzenstundentyp (Morgen- und Abendspitze, nur Morgen- oder nur Abendspitze, keine Spitzen).

Mit diesem Ansatz wird es ermöglicht

- ohne jährlichen Erwerb des Datensatzes HERE,
- nur auf der Basis aktualisierter Tagesbelastungen¹⁹,
- individuell für jede Strecke (resp. zur Berechnung ausgewählten relevanten Strecken),
- in Abhängigkeit ihrer jeweiligen Tagesbelastungen,
- die jahresspezifischen Verlustzeiten und stundenspezifischen CR-Funktionen als Basis der Kostenkurven zur Herleitung des Wohlfahrtsverlusts zu ermitteln.

Die Anwendung des beschriebenen Vorgehens basiert auf Typisierungen und Hochrechnungen, welche die Realität nicht exakt abbilden, sondern modellieren. Es handelt sich aber um einen pragmatischen Ansatz, der gute statistische Grundlagen für die nächsten fünf Jahre liefert. Vor diesem Hintergrund erscheint eine Aktualisierung der Belastungs- und Geschwindigkeitsprofile alle fünf Jahre sinnvoll.

¹⁹ Liegen aus dem Verkehrsmodell aktualisierte Tagesbelastungen vor, können diese für die Aktualisierung zugrunde gelegt werden. Alternativ können die Tagesbelastungen des NPVM auf Basis der aktuellen Fahrleistungsentwicklung nach Fahrzeug- und Strassenkategorien gemäss Verkehrsflussbericht des ASTRA aktualisiert werden.

Theoretisch wäre es mit dem Datensatz HERE möglich, die tatsächlichen Fahrzeiten (resp. Geschwindigkeiten) jeder Strecke direkt zu verwenden. Sollte auf dieser Basis die Monetarisierung erfolgen, so müsste jedes Jahr der Datensatz HERE beschafft werden. Allerdings fehlen selbst dann die Angaben zur jeweils betroffenen Grundgesamtheit. Eine solche Information liegt netzweit und homogenisiert nur mit dem NPVM vor – wenn auch «nur» modelliert und als Durchschnittswert. Daher wird der oben beschriebene Ansatz mit Einbezug des NPVM und deren durchschnittlichen Tagesbelastungen gewählt.

Ebenso wäre es theoretisch möglich, streckenindividuelle Tagesgänge und Geschwindigkeitsprofile auf Basis des Datensatzes HERE zu verwenden. Dies anstatt typisierter Tagesgänge und Profile. Problematisch wäre dabei jedoch, dass dann streckenspezifische Besonderheiten aus dem Beobachtungsjahr übernommen würden (Sperrungen, Baustellen, Wetter) und dies zu Verzerrungen in den Aktualisierungsjahren führen könnte. Daher fiel die Entscheidung, auf typisierte Ganglinien und Profile abzustellen. Im Rahmen der Studie war es aus Ressourcen Gründen zudem nur möglich die CR-Funktionen des NPVM anzupassen, nicht aber neue CR-Funktionen zu schätzen. Dies müsste separat erfolgen.

3.2.3.1. HERE-Datenanalyse

Mit einer Analyse der HERE-Daten soll das Schweizer Strassennetz (Functional classes 1–4, d.h. ohne Neben- und Quartierstrassen) nach Geschwindigkeitsprofilen typisiert werden. Für die verschiedenen Typen sollen zudem auch Belastungsprofile berechnet werden. Aufgrund der unterschiedlichen Tagesgänge an Werktagen und am Wochenende erfolgte eine getrennte Analyse. Vgl. Tabelle 28 für die Datenstruktur der HERE-Daten. Folgende Schritte wurden durchgeführt und werden im Anschluss erläutert:

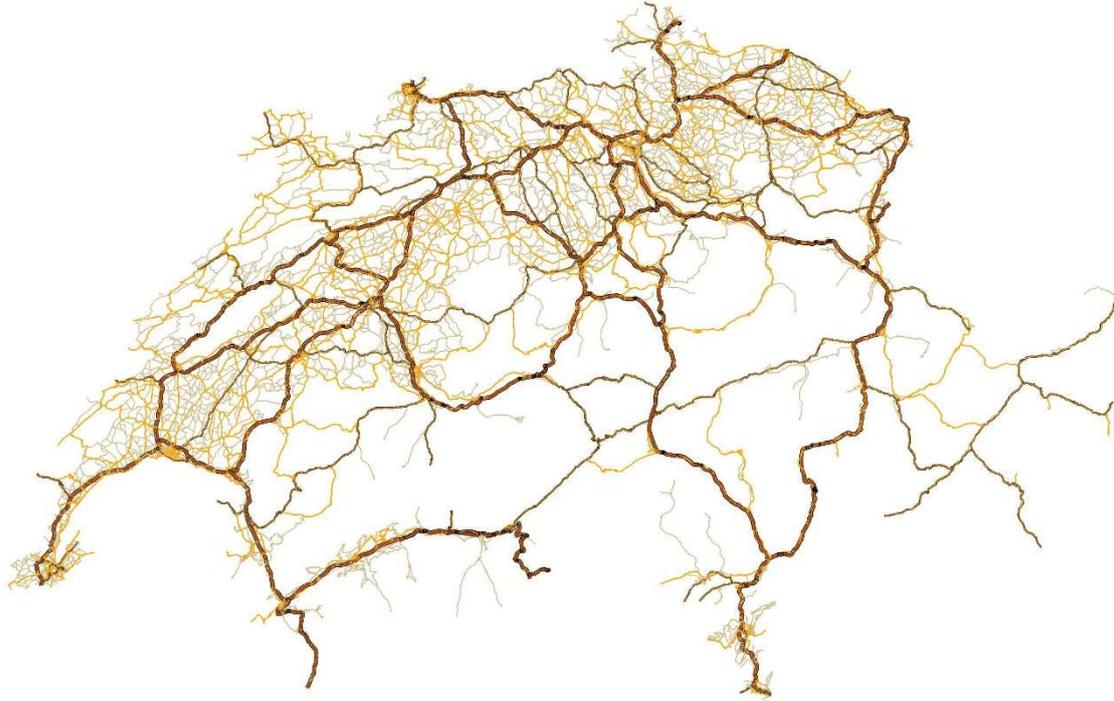
- **Plausibilisierung:** Für ausgewählte Streckensegmente (Streckenabschnitte, richtungsgetreunt) wurden mittels der HERE-Daten Belastungsprofile erstellt, welche mit Zähldaten verglichen wurden. Verwendet wurden Zähldaten der Schweizerischen automatischen Strassenverkehrsählung (SASVZ) sowie der Stadt Zürich. Der Vergleich zeigt eine hohe Übereinstimmung der Belastungen zwischen den HERE-Daten und den Daten von den Zählstellen.
- **Datenaufbereitung:** Die Rohdaten umfassen mehrere Millionen Datensätze, welche die Belastung und Geschwindigkeit auf dem Strassennetz im Jahres- und Tagesgang wiedergeben. Zur Weiterverarbeitung der Daten wurde eine Aggregation vorgenommen, sodass je Streckensegment (richtungsgetreunt) die durchschnittlichen Geschwindigkeiten und Belastungsanteile für Werktage und Wochenende pro Stunde erhalten bleiben.
- **Typenbildung der Strecken:** Für Werktage und Wochenende werden je 12 Typen gebildet. Als Kriterium zur Unterscheidung dienen einerseits die funktionale Klasse definiert in HERE (3 Strassentypen wurden ausgewählt: 1, 2/3 und 4), andererseits die relative Veränderung

der Geschwindigkeit in der Morgen- und Abendspitze im Vergleich zur Geschwindigkeit in der Nacht (4 Typen). Abhängig davon, ob die festgelegten Grenzwerte für einen Geschwindigkeitseinbruch erfüllt sind, werden die Streckensegmente unterschiedlichen Typen zugeordnet. Die Grenzwerte unterscheiden sich nach funktionaler Klasse und Wochentagstyp (Werktag vs. Wochenende).

- **Regressionsanalyse:** Anhand der Typenbildung, der funktionalen Klassen sowie den Geschwindigkeiten in der Nacht können für alle Stunden eines Werktages bzw. eines Wochentages Regressionsmodelle erstellt werden. Die Regressionsmodelle erlauben es, für alle Streckensegmente typische Tagesgänge der Geschwindigkeiten zu berechnen (vgl. hierzu nachfolgende Erläuterungen). Weitere Variablen wie die Anzahl Spuren oder unterschiedliche Raumtypen wurden geprüft, aber aufgrund zu geringer Aussagekraft oder starker Korrelation zu anderen Variablen verworfen.
- **Belastungsprofile:** Anhand der zuvor erfolgten Typisierung können auch relative Belastungsprofile erstellt werden. Dabei wird jeweils der Stundenanteil relativ zur Tagesbelastung berechnet. Auch hier erfolgt eine Unterscheidung nach Werktagen und Wochenende.

Das HERE-Streckennetz ist in fünf funktionale Klassen (FUNC_CLASS) unterteilt, welche die Netzhierarchie darstellen. Für die weiteren Analysen werden die ersten vier Klassen berücksichtigt (siehe Abbildung 26). Die fünfte Klasse umfasst nur kleinere Neben- und Quartierstraßen, auf welchen nicht mit Stauereignissen gerechnet werden muss. Die Zeitverlustkosten werden daher tendenziell eher unter- als überschätzt, was dem At-Least-Ansatz entspricht.

Abbildung 26: HERE-Netz mit den funktionalen Klassen 1–4²⁰



Grafik INFRAS. Quelle: HERE.

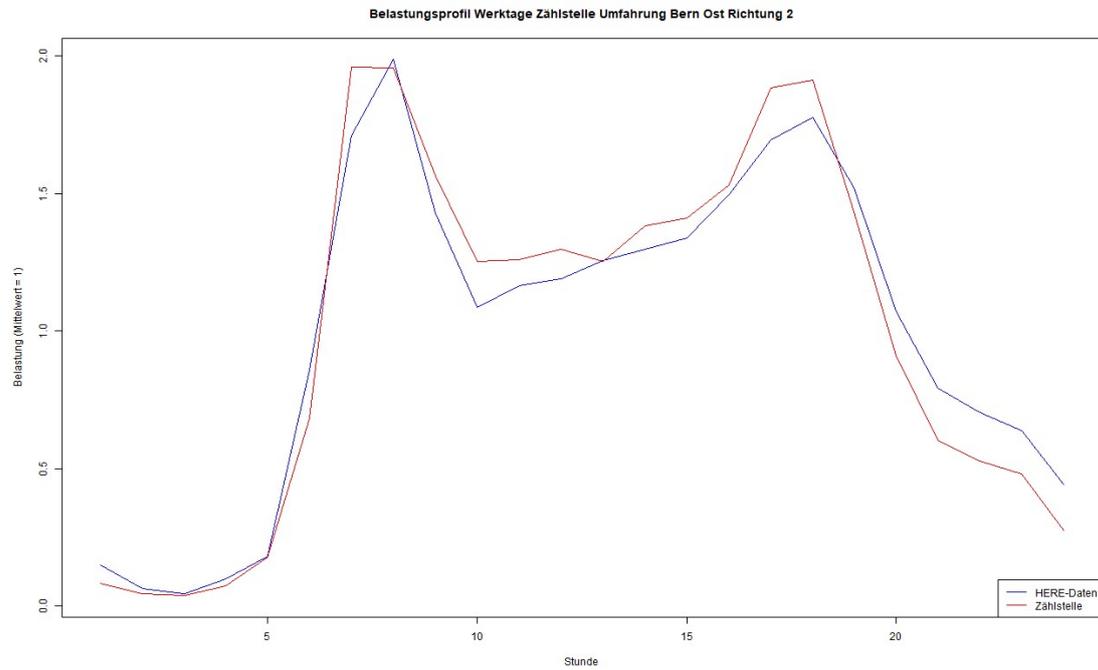
Plausibilisierung: Prüfung der HERE-Daten auf ihre Übereinstimmung mit Zähldaten

Um einen Anhaltspunkt über die Genauigkeit der HERE-Daten zu erhalten, wurden ausgewählte Streckensegmente²¹ mit den Zähldaten von Zählstellen verglichen. Diese Vergleiche anhand ausgewählter Zählstellen der Schweizerischen automatischen Strassenverkehrszählung (SASVZ) sowie der Stadt Zürich zeigen eine gute Übereinstimmung der Tagesgänge der HERE-Daten mit den Zähldaten. **Wichtig:** Die HERE-Daten stellen keine Vollerhebung dar. Üblicherweise fliessen max. 5 % der tatsächlichen Belastung in die Erhebung ein. Dies bedeutet, dass zwar relative Tagesgänge gut abgebildet werden können, jedoch nicht deren absoluten Werte.

²⁰ Hinweis: Das Streckennetz der Klassen 1–4 wird dann auch zur Berechnung der belastungsabhängigen Verlustzeiten **vollumfänglich** berücksichtigt (siehe Verknüpfung HERE mit NPVM in Kap. 3.2.3.2).

²¹ Es handelt sich vorwiegend um Streckensegmente auf Nationalstrassen, für welche auch Zähldaten der SASVZ vorliegen. Ergänzend dazu wurden auch Streckensegmente in der Stadt Zürich analysiert, für welche ebenfalls stundengenaue Zähldaten vorliegen.

Abbildung 27: Beispielhafter Tagesgang der HERE-Daten (blau) im Vergleich mit den Zähldaten (rot)



Grafik INFRAS. Quelle: HERE, SASVZ.

Datenaufbereitung

Um die grosse Datenmenge zu bearbeiten, wurden die Rohdaten (Stundendaten pro Tag und Streckensegment) in einem ersten Schritt quartalsweise aufbereitet. Dabei wurden die Daten um nicht relevante Informationen reduziert, um die Handhabung zu vereinfachen und in einem zweiten Schritt die Quartalsdaten in gemeinsame Dateien zusammengefügt. Schliesslich wurden die Datensätze um den Wochentag sowie den Wochentagtyp (Werktag, Wochenendtag, Feiertag) ergänzt.

In einem nächsten Schritt wurden die 45 Teildateien aggregiert, sodass nur noch die relevanten Informationen für die späteren Analysen enthalten sind. Für jedes richtungsbezogene Streckensegment werden die Informationen auf eine Datenzeile reduziert. Diese Datenzeile enthält die folgenden Informationen:

- eindeutige, richtungsbezogene Segment-ID
- funktionale Klasse
- Länge
- Anzahl Spuren
- Geschwindigkeitskategorie

- Höchstgeschwindigkeit
- Free-Flow-Geschwindigkeit
- Durchschnittsgeschwindigkeit DTV
- Durchschnittsgeschwindigkeit Werkzeuge je Stunde (0–24 Uhr)
- Durchschnittsgeschwindigkeit Wochenende je Stunde (0–24 Uhr)

In einem zweiten Schritt wurde in analoger Weise auch eine Aggregation²² der Belastungsdaten (Beobachtungen von HERE) vorgenommen. Beide Aggregationen dienen im weiteren Verlauf als Ausgangsdateien für die Analyse.

Typenbildung der Tagesgänge an Werktagen

Ziel der Analyse ist es, das Streckennetz (funktionale Klassen 1–4) in verschiedene Typen zu unterteilen, welche die verschiedenen Geschwindigkeitsprofile im Tagesgang bestmöglich abdecken. Die Zahl der Typen soll dabei möglichst gering ausfallen. Um die Streckensegmente zu typisieren, wurden verschiedene Variablen in Regressionsanalysen untersucht. Die Analysen zeigten, dass die Differenzierung nach funktionaler Klasse und Geschwindigkeitseinbrüchen in den Morgen- und Abendstunden einen pragmatischen Ansatz darstellen, das Streckennetz zu typisieren.

Bei der funktionalen Klasse wird nach den Klassen 1, 2/3 und 4 unterschieden. Da die Klassen 2 und 3 zu sehr ähnlichen Ergebnissen führen, wurden diese beiden Klassen zusammengefasst.

Die Geschwindigkeitseinbrüche in den Morgen- und Abendstunden wurden anhand der Differenzen zwischen der MSP (7–8 Uhr) bzw. der ASP (17–18 Uhr) und der Durchschnittsgeschwindigkeit in der Nacht (DWV 0–5 Uhr) berechnet. In Abhängigkeit der funktionalen Klasse wurden folgende Grenzwerte als Geschwindigkeitseinbruch definiert:

Tabelle 29: Grenzwerte Geschwindigkeitseinbrüche an Werktagen in Morgen- und Abendspitze

FUNC_CLASS (Streckentyp HERE)	Geschwindigkeitseinbruch
1	> 20%
2/3	> 25%
4	> 33%

Tabelle INFRAS.

Die Bildung der Grenzwerte basiert auf der Analyse der Verteilung der Einbrüche über alle Segmente je funktionaler Klasse sowie einer räumlichen Analyse. Geprüft, aber verworfen, wurden

²² Die Daten von Feiertagen (1. Januar, Karfreitag, Ostermontag, Auffahrt, Pfingstmontag, Bundesfeiertag, Weihnachten und Stephanstag) wurden bei der Aggregation nicht berücksichtigt.

auch absolute (in km/h) oder prozentuale Grenzwerte, die über alle funktionalen Klassen identisch sind. Anhand der Geschwindigkeitseinbrüche wurden je funktionaler Klasse vier Geschwindigkeitseinbruch-Typen (Spitzenstudentypen) gebildet:

- Typ 1: Geschwindigkeitseinbrüche am Morgen und Abend (TrueTrue)
- Typ 2: Geschwindigkeitseinbruch am Morgen (TrueFalse)
- Typ 3: Geschwindigkeitseinbruch am Abend (FalseTrue)
- Typ 4: kein Geschwindigkeitseinbruch (FalseFalse)

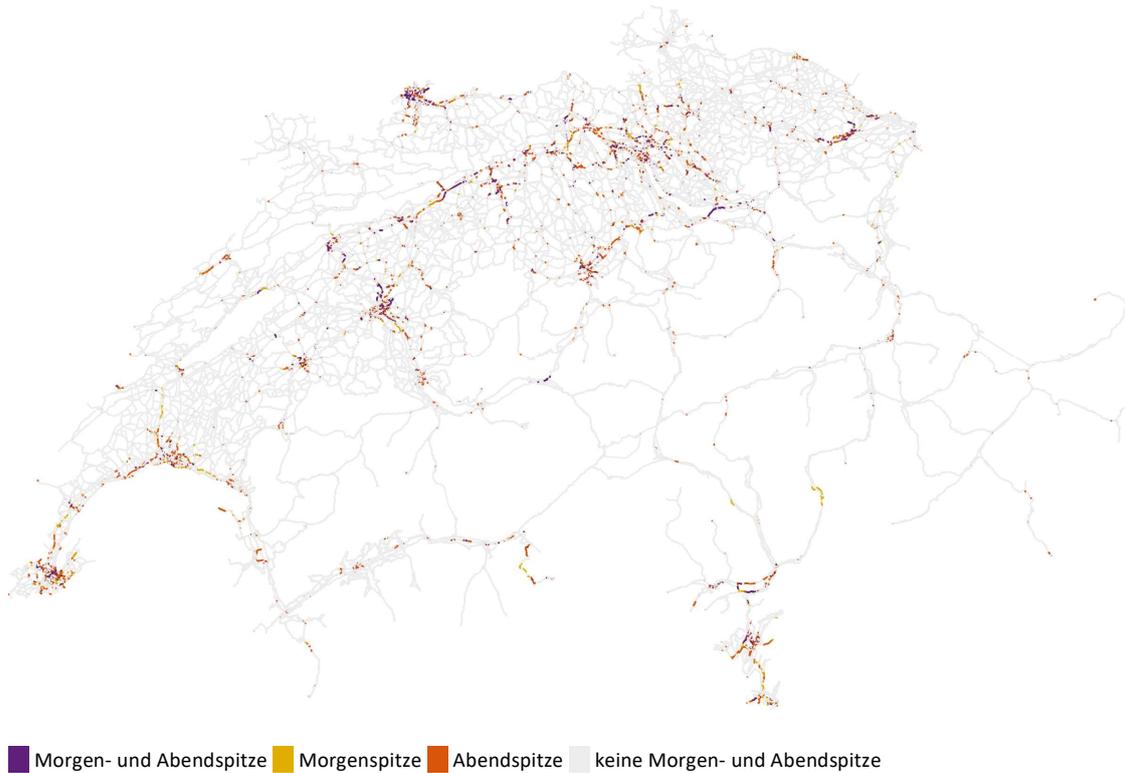
Daraus resultieren folglich in Kombination mit den 3 Functional Classes insgesamt 12 Typen zur Unterscheidung der Geschwindigkeitsprofile an Werktagen, welche durch die Variablen Nachtgeschwindigkeit, funktionale Klasse und dem Zeitpunkt der Geschwindigkeitseinbrüche (Typen 1–4) gebildet werden.

Für die weitere Anwendung wurden 72 Regressionsmodelle (jeweils für jede Stunde und funktionale Klasse ein eigenes Modell; d.h. 24x3) gebildet, mit welchen die stundengenauen Geschwindigkeiten in Abhängigkeit der Nachtgeschwindigkeit und dem Zeitpunkt der Geschwindigkeitseinbrüche modelliert werden können. Um die unterschiedliche Länge der Streckensegmente angemessen zu berücksichtigen, wurden die Beobachtungen (d.h. Streckensegmente nach Functional class und Stunde) jeweils mit deren Länge gewichtet. Während der Analyse wurden weitere Variablen geprüft, aber aufgrund zu geringer Aussagekraft, besseren Alternativen oder starker Korrelation zwischen den Variablen verworfen:

- Durchschnittsgeschwindigkeit DTV
- Free-Flow-Geschwindigkeit
- Anzahl Spuren
- Raumgliederungen (Agglomerationskern, Agglomerationsgürtel und übrige Gemeinden)

Abbildung 28 zeigt das Ergebnis der Typisierung der Strecken nach den Geschwindigkeitseinbruch- bzw. Spitzenstudentypen an Werktagen. Die abgebildeten Strecken schränken die Ableitung von Verlustzeiten nicht ein. Diese Strecken dienen «nur» der Typisierung von Tagesgang und Geschwindigkeitsprofilen werktags. Das Bild zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit den Erfahrungs- resp. Erwartungswerten hinsichtlich der werktags, also im Alltagsverkehr, von potenziellen Verlustzeiten betroffenen Strecken.

Abbildung 28: Typisierung der Strecken nach Morgen- und Abendspitze an Werktagen



Grafik INFRAS.

Typenbildung der Tagesgänge am Wochenende

Die Typenbildung am Wochenende unterscheidet sich von der Herangehensweise nicht von derjenigen an Werktagen. Da die Spitzen am Wochenende jedoch zeitlich variabler sind, wurden nicht die MSP und ASP berücksichtigt. Stattdessen wurde jeweils die tiefste Durchschnittsgeschwindigkeit einer Stunde zwischen 6 und 12 Uhr zur Berechnung des Geschwindigkeitseinbruchs am Morgen verwendet. Analog wurde für die Berechnung des Geschwindigkeitseinbruchs am Nachmittag die tiefste Durchschnittsgeschwindigkeit zwischen 12 und 19 Uhr verwendet. Da die Geschwindigkeitseinbrüche am Wochenende volatiler sind als an Werktagen wurden die Grenzwerte nach entsprechenden Analysen angepasst:

Tabelle 30: Grenzwerte Geschwindigkeitseinbrüche am Wochenende (vor-/nachmittags)

FUNC_CLASS	Geschwindigkeitseinbruch
1	> 15%
2/3	> 25%
4	> 35%

Tabelle INFRAS.

Abbildung 29: Typisierung der Strecken nach Vormittags- und Nachmittagsspitze an Wochenenden



■ Vormittags- und Nachmittagsspitze
 ■ Vormittagsspitze
 ■ Nachmittagsspitze
 ■ keine Vormittags- und Nachmittagsspitze

Grafik INFRAS.

Regressionsanalyse

Um die Geschwindigkeitsprofile der verschiedenen Typen flexibel anwenden zu können, werden Regressionsmodelle eingesetzt. Die Modelle sind jeweils je Stunde und funktionaler Klasse wie folgt definiert:

$$v = \beta_0 + \beta_1 v_{Nacht} + \beta_2 Typ_{TT} + \beta_3 Typ_{TF} + \beta_4 Typ_{FT} + E$$

v Geschwindigkeit (Zielvariable)

β_i Regressionskoeffizienten

v_{Nacht} Nachtgeschwindigkeit (Werktage 0–5 Uhr)

$Typ_{j,k}$ Typ der Geschwindigkeitsbrüche (j : Morgenspitze, k : Abendspitze); jeweils zutreffender Variable = 1, übrige Variablen = 0

E Fehlerterm der OLS-Regression ($E \sim IID N(0, \sigma^2)$)

Für jede Stunde, funktionale Klasse und Wochentagstyp wird jeweils ein eigenes Regressionsmodell angewendet. Es sind also für die Werktage und die Wochenenden je 72 Modelle.

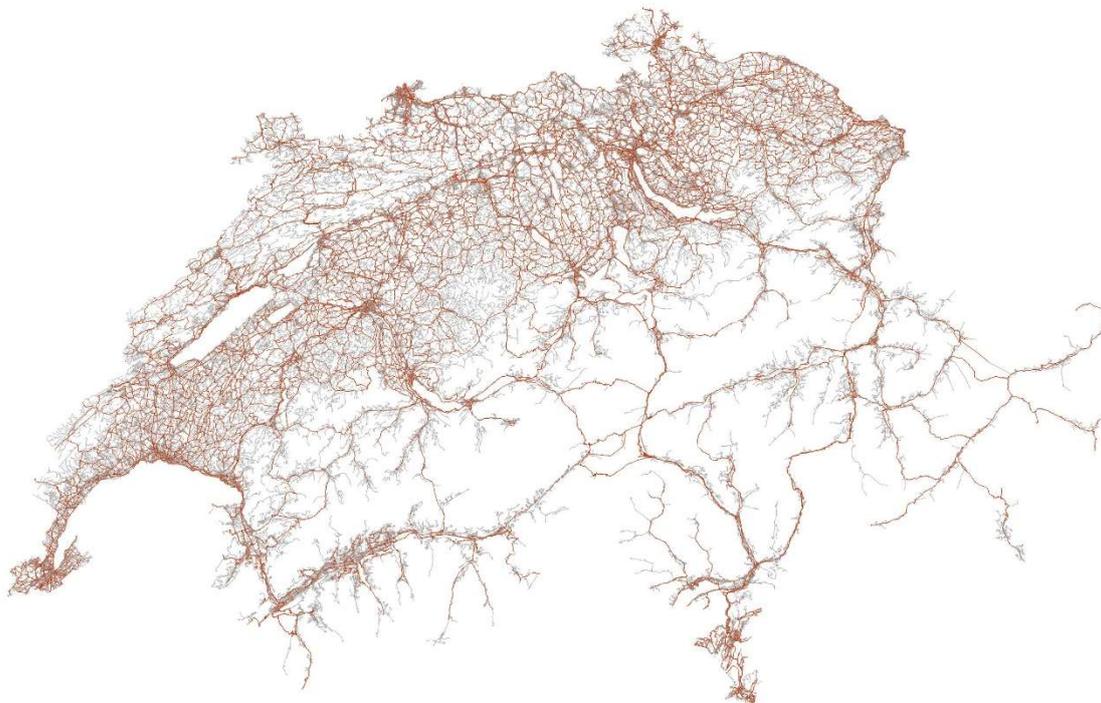
Belastungsprofile für Werktage und Wochenende

Gestützt auf den je 12 Typen für Werktage und Wochenende (4 Typen gemäss Geschwindigkeitseinbruch und 3 funktionale Klassen) wurden die relativen Belastungen der HERE-Daten im Tagesgang je Typ ebenfalls aggregiert. Auch hier wurde eine Gewichtung nach Segmentlänge vorgenommen.

3.2.3.2. Verknüpfung HERE mit den NPVM-Daten

Die Typenbildung aus den HERE-Daten soll nun auf die NPVM-Daten übertragen werden. Dazu wurde eine Schlüsseltabelle erstellt, welche den NPVM-Strecken die Strecken der HERE-Daten (d.h. ohne Neben- und Quartierstrassen) zuweist. Somit lässt sich jeder NPVM-Strecke der Typ des Tagesgangs und des Geschwindigkeitsprofils aus HERE zuordnen.

Abbildung 30: NPVM-Strecken mit Verknüpfungen (eingefärbt) zum HERE-Netz



Grafik INFRAS. Quelle: ARE NPVM.

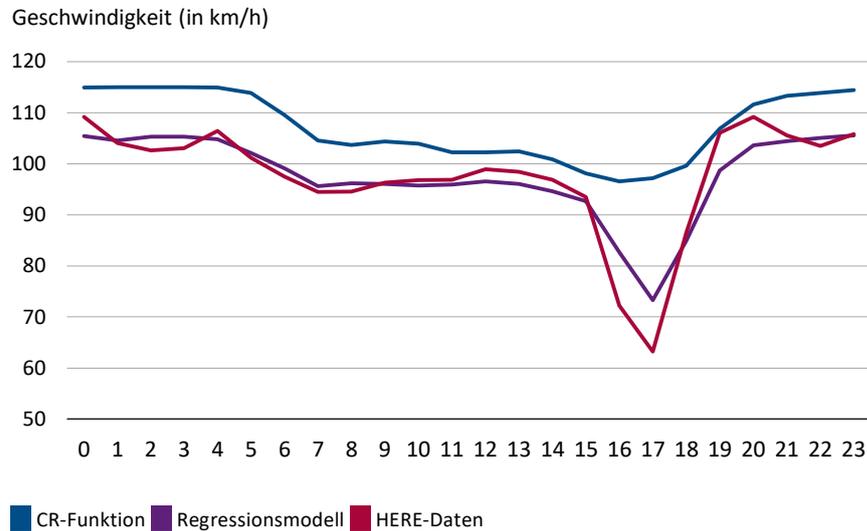
Wie im generellen Ansatz beschrieben, kann in einem ersten Schritt der DWV des NPVM (Tageswert) mittels stundengenauer Belastungsprofile der HERE-Daten über den Tag verteilt werden. Um die stundengenauen Belastungsprofile am Wochenende zu erhalten, wird der durchschnittliche Nicht-Wochentag-Verkehr (DNWV) ebenfalls über den Tag verteilt. Zur Schätzung des DNWV wurden mit dem Verhältnis der Belastungen an einem virtuellen Werktag und einem Wochenendtag streckenspezifische Umrechnungsfaktoren ermittelt, welche mit dem DWV multipliziert werden können und auf den HERE-Daten basieren.²³

Ausgehend von diesen aus dem NPVM und den HERE-Daten abgeleiteten Stundenbelastungen wird mittels CR-Funktionen (vgl. Anhang A3 für eine Übersicht der CR-Funktionen im NPVM) die Geschwindigkeit im Tagesgang berechnet. Gleichzeitig wird die Geschwindigkeit auch mittels Regressionsmodell auf Basis der HERE-Daten berechnet (Geschwindigkeitsprofil). Um die beiden Profile aufeinander abzustimmen, wird ein stunden- und streckenabschnitt spezifischer Korrekturfaktor berechnet, mit welchem das Geschwindigkeitsprofil der CR-Funktion multipliziert wird. Diese Korrekturfaktoren können für Aktualisierungen in den nächsten Jahren verwendet werden – bis sie allenfalls auf Basis eines neuen Datensatzes HERE und entsprechenden Analysen aktualisiert werden. Wir gehen davon aus, dass eine Aktualisierung nach fünf Jahren sinnvoll ist.

Mit den Korrekturfaktoren können aus den CR-Geschwindigkeiten nur die typisierten Geschwindigkeiten berechnet werden. Es wird bewusst darauf verzichtet, dass mittels den Korrekturfaktoren die effektiven Geschwindigkeiten berechnet werden können. Damit kann verhindert werden, dass streckenspezifische Besonderheiten für das Jahr 2019 (z. B. Baustellen) bei einer Aktualisierung zu Verzerrungen führen.

²³ Eine Analyse der berechneten Umrechnungsfaktoren zeigte, dass 125 Streckensegmente eine Spitzenbelastung von >110% der Kapazität aufwiesen. Die Umrechnungsfaktoren dieser Streckensegmente wurden korrigiert. Der Wert 110% (und nicht etwa 100%) wird gewählt, um geringe Überschreitungen der theoretischen Kapazität zuzulassen.

Abbildung 31: Vergleich der Geschwindigkeitsprofile anhand eines Beispielabschnitts (A2, Muttenz, Richtung Osten)



Grafik INFRAS.

Dieses Vorgehen ermöglicht einerseits eine Aktualisierung der Berechnungen in den Folgejahren, indem nur der DWV der verschiedenen Streckensegmente angepasst werden muss. Andererseits bilden die angepassten CR-Funktionen die Basis der Kostenkurven zur Herleitung des Wohlfahrtsverlusts.

Die DWV aus dem NPVM für das Jahr 2017 werden auf Basis der Fahrleistungen auf das Jahr 2019 hochgerechnet, da für 2019 zum Zeitpunkt der Erarbeitung der Studie das NPVM nur für 2017 zur Verfügung stand (Tabelle 31). Der DWV je Strecke wird auf Basis der Stundenanteile der HERE-Daten auf die einzelnen Stunden (0–24) «zerlegt» (vgl. hierzu auch Kap. 3.2.3). Diese Aufteilung wird für Aktualisierungen konstant belassen.

Tabelle 31: Fahrleistungen nach Fahrzeug- und Strassenkategorien

	2017	2018	2019	2017–2019
	Fahrleistung (Mio. Fzkm)			Veränderung %
Nationalstrassen (= HERE functional class 1)				
Total	27'680	27'696	27'799	0.4%
Personenwagen	23'177	23'010	22'957	-0.9%
Schwere Nutzfahrzeuge	1'591	1'598	1'649	3.6%
Leichte Nutzfahrzeuge	2'913	3'089	3'193	9.6%
National-, Kantons-, Gemeindestrassen				
Total	67'513	68'297	68'937	2.1%
PV Total	60'879	61'529	62'043	1.9%
GV: SNF	2'242	2'238	2'226	-0.7%
GV: LNF	4'392	4'530	4'668	6.3%
Nicht-Autobahnen (= HERE functional class 2–4)				
Total	39'833	40'601	41'138	3.3%
PV Total	37'703	38'519	39'086	3.7%
GV: SNF	651	641	577	-11.4%
GV: LNF	1'479	1'441	1'475	-0.3%

LNF: leichte Nutzfahrzeuge, SNF: Schwere Nutzfahrzeuge.

Tabelle INFRAS. Quelle: ASTRA 2020.

Die Belastungen je Streckenabschnitt aus dem NPVM liegen für das Jahr 2017 und differenziert nach den Fahrzeugkategorien (Personenwagen, Lieferwagen, Lastwagen und Lastzüge) vor. Hieraus liessen sich die Personenwageneinheiten PWE (1 leichter Motorwagen = 1 PW bzw. 1 schwerer Motorwagen = 2 PW) herleiten. Die Belastungen nach Fahrzeugkategorien für den DWV wurden für die DNWV auf Basis einer Auswertung der Strassenverkehrszählungen des ASTRA angepasst:

- Autobahnen (HERE functional class 1): durchschnittlicher SNF-Anteil von 6.4% werktags reduziert sich am Wochenende auf 1.4%
- Nicht-Autobahnen (HERE functional class 2–4): durchschnittlicher SNF-Anteil von 4.2% werktags reduziert sich am Wochenende auf 0.7%
- Alle Strassen: durchschnittlicher SNF-Anteil von 6.3% werktags reduziert sich am Wochenende auf 1.4%

Plausibilisierung der Reisezeitverluste

Um die Typisierung zu plausibilisieren, wurde eine Berechnung der Reisezeitverluste je Functional Class und Typ des Geschwindigkeitseinbruchs (Morgen-/Abend-Spitze) in zwei Varianten

vorgenommen: Einerseits wurden die beobachteten Reisezeitverluste, basierend auf der stundengenauen Durchschnittsgeschwindigkeit gemäss HERE-Daten und Belastung gemäss NPVM (DWV) und den HERE-Daten (Anteil Belastung pro Tagesstunde) berechnet. Andererseits wurde die Berechnung der Reisezeitverluste auch anhand der typisierten Durchschnittsgeschwindigkeit und Belastung vorgenommen. Es wurden Reisezeitverluste (pro Werktag – siehe Tabelle 21 bzw. Wochenendtag – siehe Tabelle 22) berechnet.

Tabelle 32: Reisezeitverluste in Fahrzeugstunden pro Tag nach functional class und Spitzenstundentyp (Morgen-/Abendspitze) an Werktagen

FUNC_CLASS	Spitzenstundentyp	Verluste HERE-Daten	Verluste Typisierung	Relative Abweichung	Absolute Abweichung
1	TRUETRUE	7'805	8'016	+2.7%	+211
1	TRUEFALSE	5'569	5'543	-0.5%	-26
1	FALSETRUE	12'562	12'442	-1.0%	-121
1	FALSEFALSE	27'004	25'835	-4.3%	-1'168
2	TRUETRUE	42'751	43'804	+2.5%	+1'053
2	TRUEFALSE	7'398	7'193	-2.8%	-205
2	FALSETRUE	34'394	35'875	+4.3%	+1'481
2	FALSEFALSE	61'515	54'190	-11.9%	-7'325
4	TRUETRUE	5'089	5'560	+9.2%	+471
4	TRUEFALSE	993	1'040	+4.7%	+47
4	FALSETRUE	8'712	9'372	+7.6%	+660
4	FALSEFALSE	40'072	36'047	-10.0%	-4'025
Summe		253'865	244'918	-3.5%	-8'947

TrueTrue: Morgen- und Abendspitze

TrueFalse: Morgenspitze, keine Abendspitze

FalseTrue: keine Morgen, aber Abendspitze

FalseFalse: keine Morgen- und Abendspitze

Tabelle INFRAS.

Tabelle 33: Reisezeitverluste in Fahrzeugstunden pro Tag nach Typen an Wochenenden

FUNC_CLASS	Spitzen	Verluste HERE-Daten	Verluste Typisierung	Relative Abweichung	Absolute Abweichung
1	TRUETRUE	2'451	2'677	+9.2%	+225
1	TRUEFALSE	95	96	+1.0%	+1
1	FALSETRUE	2'158	2'183	+1.1%	+25
1	FALSEFALSE	898	-418	-146.5%	-1'317
2	TRUETRUE	9'954	11'297	+13.5%	+1'342
2	TRUEFALSE	840	944	+12.4%	+104
2	FALSETRUE	5'200	5'978	+14.9%	+777
2	FALSEFALSE	35'839	34'704	-3.2%	-1'135
4	TRUETRUE	1'389	1'657	+19.3%	+268
4	TRUEFALSE	115	124	+7.3%	+8
4	FALSETRUE	893	1'116	+25.0%	+223
4	FALSEFALSE	22'423	24'477	+9.2%	+2'053
Summe		82'258	84'835	+3.1%	+2'577

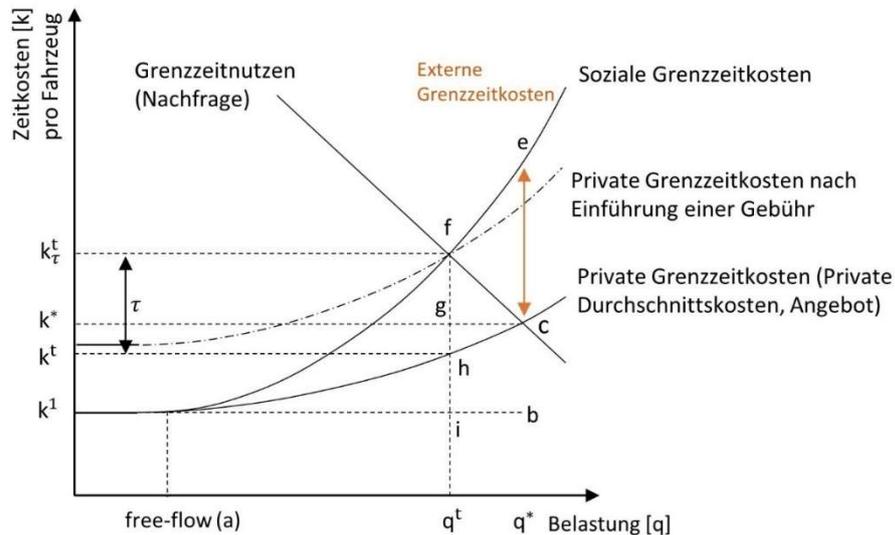
Tabelle INFRAS.

Der Vergleich der Reisezeitverluste zeigt zwischen den typisierten Berechnungen und den originalen HERE-Daten nur geringe Differenzen von -3.5% an Werktagen bzw. +3.1% am Wochenende. Demnach stellt die Typisierung einen geeigneten Ansatz dar, mit welchem ein Grossteil der tatsächlichen Reisezeitverluste abgebildet werden können. Dies entspricht dem At-Least-Ansatz, d.h. die Verlustzeiten werden tendenziell eher unter- als überschätzt. Die Typisierung ermöglicht zudem eine Glättung von einzelnen Ereignissen wie beispielsweise Geschwindigkeitsreduktionen aufgrund von Regen, die nicht auf eine Überlastung zurückzuführen sind.

3.2.4. Vorgehen zur Ermittlung der volkswirtschaftlichen Kosten

Die Zeitverlustkosten werden basierend auf den vorangegangenen beschriebenen Daten einerseits gesamthaft ermittelt. Andererseits werden die sozialen Grenzzeitkosten, die optimale Belastung (und damit Geschwindigkeit) und darauf basierend der Wohlfahrtsverlust geschätzt.

Abbildung 32: Marktgleichgewicht und volkswirtschaftliches Optimum auf der Strasse



Grafik INFRAS. Quelle: angelehnt an Gerike (2018).

Gesamte Zeitverlustkosten gegenüber Free-Flow-Geschwindigkeit

Zur Ermittlung der gesamten Zeitverluste (Fahrzeugstunden) wird der Zeitbedarf bei der jeweiligen Belastung und der Zeitbedarf bei einer zu definierenden Free-Flow-Geschwindigkeit v_0 ermittelt:

$$T = q^* \cdot (t^* - t^1)$$

t^1 = Zeitbedarf pro Streckenabschnitt bei v_0

$$= (1/v_0) \cdot \text{Streckenabschnittslänge}$$

t^* = Zeitbedarf pro Streckenabschnitt bei Belastung q^*

Auf Basis der DWV je Fahrzeugkategorie (PW, Lieferwagen, LW+LZ) aus dem NPVM werden die Stundenbelastungen auf die Kategorien aufgeteilt. Anschliessend werden die täglichen Zeitverluste mit den Anteilen am DWV der jeweiligen Fahrzeugkategorie multipliziert. Dieser pragmatische Ansatz ist notwendig, da aus den HERE-Daten keine Belastungen je Fahrzeugkategorie vorliegen. Die Zeitverluste werden jeweils für einen DWV und einen DNWV geschätzt. Um die täglichen Zeitverluste auf jährliche Zeiten hochzurechnen, werden die Wochentags-Zeitverluste mit 253 und die Wochenenden-Zeitverluste mit 104 multipliziert. Gesetzliche nationale Feiertage werden mit diesem Vorgehen nicht berücksichtigt. Dies entspricht dem At-least-Ansatz.

Um die Zeitverluste zu monetarisieren, werden die Fahrzeugstunden mit dem jeweiligen Zeitkostensatz (differenziert nach Fahrzeugkategorien) analog den Kostensätzen zur Herleitung der Stauzeitkosten nach Verkehrsart (vgl. Kap. 3.1) multipliziert. Diese liegen für PW, LI und

schwere Nutzfahrzeuge (LW+LZ und Cars) vor. Es wurden folgende Kostensätze (CHF pro Fahrzeugstunde) für das Jahr 2019 verwendet: 42.5 CHF/h für PW-Fahrten, 40 CHF/h für LI-Fahrten, 68.2 CHF/h für SNF-Fahrten. Die Herleitung dieser Kostensätze ist in Kap. 3.1 beschrieben.

Da das NPVM keine jährlichen Daten zur Belastung auf den Strecken liefert, werden die streckenspezifischen DWV und DNWV auf Basis der Veränderung der Fahrleistung jährlich hochgerechnet (vgl. hierzu die Erläuterungen in Kap. 3.2.3.2). Für den DNWV wird dabei berücksichtigt, dass der Anteil des Schwerverkehrs an der Fahrleistung am Wochenende niedriger ist als an Werktagen.

Bestimmung der sozialen Grenzzeitkosten

Die sozialen Grenzzeitkosten, die ein Fahrzeug in einer Stausituation zu tragen hat, sind die Summe der privaten Kosten im Free-Flow und der Kosten, die vom Grenzfahrzeug abhängen, das in den Verkehrsfluss eintritt. Mit den sozialen Grenzzeitkosten werden die Kosten, die ein Fahrzeug erfährt, wenn ein Grenzfahrzeug in den Verkehrsfluss eintritt, berechnet (Tabelle 44 und Tabelle 45).

Die Grenzzeiten, die ein Fahrzeug zu tragen hat, wenn ein zusätzliches Fahrzeug dazu kommt, werden pro Streckenabschnitt und Stunde berechnet:

$$\text{Soziale Grenzzeiten getragen} = t_1 + t_1 \cdot \frac{\alpha \cdot \beta}{c^\beta} q^{*(\beta-1)}$$

$$\beta = \beta_1 \text{ wenn } q < c \text{ und } \beta = \beta_2 \text{ wenn } q \geq c$$

wobei

q: Belastung der Strecke

c: Kapazität der Strecke

α, β : Parameter

t_1 : Fahrzeit auf unbelasteter Strecke (freier Verkehrsfluss)

Die Grenzzeiten, die ein zusätzliches Fahrzeug für sich selbst und für alle anderen Fahrzeuge im Verkehrsfluss verursacht, werden ebenfalls pro Streckenabschnitt und Stunde berechnet (vgl. Tabelle 44 und Tabelle 46):

$$\text{Soziale Grenzzeiten verursacht} = t_1 + q^* \cdot t_1 \cdot \frac{\alpha \cdot \beta}{c^\beta} q^{*(\beta-1)}$$

$$\beta = \beta_1 \text{ wenn } q < c \text{ und } \beta = \beta_2 \text{ wenn } q \geq c$$

wobei

q: Belastung der Strecke

c: Kapazität der Strecke

α, β : Parameter

t_1 : Fahrzeit auf unbelasteter Strecke (freier Verkehrsfluss)

Anschliessend werden die verursachten und getragenen Grenzzeiten pro Stunde und Strecke der jeweiligen Fahrzeugkategorie ermittelt und mit den entsprechenden Kostensätzen der jeweiligen Fahrzeugkategorie monetarisiert. Um die Grenzzeitkosten eines zusätzlichen Fahrzeugs verursacht und getragen pro Fahrzeugkategorie zu erhalten, werden die Grenzzeiten mit den Anteilen der Fahrzeugkategorien multipliziert und mit den jeweiligen Kostensätzen monetarisiert. Anschliessend werden die Grenzzeitkosten durch die jeweilige Fahrleistung geteilt (analog durchschnittliche Zeitverlustkosten), um die durchschnittlichen Grenzzeitkosten pro Fahrzeugkilometer zu erhalten (vgl. Tabelle 44).

Um die gesamten externen Grenzzeitkosten zu bestimmen, werden die Flächen unter der Grenzzeitkostenfunktion und der Durchschnittskostenfunktion (vgl. Abbildung 32) anhand eines Integrals berechnet. Die Differenz der beiden Flächen entspricht den gesamten externen Grenzzeitkosten.

Bestimmung der optimalen Auslastung

Nach dem aktuellen Stand der Wissenschaft wird das Gleichgewicht (Punkt f in Abbildung 32) anhand eines iterativen Verfahrens geschätzt (van Essen et al. 2019, Beckers 2004). Aufgrund dessen wurde vorliegend auch dieses Vorgehen gewählt. Das Ausgangsgleichgewicht pro Strecke liegt auf Punkt c, wo das Verkehrsangebot der Nachfrage entspricht. Die Berücksichtigung der sozialen Grenzzeitkosten geht mit einer Kostenerhöhung (von Punkt c auf Punkt u) und mit einem Rückgang der Nachfrage (Punkt v) einher (vgl. Abbildung 33). Bei einer elastischen Nachfrage fällt dieser Rückgang grösser aus als bei einer unelastischen Nachfrage. Die sozialen Grenzzeitkosten sinken jedoch mit der tieferen Nachfrage ebenfalls (Punkt w), was die Belastung wiederum erhöht (Punkt x). Die steigende Belastung hat wiederum eine Verschlechterung der Verkehrssituation zur Folge und führt zu einem erneuten Rückgang der Nachfrage. Das Gleichgewicht wird erreicht, wenn die Steigung der sozialen Grenzzeitkosten flacher ist als die der Nachfragefunktion. Diese Situation tritt einerseits in leicht überlasteten Netzen mit einem flachen Anstieg der Zeitkosten und andererseits bei einer angenommenen geringen Gesamtkostenelastizität der Nachfrage ein. Es wird eine optimale Belastung pro Streckenabschnitt jeweils für tiefe und für hohe Elastizitäten der Nachfrage ermittelt, wobei für die folgenden Berechnungen die optimale Auslastung bei einer tiefen Elastizität zugrunde gelegt wurde

Eine Elastizität gibt an, wie sich die Veränderung einer Einflussvariable auf eine abhängige Variable auswirkt. Beispielsweise bedeutet eine Preiselastizität von -0.3, dass die Nachfrage um 3% zurückgeht, wenn der Preis um 10% steigt. Je höher die Preiselastizität, desto stärker reagiert die Nachfrage auf den geänderten Preis. Die Elastizitäten hängen stark von den jeweiligen Nachfragesituationen und den vorhandenen Alternativen ab. Die Nachfrage ausserhalb von

Spitzenstunden reagiert auf Preisänderungen stärker als jene Fahrten während Spitzenstunden. Im Güterverkehr variieren die Preiselastizitäten insbesondere nach Art der transportierten Güter. Tabelle 34 zeigt eine Übersicht zu Nachfrageelastizitäten für den Personen- und Güterverkehr.

Basierend auf der Literaturanalyse wird angenommen, dass die Nachfrageelastizität in Spitzenzeiten -0.10 und ausserhalb von Spitzenzeiten -0.15 beträgt.²⁴ Diese Werte sind konservativ gewählt und entsprechen daher dem At-Least-Ansatz. Eine Differenzierung nach Personen- und Güterverkehr erfolgt nicht. Auf eine Differenzierung nach Streckentypen (beispielsweise städtisch, nicht-städtisch) wird ebenfalls verzichtet.

Tabelle 34: Übersicht zu Nachfrageelastizitäten für die Schweiz

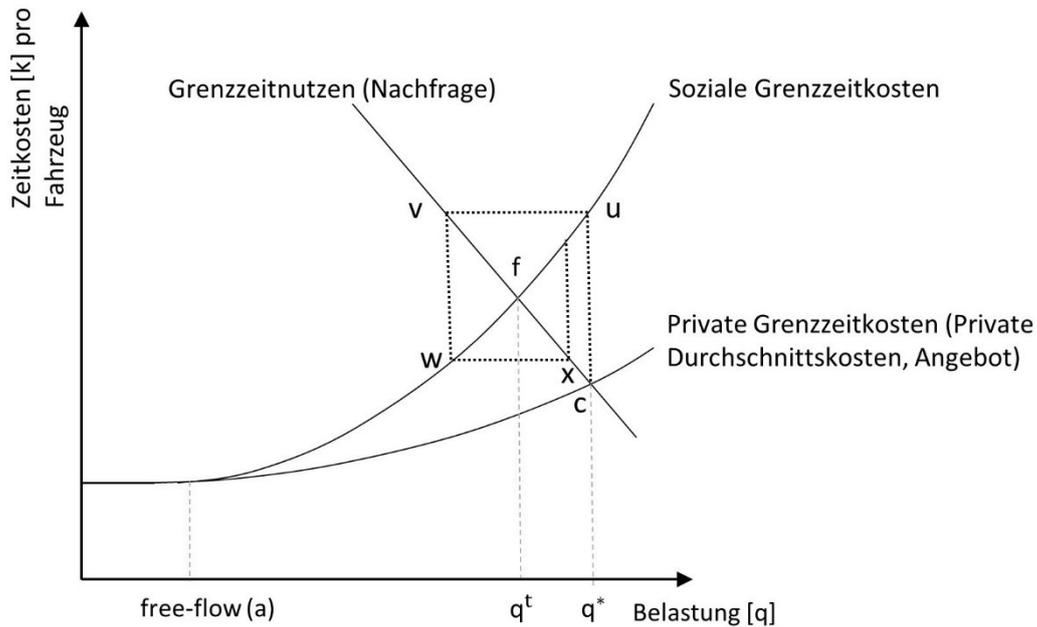
Studie	Elastizitäten	
Personenverkehr		
ARE 2017 (SP-Befragung)	MIV: Fahrzeit (Fahrten-gewichtet)	-0.08
ARE 2016 (SP-Befragung)	MIV: Fahrtzeit (Modell 2010)	-0.41
	MIV: Fahrtzeit (Modell 2015)	-0.44
ARE 2012 (Übersicht SP-Befragungen)	MIV: Reisezeit kurzfristig	-0.40
	MIV: Reisezeit langfristig	-0.90
Vrtic und Fröhlich 2006 (Analyse SP-Daten)	MIV: Reisezeit	-0.32
Prognos 2000 (Literaturauswertung)	PW: «out-of-pocket-Kosten» kurzfristig	Spitzenzeiten -0.02 – -0.10 ausserhalb der Spitzenzeiten -0.06
	PW: «out-of-pocket-Kosten» mittelfristig	Spitzenzeiten -0.07 – -0.12 ausserhalb der Spitzenzeiten -0.20 – -0.60
Oum, Waters und Yong 1990 (Literaturauswertung)	Veränderung der Nachfrage im MIV	ganzer Tag -0.10 – -1.10 während Spitzenstunden -0.20 – -1.10 ausserhalb Spitzenstunden -0.10 – -1.10
Güterverkehr		
ARE 2015 (Literaturauswertung)	GV: variable Kosten	0.031 – -0.605
INFRAS 2011 (Studie)	GV: variable Kosten	-0.12 – -0.20
Oum, Waters und Yong 1990	Lastkraftwagen	-0.70 – -1.10

SP: Stated Preference.

Tabelle INFRAS.

²⁴ Ergänzend wurden die Optima auch für eine hohe Elastizität von -0.3 (Spitzenzeiten) bzw. -0.45 (Randzeiten) berechnet.

Abbildung 33: Cobweb-Verfahren zur Bestimmung des Gleichgewichts



Grafik INFRAS.

Das Nutzergleichgewicht (f) kann iterativ mittels Cobweb-Verfahren für eine schrittweise Annäherung an ein Marktgleichgewicht ermittelt werden. Im Folgenden werden die Schritte des iterativen Verfahrens kurz erläutert. Für die Iteration werden die Einheitskosten pro Fahrzeug verwendet.

1. Berechnen der Durchschnittskosten je Quell-Ziel-Relation vor Gebühr (Punkt c, Ausgangspunkt).

$$PDK(q^*) = t^1 \cdot \left(1 + \alpha \cdot \left(\frac{q^*}{c} \right)^\beta \right) \cdot VOT$$

2. Berechnen der Sozialen Grenzkosten, die ein Fahrzeug zu tragen hat, je Quell-Ziel-Relation (Punkt u).

$$SGK(q^*) = VOT \cdot t^1 + VOT \cdot t^1 \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \left(\frac{q^*}{c} \right)^{\beta-1}$$

3. Mit Hilfe der Preiselastizität (E, differenziert nach Spitzenzeiten und Randzeiten), dem Marktgleichgewicht (Punkt c) und der (inversen Nachfrage (d(q))) kann die neue Belastung berechnet werden (Punkt v).

$$E = \frac{1}{m} \cdot \frac{PDK(q^*)}{q^*}$$

$$m = \frac{1}{E} \cdot \frac{PDK(q^*)}{q^*}$$

$$d(q) = m \cdot q + K$$

$$K = PDK(q^*) - m \cdot q^*$$

$$q_2 = \frac{SGK(q^*) - K}{m}$$

E = Elastizität

m = Steigung (< 0)

K = Konstante, die den Achsenabschnitt der (inversen) Nachfragefunktion definiert

4. Mit Hilfe der neuen Belastung können die neuen Kosten pro Fahrzeug berechnet werden (Punkt w).

$$SGK(q_2) = VOT \cdot t^1 + VOT \cdot t^1 \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \left(\frac{q_2}{c}\right)^{(\beta-1)}$$

5. Mit Hilfe der neuen Kosten kann die neue Belastung berechnet werden (Punkt x).

$$q_3 = \frac{SGK(q_2) - K}{m}$$

6. Prozess fortsetzen, bis die Unterschiede zwischen zwei aufeinander folgenden Iterationsschritten minimal sind (vgl. Abbildung 33).

Die optimale Belastung pro Streckenabschnitt wird nur für das Jahr 2019 berechnet. Es wird angenommen, dass das Optimum für die nächsten 5 Jahre konstant bleibt.

Wohlfahrtsverlust

Der Wohlfahrtsverlust entspricht der Fläche c, e und f in Abbildung 32. Abbildung 34 illustriert, wie der Wohlfahrtsverlust je Streckenabschnitt geschätzt wird. Pro Streckenabschnitt wird für jede Stunde mit dem Integral zuerst die Fläche unter den Sozialen Grenzzeitkosten zwischen dem Optimum und der tatsächlichen Belastung berechnet (Fläche q^t , q^* , e und f). Dann wird

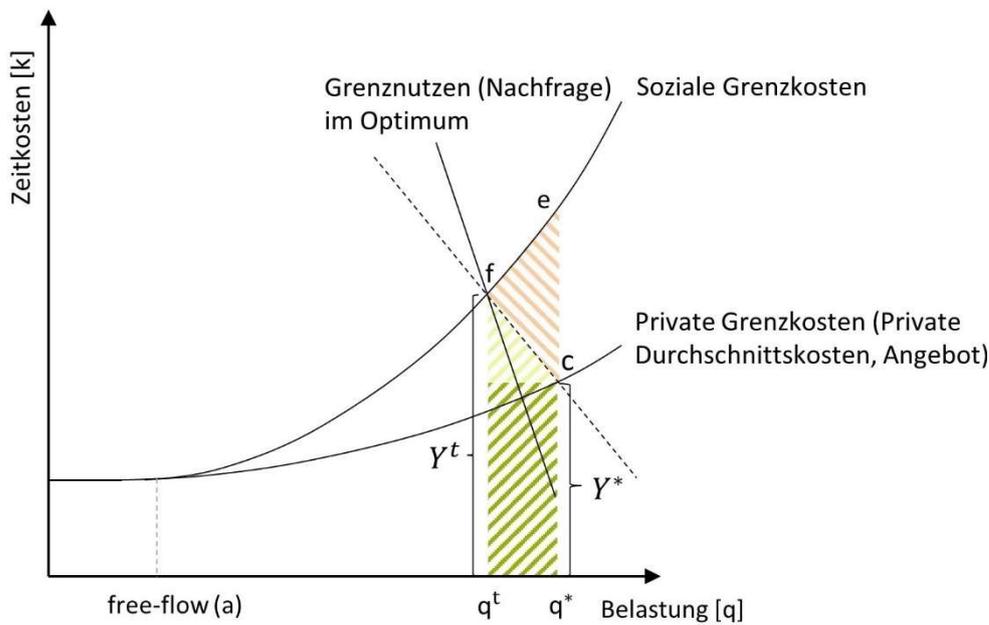
numerisch die hell- und dunkelgrüne Fläche (Fläche q^t , q^* , c und f) abgezogen. Die daraus resultierende Fläche entspricht dem geschätzten Wohlfahrtsverlust, der während einer spezifischen Stunde auf einem Streckenabschnitt entsteht.

Die Fläche der drei Punkte (c , e , f) wird dementsprechend folgendermassen berechnet (vgl. Abbildung 34):

$$\int_{q^t}^{q^*} SGK(q) dq - \left[(q^* - q^t) \cdot \min(Y^*, Y^t) + \frac{(q^* - q^t) \cdot |Y^* - Y^t|}{2} \right]$$

$$\min(Y^*, Y^t) = \begin{cases} Y^*, & \text{wenn } Y^* < Y^t \\ Y^t, & \text{wenn } Y^t < Y^* \end{cases}$$

Abbildung 34: Berechnung des Wohlfahrtsverlusts



Grafik INFRAS.

3.2.5. Ergebnisse

Die **gesamten Zeitverluste** und die entsprechenden Zeitverlustkosten sind in den folgenden Tabellen zusammengefasst. Die Ergebnisse werden in Kap. 3.3 plausibilisiert.

Die Höhe der Fahrzeugstunden nach Fahrzeugkategorien in Tabelle 35 zeigt, dass die Personenwagen Zeitverluste von rund 64 Mio. Fahrzeugstunden pro Jahr bzw. knapp 88% der gesamten Zeitverluste tragen.

Tabelle 35: Zeitverluste ggü. Free-Flow-Geschwindigkeit nach Fahrzeugkategorien 2019 (Fahrzeugstunden)

	Werktage		Wochenendtage		Total
	Std./Tag	Std./Jahr	Std./Tag	Std./Jahr	Std./Jahr
Personenwagen (PW)	219'218	55'462'200	79'034	8'219'557	63'681'757
Lieferwagen (LI)	23'845	6'032'905	8'110	843'467	6'876'372
Schwere Nutzfahrzeuge (SNF)	8'433	2'133'534	359	3'7328	2'170'863
Total	251'497	63'628'640	87'503	9'100'352	72'728'991

Abweichungen resultieren aus Rundungsdifferenzen.

Tabelle INFRAS. Eigene Berechnungen.

In den zwei Spitzenstunden am Tag resultieren im Durchschnitt rund 17% der Verlustzeiten (Tabelle 36), was rund 8% pro Stunde entsprechen würde. In den vier Nebenspitzenstunden beträgt dieser Durchschnitt rund 25%, was rund 6% pro Stunde entsprechen würde. In den 18 Randzeiten resultieren 58% der Zeitverluste bzw. durchschnittlich rund 3% pro Tag.

Tabelle 36: Übersicht Zeitverluste nach Tageszeiten 2019 (Fahrzeugstunden bzw. %)

	Werktage		Wochenendtage		Total	
	Std./Tag	Anteil %	Std./Tag	Anteil %	Std./Tag	Anteil %
Spitzenstunden	48'232	19%	9'338	11%	57'570	17%
Nebenspitzenstunden	67'684	27%	17'568	20%	85'252	25%
Randzeiten	135'580	54%	60'598	69%	196'178	58%
Total	251'497	100%	87'503	100%	339'000	100%

Spitzenstunden: 7–8h und 17–18h; Nebenspitzenstunden: 6–7h und 8–9h; 16–17h und 18h–19h; Randzeiten: Rest

Abweichungen resultieren aus Rundungsdifferenzen.

Tabelle INFRAS. Eigene Berechnungen.

Auf den Hochleistungsstrassen (functional class 1) werden rund 17% der Zeitverluste generiert (Tabelle 37). Dabei zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen Werktagen und dem Wochenende.

Tabelle 37: Übersicht der Zeitverluste nach Strassenkategorien 2019 (Fahrzeugstunden bzw. %)

	Werktage		Wochenendtage		Total	
	Std.	Anteil %	Std.	Anteil %	Std./Tag	Anteil %
Functional Class 1	13'166'963	21%	473'827	5%	56'599	17%
Functional Class 2 & 3	36'866'316	58%	5'685'724	63%	200'387	59%
Functional Class 4	13'595'363	21%	2'940'806	32%	82'014	24%
Total	63'628'642	100%	9'100'358	100%	339'000	100%

Die Functional Class aus dem HERE-Datensatz können grob folgendermassen klassiert werden:

Functional Class 1: Hochleistungsstrassen (v.a. Autobahnen); Functional Class 2 und 3: Hauptverkehrsstrassen; Functional Class 4: vor allem regionale Verbindungsstrassen, teilweise Hauptverkehrsstrassen.

Abweichungen resultieren aus Rundungsdifferenzen.

Tabelle INFRAS. Quelle: Eigene Berechnungen.

Die **gesamten Zeitverlustkosten**, die sich die Verkehrsteilnehmenden gegenseitig aufbürden und entsprechend tragen, betragen rund 3.1 Mrd. Franken im Jahr 2019 (Tabelle 38). Mit 87% haben die Personenwagen den grössten Anteil daran. Rund 88% der Zeitverlustkosten resultieren an Werktagen.

Tabelle 38: Übersicht gesamte getragene Zeitverlustkosten nach Fahrzeugkategorien 2019 (Mio. CHF/Jahr)

	Werktage	Wochenendtage	Total
Personenwagen (PW)	2'359	350	2'708
Lieferwagen (LI)	242	34	275
Schwere Nutzfahrzeuge (SNF)	145	3	148
Total	2'746	386	3'131

Abweichungen resultieren aus Rundungsdifferenzen.

Tabelle INFRAS. Eigene Berechnungen.

Die durchschnittlichen Zeitverlustkosten pro Fahrzeugkilometer sind in Tabelle 39 zusammengefasst. Hierbei werden alle Fahrleistungen auf der Strasse berücksichtigt. Die Fahrleistungen wurden aus der Statistik für Verkehrsentwicklung und Verkehrsfluss 2020 des ASTRA bezogen.

Tabelle 39: Übersicht durchschnittlich getragene Zeitverlustkosten 2019 (Rp./Fzkm)

	Durchschnittliche Zeitverlustkosten
Personenwagen (PW)	4.4
Lieferwagen (LI)	5.9
Schwere Nutzfahrzeuge (SNF)	6.67

Abweichungen resultieren aus Rundungsdifferenzen.

Tabelle INFRAS. Eigene Berechnungen.

Der **gesamte Wohlfahrtsverlust** beträgt rund 33 Mio. Franken im Jahr 2019 (Tabelle 40). Die Personenwagen haben einen Anteil von 87% am gesamten Wohlfahrtsverlust im Jahr 2019, was dem Anteil an den Zeitverlustkosten entspricht.

Tabelle 40: Übersicht Wohlfahrtsverlust nach Fahrzeugkategorien 2019 (Mio. CHF/Jahr)

	Werktage	Wochenendtage	Total
Personenwagen (PW)	14.1	14.5	28.5
Lieferwagen (LI)	1.3	1.6	2.9
Schwere Nutzfahrzeuge (SNF)	1	0.3	1.2
Total	16.3	16.4	32.6

Abweichungen resultieren aus Rundungsdifferenzen.

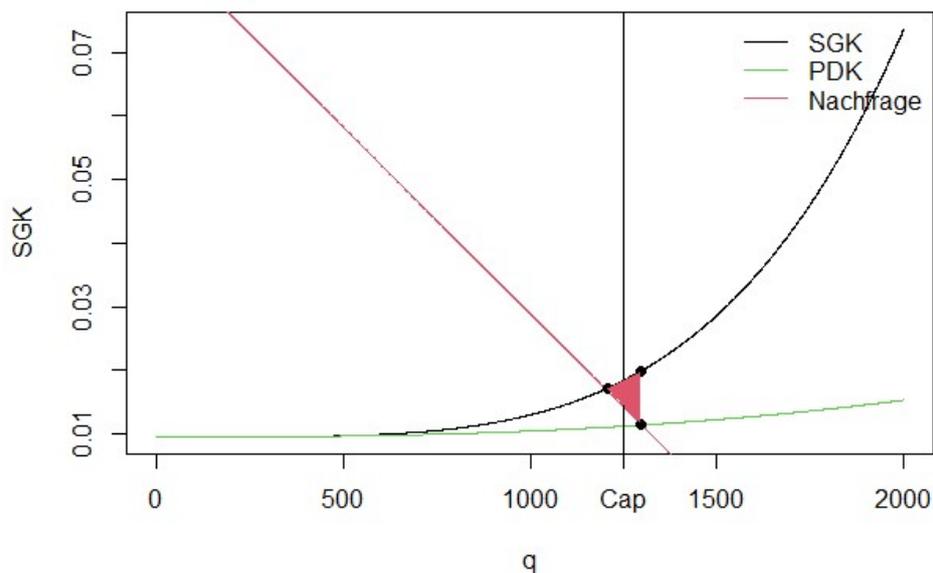
Tabelle INFRAS. Eigene Berechnungen.

Der Wohlfahrtsverlust an einem Werktag entspricht fast dem Wohlfahrtsverlust an einem Wochenendtag. Der Wohlfahrtsverlust während den Werktagen entsteht vor allem aufgrund des Pendelverkehrs (fast die Hälfte des Wohlfahrtsverlusts ist auf die beiden Spitzenstunden zurückzuführen). Der Freizeitverkehr an den Wochenenden führt dagegen vor allem während den Randzeiten zu einem Wohlfahrtsverlust. Einige Strecken weisen nur an den Wochenenden einen Wohlfahrtsverlust auf. Zum Beispiel weist die Gotthard-Strecke in Fahrtrichtung Nord während den Werktagen keinen Wohlfahrtsverlust auf, da die stündliche Belastung immer unter der optimalen Belastung liegt. An einem Wochenendtag weist die Gotthard-Strecke in Fahrtrichtung Nord dagegen einen täglichen Wohlfahrtsverlust von 13'037 Franken auf. Der durchschnittliche Wohlfahrtsverlust an einem Wochenendtag für die Streckensegmenten mit Wohlfahrtsverlusten beträgt 4'374 Franken.

Die Abbildung 35 veranschaulicht die Herleitung des Wohlfahrtsverlust anhand einer Strecke (Functional Class 2) und für eine ausgewählte Stunde. Da die Belastung dieser Strecke in

der betrachteten Stunde (12 Uhr) an einem Werktag über der optimalen Belastung liegt, entsteht ein Wohlfahrtsverlust (rotes Dreieck). Die Durchschnittskosten für die betrachtete Strecke bei der beobachteten Belastung liegen bei rund 1.1 Rappen pro Fahrzeug und die sozialen Grenzkosten liegen bei rund 2.0 Rappen pro Fahrzeug. Auf der Strecke sind während der betrachteten Stunde 1'298 Fahrzeuge unterwegs. Die optimale Belastung würde bei 1'208 Fahrzeugen liegen. Die stündliche Kapazität des Streckensegments gemäss Nationalem Personenverkehrsmodell beläuft sich auf 1'250 Fahrzeuge pro Stunde. Der aus der Überlast resultierende Wohlfahrtsverlust pro Stunde und pro Strecke wird für alle 24 Stunden berechnet und aufsummiert. Die betrachtete Strecke weist einen Wohlfahrtsverlust von 1'057 Franken pro Werktag auf.

Abbildung 35: Veranschaulichung des Wohlfahrtsverlusts am Beispiel einer Strecke



Als Beispiel wurde der Hirschwiesentunnel in Zürich (Fahrtrichtung Unterstrass/Schwamendingen, Functional Class 2) um 12 Uhr verwendet.

Grafik INFRAS.

Der Wohlfahrtsverlust in Spitzenstunden hat einen Anteil von 29%. Dies unterscheidet sich von den Anteilen der Zeitverluste nach Tageszeiten aufgrund der unterschiedlichen Elastizitäten in Spitzen- und Randzeiten, die für die Steigung der Nachfragekurven zugrunde gelegt wurden.

Tabelle 41: Übersicht Wohlfahrtsverlust nach Tageszeiten 2019 (Mio. CHF/Jahr)

	Werktage	Wochenendtage	Total
Spitzenstunden	7.5	2.0	9.5
Randzeiten	8.8	14.4	23.2
Total	16.3	16.4	32.6

Abweichungen resultieren aus Rundungsdifferenzen.

Tabelle INFRAS. Eigene Berechnungen.

Beim Wohlfahrtsverlust nach Strassenkategorien zeigt sich ein besonders hoher Anteil von 78% der funktionalen Klassen 2 & 3 (Tabelle 42). Dies weicht von den Anteilen der Zeitverluste nach Strassenkategorien vor allem in Bezug auf die Functional Class 4 deutlich ab. Eine Überschreitung der optimalen Belastungen findet vor allem auf den Strassen der Functional Class 2&3 statt. Für weitergehende Erklärungen bedürfte es weiterer Datenanalysen.

Tabelle 42: Übersicht Wohlfahrtsverlust nach Strassenkategorien 2019 (Mio. CHF/Jahr)

	Werktage	Wochenendtage	Total
Functional Class 1	2.2	3.9	6.1
Functional Class 2 & 3	13.9	11.4	25.4
Functional Class 4	0.1	1.0	1.1
Total	16.3	16.4	32.6

Abweichungen resultieren aus Rundungsdifferenzen.

Tabelle INFRAS. Eigene Berechnungen.

Die gesamten externen Grenzzeitkosten entsprechen der Fläche unter der Grenzzeitkostenfunktion abzüglich der Fläche der Durchschnittskostenfunktion (vgl. Abbildung 32). Diese externen Kosten werden von den Verkehrsteilnehmenden bei ihrer Entscheidung nicht berücksichtigt.

Tabelle 43: Übersicht Summe der externen Grenzzeitkosten 2019 (Mio. CHF)

	Werktage	Wochenendtage	Total
Personenwagen (PW)	777	262	1'039
Lieferwagen (LI)	85	28	113
Schwere Nutzfahrzeuge (SNF)	86	6	92
Total	948	296	1'244

Abweichungen resultieren aus Rundungsdifferenzen.

Tabelle INFRAS. Eigene Berechnungen.

Die durchschnittlichen sozialen Grenzzeitkosten pro Fahrzeugkilometer sind in Tabelle 44 bis Tabelle 46 zusammengefasst. Hierbei unterscheiden wir zwischen getragenen und verursachten durchschnittlichen sozialen Grenzzeitkosten.

Tabelle 44: Übersicht durchschnittliche Grenzzeitkosten 2019 (Rp./Fzkm) nach Fahrzeugkategorien

	Getragene Grenzzeitkosten	Verursachte Grenzzeitkosten
Personenwagen (PW)	0.37	0.37
Lieferwagen (LI)	0.53	0.53
Schwere Nutzfahrzeuge (SNF)	0.32	0.33

Abweichungen resultieren aus Rundungsdifferenzen.

Tabelle INFRAS. Eigene Berechnungen.

Tabelle 45: Übersicht getragene durchschnittliche Grenzzeitkosten 2019 (Rp./Fzkm) nach Strassenkategorien

	Functional Class 1	Functional Class 2–4
Personenwagen (PW)	0.05	0.56
Lieferwagen (LI)	0.04	1.58
Schwere Nutzfahrzeuge (SNF)	0.09	1

Abweichungen resultieren aus Rundungsdifferenzen.

Tabelle INFRAS. Eigene Berechnungen.

Tabelle 46: Übersicht verursachte durchschnittliche Grenzzeitkosten 2019 (Rp./Fzkm) nach Strassenkategorien

	Functional Class 1	Functional Class 2–4
Personenwagen (PW)	0.05	0.57
Lieferwagen (LI)	0.04	1.59
Schwere Nutzfahrzeuge (SNF)	0.09	1

Abweichungen resultieren aus Rundungsdifferenzen.

Tabelle INFRAS. Eigene Berechnungen.

3.3. Plausibilisierungen

Vergleich der gesamten Zeitverlustkosten mit den Stauzeitkosten für das Jahr 2019

Für das Jahr 2019 liegen Ergebnisse zu den gesamten Zeitverlustkosten (Kapitel 3.1) sowie der aktualisierten Stauzeitkosten (Kapitel 3.1) vor (Tabelle 47).

Tabelle 47: Fahrzeug(stau)stunden und gesamte Verspätungs- bzw. Stauzeitkosten 2019

	Fahrzeug(stau)stunden	Verspätungs- bzw. Stauzeitkosten
Vorliegende Studie (Kap. 3.2)	72.73 Mio. Stunden	3'131 Mio. CHF
Aktualisierung Kap. 3.1	35.99 Mio. Stunden	1'673 Mio. CHF
Abweichung in Prozent	+102%	+87%

Tabelle INFRAS.

Die Abweichungen basieren auf der unterschiedlichen Methodik zur Herleitung der Fahrzeug(stau)stunden. Keller und Wüthrich (2016) berechnen Stauzeitkosten und definieren, dass Stau vorliegt, wenn die tatsächliche Geschwindigkeit unter 65 % der Referenzgeschwindigkeit (Free-Flow) liegt. Hingegen werden in Kapitel 3.1 die gesamten Zeitverlustkosten gegenüber der Free-Flow-Geschwindigkeit ermittelt. Die in Kapitel 3.1 ermittelten Fahrzeugstauzeiten für 2019 aus Sicht Verkehrsart liegen daher rund 50 Prozent unter den in Kapitel 3.1 aus Sicht der Verkehrsteilnehmenden ermittelten Zeitverlusten. Die Zeitkostensätze unterscheiden sich nicht.

Vergleich der gesamten Zeitverlustkosten der vorliegenden Studie und dem EU Handbook

Im EU Handbook zu den externen Kosten wurden die gesamten Zeitverlustkosten für die Schweiz auf rund 3.5 Mrd. Euro (Preisstand 2016) geschätzt (vgl. Tabelle 14 in Kap. 2.2.1.4). Die im EU Handbook ermittelten Verspätungskosten liegen rund 19 Prozent über den ermittelten Zeitverlustkosten der vorliegenden Studie (vgl. Tabelle 48).

Tabelle 48: Verspätungskosten EU Handbook und Zeitverlustkosten vorliegende Studie

Studie	
EU Handbook (Preisstand 2016)*	3'738 Mio. CHF
Vorliegende Studie (2019)	3'131 Mio. CHF
Abweichung zum EU-Handbook in Prozent	-16 %

* Verspätungskosten von 3'493 Mio. Euro (Preisstand 2016) wurden mit dem Wechselkurs vom 30.12.2016 in CHF (1.07 CHF) umgerechnet. Bei einer Anpassung an die Teuerung (basierend auf dem Landesindex der Konsumentenpreise, LIK) resultieren Verspätungskosten von rund 3'805 CHF im Jahr 2019.

Tabelle INFRAS.

Die höheren Verspätungskosten im EU Handbook resultieren aus deutlich höheren Fahrzeugstunden im Vergleich zur vorliegenden Studie. Die Kostensätze im EU Handbook liegen hingegen unter den vorliegenden angenommenen Zeitwerten (Tabelle 49).

Der Unterschied in der Höhe der Fahrzeugstunden ist auf die unterschiedliche Methodik und die verschiedenen Datenquellen zurückzuführen. Das EU-Handbook verwendet TomTom

Daten und das TRUST Netzwerkmodell (Transport eUropean Simulation Tool), um die Verspätungszeiten differenziert nach Zeitraum und Strassentyp zu schätzen. Dabei werden verschiedene Datenquellen verwendet. Der Ansatz entspricht einem Top-down-Ansatz. Hingegen wurden vorliegend die Zeitverluste streckenscharf und einheitlich auf Basis der HERE-Daten bottom-up ermittelt.

Die jährlichen Verspätungskosten werden anhand der Bevölkerungsgrösse, dem Anteil der riesenden Personen und dem Anteil an Fahrzeugen hochgerechnet. Des Weiteren schätzt das EU-Handbook die Verspätungskosten nur aufgrund der Arbeitstage. Dabei wird von 230 Arbeitstagen pro Jahr ausgegangen.

Tabelle 49: Vergleich Kostensätze EU Handbook und vorliegende Studie (CHF pro Personenstunde im PV bzw. Fahrzeugstunde im GV)

EU Handbook (CHF 2016)						Vorliegende Studie (CHF 2019)		
Kurzstrecke		Langstrecke		Güterfernverkehr		PW	LI	SNF
Geschäftliche Reisen	Persönliche Reisen	Geschäftliche Reisen	Persönliche Reisen	Wert pro Tonne	Fahrpersonalkosten pro h			
22.9	10.6	28.0	10.6	1.4	30.5	26.1	40.0	68.2

Kurzstrecke: Weniger als 32 km; Langstrecke: Mehr als 32 km.

Zeitwerte (Euro Preisstand 2016) wurden mit dem Wechselkurs vom 30.12.2016 in CHF (1.07 CHF) umgerechnet.

Tabelle INFRAS. Quelle : van Essen et al. (2019) und INFRAS.

Vergleich des Wohlfahrtsverlusts der vorliegenden Studie und dem EU Handbook

Im EU Handbook zu den externen Kosten wurde der Wohlfahrtsverlust für die Schweiz auf rund 603 Mio. Euro (Preisstand 2016) geschätzt (vgl. Tabelle 14 in Kap. 2.2.1.4). Damit liegt der Wohlfahrtsverlust, der im EU Handbook ermittelt wurde, rund 1854 Prozent über dem in der vorliegenden Studie ermittelten Wohlfahrtsverlust.

Der Wohlfahrtsverlust hängt insbesondere von der berechneten optimalen Belastung pro Strecke ab. Wird ein tiefes Optimum (nähe Free-Flow) gewählt, ergibt sich ein höherer Wohlfahrtsverlust. Das Optimum hängt einerseits von den angenommenen Elastizitäten und andererseits von der Belastung, die für die Herleitung der Nachfrage im Optimum verwendet wird, ab. Wird das Optimum basierend auf hohen Elastizitäten und einer tiefen angenommenen Belastung hergeleitet, ergibt sich daraus eine tiefe optimale Belastung, was wiederum einen höheren Wohlfahrtsverlust ergibt. Das Optimum liegt dagegen deutlich höher, wenn tiefe Elastizitäten und eine höhere Belastung zur Herleitung des Optimums verwendet werden. Daraus resultiert ein tieferer Wohlfahrtsverlust.

In der vorliegenden Studie wurde die Kapazität als Start-Belastung im iterativen Cobb-Web-Verfahren gewählt, um den Wohlfahrtsverlust herzuleiten. Ausserdem wurden in der vorliegenden Studie im Vergleich zur Literatur tiefe Elastizitäten gewählt. Diese zwei Annahmen entsprechen dem At-Least-Ansatz.

Das EU-Handbook hat für die Herleitung der Nachfragefunktion höhere Elastizitäten (zwischen -0.3 bis -0.67) zugrunde gelegt. Die Herleitung des Optimums ist im Handbook nicht nachvollziehbar und wurde auf Nachfrage auch nicht erläutert. Die Abweichungen können daher nicht abschliessend erläutert werden.

Um die Sensitivität der Ergebnisse zu überprüfen, wurde der Wohlfahrtsverlust zusätzlich auch mit höheren Elastizitäten berechnet. Für die Spitzenstunden wurde dafür eine Elastizität von -0.3 und für die Randzeiten eine Elastizität von -0.45 angenommen. Der Wohlfahrtsverlust steigt aufgrund der höheren Elastizitäten um 9 Prozent.

Sensitivitätsprüfung des Aktualisierungstools auf Fahrleistungsveränderungen

Um zu prüfen, wie das Aktualisierungstool auf Fahrleistungsveränderungen reagiert bzw. welche gesamten Zeitverlustkosten bei höheren Fahrleistungen resultieren, wurde als Sensitivität ein doppelt so hoher Anstieg der Fahrleistungen vom Jahr 2017 auf das Jahr 2019 zugrunde gelegt. Im Anhang (A5) sind die Veränderungen der Fahrleistungen und die Auswirkungen auf die Zeitverlustkosten aufgezeigt.

Die gesamten Zeitverlustkosten erhöhen sich durch die Verdopplung der Fahrleistungsveränderung um 2.6 Prozent. Betrachtet man die hypothetische Fahrleistungsveränderung in Prozentpunkten, ist die Veränderung der Zeitverlustkosten plausibel.

4. Komfortverlustkosten ÖV

4.1. Operationalisierung

Komfortverlustkosten

Für das vorliegende Projekt werden Überlastungen als Auslastungen definiert, die über 90% liegen, was der Auslastungsstufe 4 aus ARE, 2016 entspricht. Dafür gibt es zwei Gründe: Einerseits wird «Überlast» in der SP-Befragung zum Mikrozensus Verkehr so definiert. Das bedeutet, dass die Grössen der VTT-Multiplikatoren auf der Annahme ermittelt wurden, dass diese Auslastungsstufe einen überlasteten Zustand entspricht. Andererseits wird damit auf eine Vergleichbarkeit der Interpretation der Auslastungen im Strassenverkehr abgezielt. Im Strassenverkehr entstehen Kosten der Auslastung aus funktionalen Gründen und nicht aus Komfortgründen (oder einen «Wunschzustand»), denn beim Strassenverkehr entstehen Überlastungen nur dann, wenn ein zusätzliches Fahrzeug, die Reisezeit der anderen Fahrzeuge beeinträchtigt, was erst dann zustande kommt, wenn die Kapazität der Strasse einen kritischen Punkt erreicht. Es ist daher auch hier sinnvoll, erst Komfortverluste zu berechnen, wenn eine funktionale Grenze (hier: Sitzplatzverfügbarkeit) erreicht wird. Der 90%-Wert entspricht einer Grenze, bei der bei hohen Auslastungen mehrere Passagiere zum Stehen gezwungen sind, da kein Sitzplatz in der direkten Umgebung mehr gefunden werden kann.

Den Komfortverlust K eines Individuums i aufgrund der Überlast h eines Kurses auf einem Streckenabschnitt s bezeichnen wir mit $K_{s,i,h}$. Der Komfortverlust eines einzelnen Individuums i auf Streckenabschnitt s aufgrund einer Auslastungsstufe h entspricht:

$$K_{s,i,h} = (i = 1) \cdot \Delta GC_h$$

ΔGC_h entspricht der Variation der generalisierten Kosten aufgrund der Steigerung der Auslastung aus einem Referenzzustand $h = 0$ auf einer Auslastungsstufe h .

$$K_{s,i,h} = (i = 1) \cdot (GC_{s,h} - GC_{s,h=0})$$

Die Summe des Komfortverlustes aller Individuen auf einem Streckenabschnitt entspricht:

$$K_{s,h} = \sum_i i \cdot (GC_{s,h} - GC_{s,h=0})$$

Und die Summe des Komfortverlustes eines gesamten Netzes entspricht der Summe des Komfortverlustes aller einzelnen Strecken:

$$K_h = \sum_s K_{s,h}$$

Generalisierte Kosten

Die generalisierten Kosten entsprechen der Summe der monetären Kosten für Billette und der monetarisierten Reisekosten. Wie in Kapitel 2.3 gezeigt, erfolgt die Bewertung des Komforts in der Literatur über einen VTT-Multiplikator. Der VTT-Multiplikator agiert, per Definition, auf dem Reisezeitwert VTT der Reisezeit im Fahrzeug t_s auf dem Streckenabschnitt s , da das die einzige Reisevariable ist, die durch einen überlasteten Zustand beeinflusst wird. Kosten für Billette sowie Zu- und Abgangszeiten verbleiben in beiden Komfortzustände konstant. Aus diesem Grund kann der Komfortverlust eines Individuums folgendermassen umgeschrieben werden:

$$(GC_{s,h} - GC_{s,h=0}) = t_s (VTT_{s,h} - VTT_{s,h=0})$$

Anhand der Definition des VTT-Multiplikators, Tm_h , kann die Änderung der generalisierten Reisekosten bzw. der individuelle Komfortverlust wie folgt umgeschrieben werden:

$$t_{s,i}(VTT_{s,h} - VTT_{s,h=0}) = t_s(Tm_{h,i} \cdot VTT_{s,h=0} - VTT_{s,h=0}) = t_s(Tm_{h,s} - 1) \cdot (VTT_{s, h=0})$$

Somit kann die Berechnung des Komfortverlustes wie folgt zusammengefasst werden:

$$K_{s,h} = \sum_i i \cdot t_s \cdot (Tm_h - 1) \cdot (VTT_{s, h=0})$$

$\sum_i i \cdot t_s$ entspricht dabei der Summe der Personenstunden im überlasteten Zustand auf einem Streckenabschnitt (Mengengerüst).

$(Tm_h - 1) \cdot (VTT_{s, h=0})$ entspricht dem Komfortverlust in CHF pro Stunde einer einzelnen Person im überlasteten Zustand (Wertgerüst).

Somit kann der Komfortverlust eines Individuums aufgrund einer höheren Auslastungsstufe anhand eines Reisezeitwertes und eines VTT-Multiplikators berechnet werden. Die Ermittlung des individuellen Komfortverlustes (Wertgerüst) werden in Kapitel 4.2 erläutert. Die Ermittlung der Summe der Personenstunden im überlasteten Zustand (Mengengerüst) werden in Kapitel 4.3 erläutert.

4.2. Ermittlung der Wertgerüste

Herleitung von VTT-Multiplikatoren für die Schweiz

Die VTT-Multiplikatoren für die Schweiz lassen sich aus der an den MZMV 2015 angeknüpften SP-Analyse 2015 berechnen (ARE 2017). Der Wert ergibt sich aus den Unterschieden in der Nutzenfunktion zweier Zustände, wobei folgende Ungleichung gelten muss:

$$GC_{\text{überlastet}} - GC_{\text{unbelastet}} > 0$$

Mit:

$GC_{\text{überlastet}}$: Generalisierte Reisekosten einer Reise im überlasteten Zustand

$GC_{\text{unbelastet}}$: Generalisierte Reisekosten einer Reise im unbelasteten Zustand

Abbildung 36 zeigt die Nutzenfunktion des ÖV gemäss SP-Befragung. Es handelt sich dabei um die Funktion für das gesamte Verkehrsmittelwahlmodell 1 (Modell mit lineare Nutzenfunktionen und ohne Sozioökonomie). Für die generalisierten Kosten wurde in der Modellschätzung die quadrierte Auslastung als erklärende Variable integriert. Der Nutzenunterschied zwischen einem unbelasteten und überlasteten Zustand besteht, ceteris paribus, aus der unterschiedlicher Auslastungsstufe.

Abbildung 36: Nutzenfunktion einer ÖV-Reise

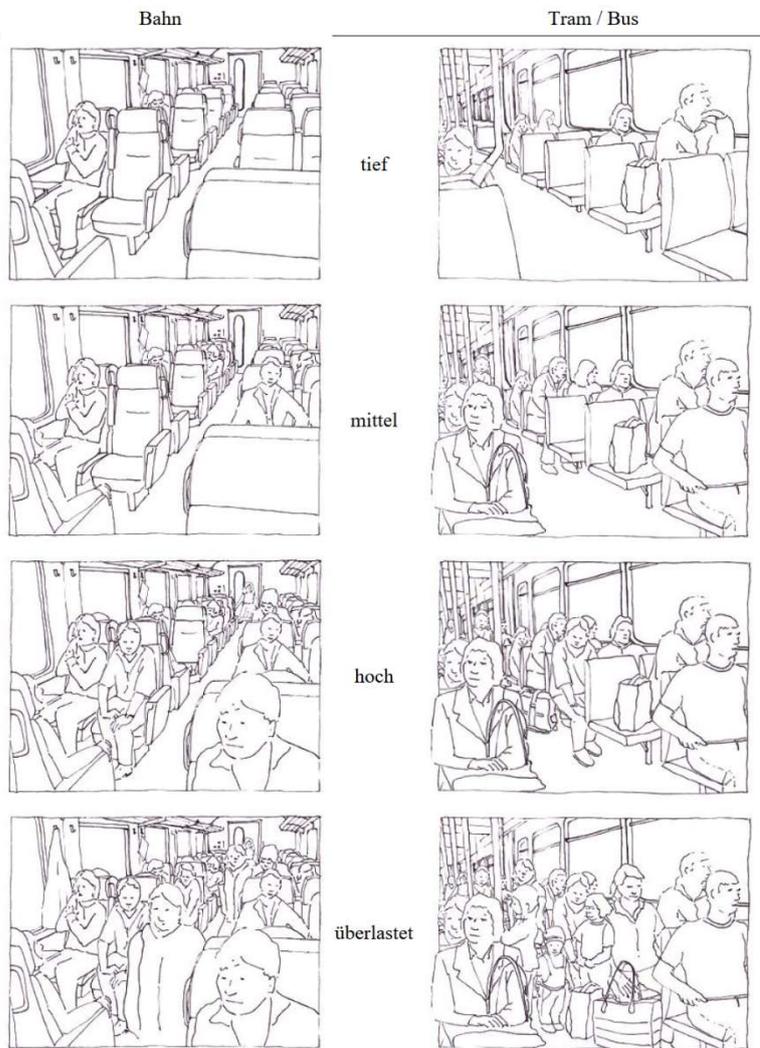
$$V_{\text{ÖV}} = \text{Skalenparameter}_{\text{RP}} \cdot \left(\begin{array}{c} \text{Konstante}_{\text{ÖV}} \\ + \beta_{\text{Fahrzeit}_{\text{ÖV}}} \cdot \text{Fahrzeit} \\ + \beta_{\text{Zu-und Abgangszeit}} \cdot \text{Zu- und Abgangszeit} \\ + \beta_{\text{Wartezeit}} \cdot \text{Wartezeit} \\ + \beta_{\text{Umsteigen}} \cdot \text{Umsteigen} \\ + \beta_{\text{Takt}} \cdot \text{Takt} \\ + \beta_{\text{Auslastung}} \cdot \text{Auslastung}^2 \\ + \beta_{\text{Kosten}} \cdot \text{Fahrtkosten} \end{array} \right)$$

v = Generalisierte Kosten (GC).

Quelle: ARE 2017.

Abbildung 37 zeigt die 4 Auslastungsstufen, die den Befragten der SP-Befragung gezeigt worden sind. In der SP-Befragung bildet erst die höchste Stufe einen überlasteten Zustand ohne verfügbare Sitzplätze ab (anders als bei Befragung z.B. zu Metrosystemen (Vgl. Kapitel 2.3).

Abbildung 37: Berücksichtigte Auslastungsstufen aus der SP-Befragung



Quelle: ARE 2016

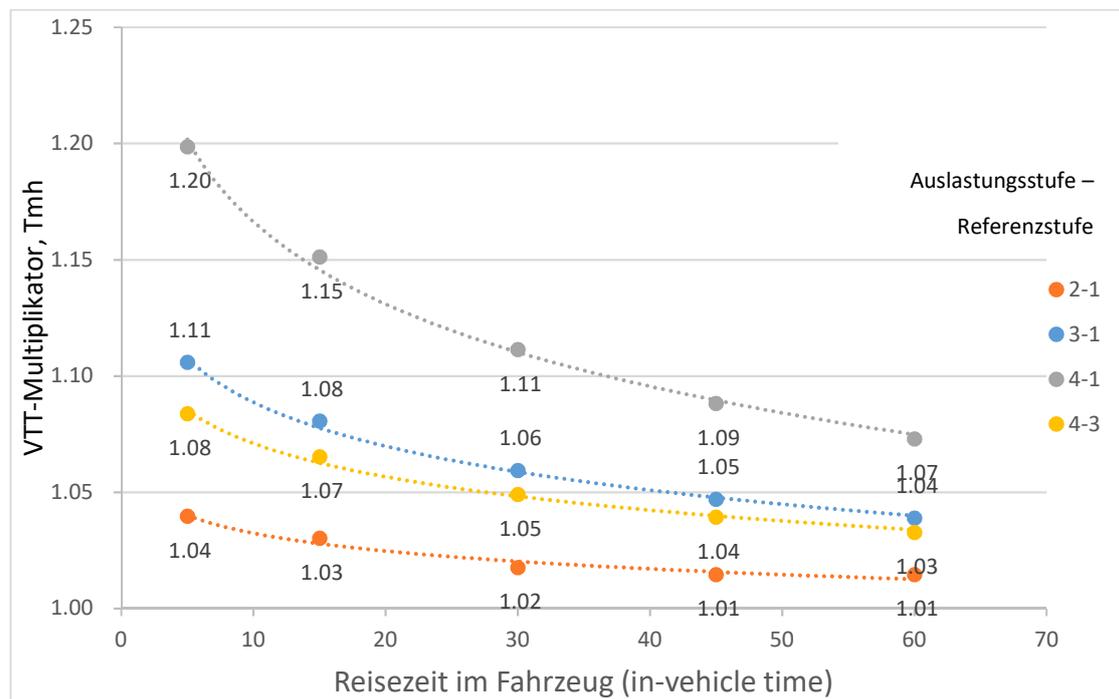
Der VTT-Multiplikator Tm_h für eine Auslastungsstufe h gegenüber einer Referenz-Auslastungsstufe $h = 0$, ist demnach:

$$Tm_h = \frac{GC_h}{GC_{h=0}}$$

Der Multiplikator Tm_h wurde für 5 unterschiedliche Reisezeiten (5min, 15min, 30min, 45min und 60min) berechnet. Die daraus entstehenden Werte und linearen Trendlinien werden in Abbildung 38 dargestellt. Die späteren Berechnungen basieren auf den VTT-Multiplikatoren der

Auslastungsstufe 4 gegenüber der Auslastungsstufe 3 (gelbe Kurve in Abbildung 38), weil basierend auf der «funktionalen» Definition der Überlast erst ab dem Wechsel von der dritten auf der vierten Auslastungsstufen, Komfortverlustkosten entstehen.

Abbildung 38: VTT-Multiplikatoren T_{mh} für verschiedene Auslastungsstufen für die Schweiz differenziert nach Reisezeiten (Preisstand 2015)



Berechnungen und Grafik EBP. Datengrundlage: ARE 2016

Die ermittelten VTT—Multiplikatoren in Abbildung 38 entsprechen den Erkenntnissen aus der Literatur (vgl. Tabelle 18):

- Je höher die Auslastung gegenüber der Referenz, desto höher ist der Multiplikator. Der schweizerische Wert liegt maximal bei 1.20. Für vergleichbare Auslastungsstufen erzielen Haywood & Koning (2013) einen Multiplikator von 1.18 (mit einer Spannweite von 1.07–1.28). Dies liegt im Bereich der hier aus der SP-Befragung ermittelten VTT-Multiplikatoren, wobei der VTT in der Schweiz höher liegt als in anderen Ländern. Diese werden somit als plausibel eingestuft.
- Der Vergleich der Werte entlang der x-Achse zeigt, dass die VTT-Multiplikatoren mit zunehmenden Reisezeiten abnehmen. Dies ist anhand der Literatur auch zu erwarten und entspricht auch der Logik der steigenden Reisezeitwerte für längere Reisezeiten bzw. längere

Reisedistanzen (Axhausen et al., 2008). Mit zunehmender Gesamtreisezeit gewinnen Reisezeitveränderungen gegenüber anderen Faktoren an Gewicht und die Bereitschaft, eine längere Reisezeit gegen einen höheren Komfort auszutauschen, nimmt ab.

Wertgerüst für die Berechnung der Komfortverlustkosten in dieser Untersuchung

Wie oben ausgeführt bilden die VTT-Multiplikatoren sowie der Reisezeitwerte die Wertgerüste der Komfortverlustkosten. Wir differenzieren diese Werte für die unterschiedlichen Verkehrsarten im ÖV nach den folgenden Kategorien:

- Bahn (Fernverkehr und regionaler Personenverkehr)
- Regionalbusverkehr
- Ortverkehr mit Tram, Bus und Trolleybus

Für jede Verkehrsart werden die zusätzlichen individuellen Komfortverlustkosten pro Person ermittelt. Die Kostensätze ermitteln wir basierend auf den im MZMV 2015 ausgewerteten mittleren Reiselängen und Reisedistanzen für jede Verkehrsart. Anhand dieser Werte ist es möglich, mittlere Reisezeitwerte (anhand der SP-Befragung zum MZMV 2015; ARE, 2017) und VTT-Multiplikatoren (anhand Tabelle 18) für die Verkehrsarten ermittelt (siehe Tabelle 50).

Tabelle 50: Ermittlung der zusätzlichen individuellen Komfortkosten pro Person und Verkehrsart bei Überlast (Preisstand 2019)

Verkehrsart	Mittlere Reisedistanz [km] ¹⁾	Mittlere Reisezeit [min] ¹⁾	Reisezeitwert [CHF/h] ²⁾	VTT-Multiplikator bei Überlast (Stufe 4 gegenüber Stufe 3)	Komfortkostensatz bei Überlast [CHF/h]
Bahn	32	28	12.81	1.049	0.644
Regionalbusverkehr	8	17	10.95	1.059	0.662
Städtischer Nahverkehr	3.5	11.5	9.87	1.067	0.677

Quellen: 1) MZMV 2015; 2) ARE, 2017; eigene Berechnungen.

Die individuellen Komfortverlustkosten, welche oben abgebildet sind, bilden somit einen Zusatz zu den generalisierten Reisekosten (pro Reisezeit), falls die ÖV-Reise im überlasteten Zustand (>90% Auslastung) stattfindet. Die Wertgerüste mit Preisstand 2015 sind analog der VSS 41 822a mit dem Nominallohnindex (vgl. Anhang A4) auf das jeweilige Betrachtungsjahr fortzuschreiben.

4.3. Ermittlung der Mengengerüste

4.3.1. Übersicht

Das Mengengerüst entspricht der Anzahl Personenstunden, die im Zustand der Überlastung gereist wird. Dazu werden je Fahrt und Streckenabschnitt die folgenden Angaben benötigt:

1. Anzahl Passagiere in Fahrten im überlasteten Zustand
2. Kapazität des Fahrzeuges
3. Fahrzeit auf dem Streckenabschnitt

Als Überlast wird hier erfasst, wenn die Nachfrage grösser als 90% der Sitzplatzkapazität beträgt. Dies entspricht auch der Umsetzung der SP-Befragung im NPVM (Input ARE). Stehplätze können zu dem nicht berücksichtigt werden, da auf der Bahn und im RPV keine Angaben zur Anzahl Stehplätze vorliegen. Die Datenlage stellt sich diesbezüglich wie folgt dar:

- Zähl- und Daten werden im ÖV von Transportunternehmen zwar erhoben, diese werden aber nicht in einer bundesweiten Datenbank erfasst. Die Bestellung und die damit verbundene Verarbeitung von Daten in unterschiedlichen Datenformaten übersteigt den Umfang und das Budget dieses Projektes.
- Für die Bahnunternehmen SBB, BLS, SOB, RhB, MGB, MOB stehen kursgenaue mittlere Auslastungsdaten aus der HOP-Datenbank von SBB-Personenverkehr zur Verfügung. Für jede Linie liegt die mittlere Auslastung nach Streckenabschnitt, Monat und Wochentag und Tageszeit vor.
- Für den Regionalbusverkehr steht die RPV-Datenbank des BAV zur Verfügung, aus der mittlere Auslastungen nach Linie ermittelt werden können. Die Datenqualität ist im Vergleich zur Bahn somit deutlich niedriger, da die Auslastungsdaten der RPV-Datenbank keine Differenzierungen aufweisen.
- Für den städtischen Nahverkehr sind Auslastungsdaten nicht bundesweit erfasst. Hier wurden probeweise Daten der Basler Verkehrsbetriebe ausgewertet.

Während für den städtischen Nahverkehr die Anzahl Personenstunden im überlasteten Zustand aufgrund der genügenden Differenzierung der Auslastungsdaten direkt ablesbar waren, musste für die Schiene und den regionalen Busverkehr eine Methode entwickelt werden, um diese Kennzahl zu schätzen.

4.3.2. Mengengerüste Schiene

Die Ermittlung der Mengengerüste auf der Schiene wird in folgenden Schritten beschrieben:

1. Beschreibung und Festlegung der Grundlage der SBB
2. Plausibilisierung der HOP-Daten für 2019
3. Ergebnisse 2019, 2020 und 2021

Die Schritte werden im Folgenden beschrieben.

Zu 1: Beschreibung und Analyse der Grundlage SBB

Die SBB liefert im Rahmen der vorliegenden Studie Überlastungen im Normalspurnetz aus den Fahrgastzählerhebungen (HOP-Datenbank). Die Datenbank weist mittlere Auslastungen je Kurs und je Streckenabschnitt, differenziert nach Werktag (Montag bis Freitag), Samstag, Sonntag sowie je Monat für alle Linien von SBB, BLS, SOB, RhB, MGB, MOB aus. Durch das Gegenüberstellen mit dem eingesetzten Rollmaterial können so Auslastungen berechnet werden. Anhand der mittleren Auslastung einer Linie kann der Prozentsatz an Fahrten im überlasteten Zustand und im Basis-Zustand ausgewiesen werden.

Die für die Ermittlung der Zugsauslastungen verwendete HOP-Datenbank verfügt über mittlere Auslastungen je Kurs und je Streckenabschnitt, differenziert nach Werktag (Montag bis Freitag), Samstag, Sonntag sowie je Monat für alle Linien von SBB, BLS, SOB, RhB, MGB, MOB. Somit liegen sehr differenzierte Daten vor, da die wesentlichen Auslastungsvariationen (Tageszeit, Wochentag und Monat) in der Datenbank ablesbar sind. Die Auslastung aus der HOP-Datenbank entspricht der Summe der Personenkilometer auf dem Streckenabschnitt, geteilt durch die Summe der Angebotskilometer (Sitzplätze x Streckenkilometer des Abschnitts).

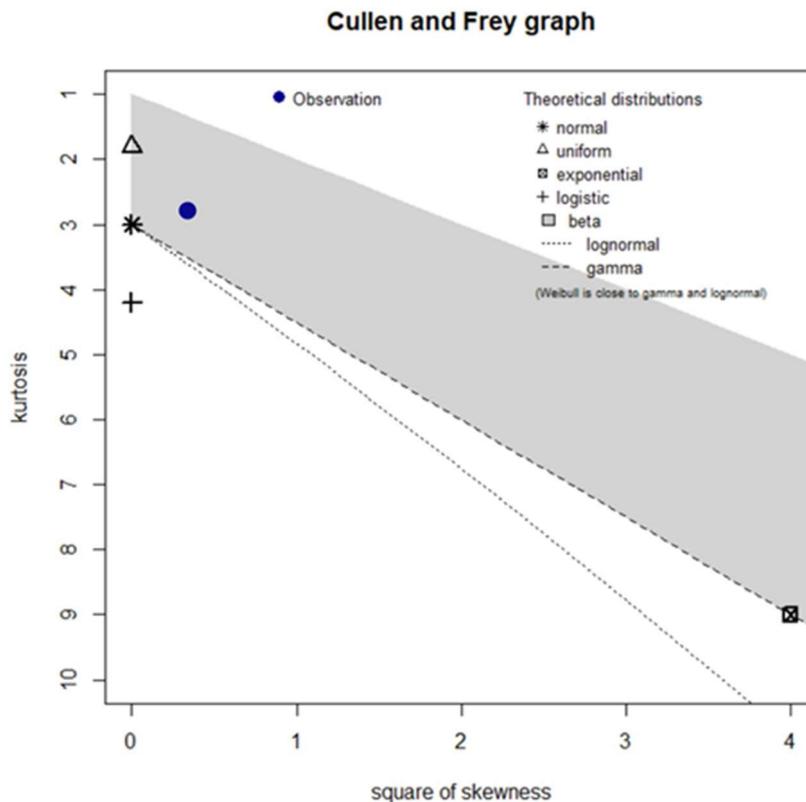
Fraglich ist, ob die HOP-Datenbank hinreichend differenziert ist (z.B. Durchschnitt Montag bis Freitag), oder ob die Verteilung von Einzelwerten derart ist, dass Anpassungen notwendig sind. Dieser Frage wurde anhand einer repräsentativen Auswahl an rohen Zählwerten von Regional- und Fernverkehrslinien für das Fahrplanjahr 2019 aus der FRASY-Datenbank von SBB Personenverkehr geprüft. In der FRASY-Datenbank sind keine Aggregationen enthalten und sie bildet die Grundlage für die HOP-Datenbank. So sind bspw. alle einzelnen Erhebungsdatensätze von Montag bis Freitag und keine Durchschnitte wie in HOP enthalten. Die zu prüfende Frage ist, ob die Verteilung der Zählwerte aus FRASY einer Normalverteilung entspricht und damit der Mittelwert für Montag bis Freitag und über den Monat der FRASY-Daten, der dem Wert in HOP entspricht, für die Berechnungen verwendet werden kann oder nicht.

Für diese Überprüfung wurden die FRASY-Zählwerte in Kategorien aufgeteilt, die der Aggregationsebene der HOP-Datenbank entsprechen (siehe oben). Anschliessend wurde für jede einzelne dieser Kategorien, die Kennzahlen *Kurtosis*²⁵ und *Skewness*²⁶ für die Verteilung der Auslastung der FRASY-Zählwerte ermittelt. Der Mittelwert dieser beiden Kennzahlen wurde dann in einem sog. Cullen & Frey Diagramm gezeichnet (Abbildung 39). Dieses Diagramm stellt den Gültigkeitsbereich verschiedenster Verteilungsdichtekurven gegenüber den Kennzahlen einer Stichprobe (blauer Punkt) dar.

²⁵ Kurtosis wird auf Deutsch als Wölbung bezeichnet. Verteilungen mit hoher Wölbung sind oft das Resultat von Beobachtungen die eher aus extremen, aber seltenen Ereignissen stammen. Eine Normalverteilung hat immer eine Wölbung von 3.

²⁶ Skewness ist ein Mass für die Schiefe einer Verteilung. Eine Verteilung mit auf beiden Seiten gleichverteilten Beobachtung hat eine Schiefe von Null (z.B. Normalverteilung). Eine Exponentialverteilung hat z.B. eine Schiefe, die nicht gleich Null ist.

Abbildung 39: Cullen & Frey Diagramm für den Mittel der Verteilung der Auslastungen der FRASY-Zählzeiten auf HOP-Aggregationsebene



Grafik EBP.

Die Abbildung zeigt, dass die Verteilung eine geringe Schiefe von 0.182 aufweist. Zum Vergleich: eine Normalverteilung hat eine *Skewness* von Null und eine *Kurtosis* von 3. Die Abbildung zeigt auch, dass der Mittelwert (Observationspunkt) einen geringen Abstand von der Normalverteilung aufweist. Wir gehen somit davon aus, dass aufgrund der Rechtsschiefe der Verteilung (*Skewness* > 0) die Mengengerüste leicht unterschätzt werden, da für einen selben Mittelwert und Standardabweichung, eine rechtsschiefe Verteilung einen längeren Schwanz hat. Der Fehler ist aber unserer Einschätzung nach vernachlässigbar, da die HOP-Datenbank so weit disaggregiert ist, dass die massgeblichen Auslastungsschwankungen aufgrund der Wochen-, Tages- und Jahresganglinien erkennbar sind.

Für die Berechnung der Personenstunden je Jahr im überlasteten Zustand werden somit die Daten aus der HOP-Datenbank zugrunde gelegt. Falls die Auslastung in einem Kurs auf einem Streckenabschnitt über 90% liegt, werden die Personen gezählt. Es wird die Summe der Passagiere, die auf dem Streckenabschnitt im überlasteten Zustand berechnet und mit der

Fahrzeit auf dem jeweiligen Streckenabschnitt multipliziert. Die Fahrzeiten auf den Streckenabschnitten sind der HOP-Datenbank angegeben. Die Personenstunden im überlasteten Zustand werden über das gesamte Netz und über die Tage des Jahres aufsummiert.

Zu 2: Plausibilisierung der HOP-Daten für 2019

Grundlage

Für die Plausibilisierung der HOP-Daten stellte die SBB verschiedene Auswertungen zur Verfügung.²⁷ Die Auswertung basiert auf den Tabellen der HOP, welche in der saisonalisierten Form pro Monat in der Unterscheidung Werktag, Samstag sowie Sonn- und Feiertage je Zug und Haltestellenabschnitt die Personenkilometer sowie die Angebotskilometer enthält. Das Verhältnis Personenkilometer zu Angebotskilometer ergibt dabei die Auslastung des Zuges pro Haltestellenabschnitt. Bei der Berechnung der Personenstunden in Überlastsituationen werden nur jene Haltestellenabschnitte berücksichtigt, bei denen die Auslastung mindestens 90% beträgt. Die Personenstunden berechnen sich dabei aus Personenkilometern dividiert durch die Distanz des Haltestellenabschnittes multipliziert mit der Fahrzeit des Haltestellenabschnittes. Die Aufenthaltszeit in den Bahnhöfen wird dabei nicht berücksichtigt.

²⁷ SBB Personenverkehr, Angebotsplanung: Plausibilisierung der Datenauswertung Kosten der Überlastung der Transportinfrastrukturen (KÜTI), E-Mail vom 2. Februar 2022.

Jahresgang je Betreiber

Die folgenden Tabellen zeigen den Jahresgang je Betreiber. Die obere Tabelle beinhaltet absolute Werte der Überlast in Personenstunden pro Jahr. Die untere Tabelle Anteile am Gesamtwert Personenstunden. Die Einfärbung in der unteren Tabelle zeigt hohe Anteile Überlast in rot und tiefe Anteile in blau.

Tabelle 51: Jahresgang je Betreiber. Obere Tabelle absolute Werte in Personenstunden pro Jahr; untere Tabelle Anteile am Gesamtwert Personenstunden. (Untere Tabelle mit Einfärbung gemäss Anteil: hohe Anteile in rot und tiefe Anteile in blau)

	Berücksichtigt in Auswertung	Jahr Monat	201813	201901	201902	201903	201904	201905	201906	201907	201908	201909	201910	201911	201912	
SBB	Ja		173'000	462'138	427'098	567'823	352'549	477'468	434'391	291'338	283'489	550'409	640'101	740'043	362'863	5'762'710
SBB GmbH	nur Teil Schweiz		17'373	23'978	20'584	22'285	18'230	32'024	9'850	17'808	12'356	13'025	22'003	28'383	19'317	257'216
RegionAlps	Ja		1'612	4'885	6'212	2'813	1'780	4'369	732	362	1'331	11'158	6'756	8'009	5'423	55'443
BLS	Ja		12'411	49'316	48'438	66'008	37'170	47'754	32'206	17'067	41'270	56'576	74'822	101'941	44'544	629'522
MOB Vevey-les-Pléiades	Nein		302	700	1'846	404	178	388	158	916	934	172	259	1'736	914	8'906
MGB	Ja		6'266	18'311	18'733	19'525	6'651	3'134	8'220	7'879	11'728	7'662	13'392	4'280	1'907	127'686
Glaciereexpress (MGB)	Nein		2'226	809	18'267	22'978	8'853	12'648	35'019	34'639	28'933	37'250	12'973			214'596
MOB	Ja		25'409	50'277	51'175	29'576	1'057	6'407	5'168	2'890	8'681	5'603	4'477	3'527	1'096	195'342
Thurbo	Ja		1'735	24'225	9'604	12'849	6'035	13'038	5'868	1'738	7'621	16'750	11'471	22'452	13'854	147'241
Glaciereexpress (RhB)	Ja		833	840	5'032	8'981	2'243	6'089	16'015	17'040	18'079	22'120	7'637			104'909
RhB	Nein		30'260	120'248	111'854	111'935	70'296	54'236	104'633	136'268	169'299	98'513	92'780	60'395	25'701	1'186'417
SOB	Ja		322	1'147	460	1'131		30	273			349	136	979	926	5'754
Zentralbahn	Ja			493	1'621	874	3'230	564	326	338	5'081	3'948	1'608	173	447	18'703
MGB	Ja		7'722	8'662	10'546	12'377	12'726	13'487	19'520	22'692	28'275	22'763	69'846	31'205	10'011	269'833
MOB Rochers-de-Naye	Nein		19'600	9'198	5'649	4'737	8'685	6'614	17'010	12'681	21'308	15'786	21'986	10'916	10'273	164'444
Gesamt			299'070	775'226	737'120	884'296	529'683	678'249	689'388	563'656	638'385	862'084	980'249	1'014'038	497'276	9'148'722

	Berücksichtigt in Auswertung	Jahr Monat	201813	201901	201902	201903	201904	201905	201906	201907	201908	201909	201910	201911	201912	
SBB	Ja		1.9%	5.1%	4.7%	6.2%	3.9%	5.2%	4.7%	3.2%	3.1%	6.0%	7.0%	8.1%	4.0%	63.0%
SBB GmbH	nur Teil Schweiz		0.2%	0.3%	0.2%	0.2%	0.2%	0.4%	0.1%	0.2%	0.1%	0.1%	0.2%	0.3%	0.2%	2.8%
RegionAlps	Ja		0.0%	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.6%
BLS	Ja		0.1%	0.5%	0.5%	0.7%	0.4%	0.5%	0.4%	0.2%	0.5%	0.6%	0.8%	1.1%	0.5%	6.9%
MOB Vevey-les-Pléiades	Nein		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%
MGB	Ja		0.1%	0.2%	0.2%	0.2%	0.1%	0.0%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%	1.4%
Glaciereexpress (MGB)	Nein		0.0%	0.0%	0.2%	0.3%	0.1%	0.1%	0.4%	0.1%	0.3%	0.4%	0.1%	0.0%	0.0%	2.3%
MOB	Ja		0.3%	0.5%	0.6%	0.3%	0.0%	0.1%	0.1%	0.0%	0.1%	0.1%	0.0%	0.2%	0.0%	2.1%
Thurbo	Ja		0.0%	0.3%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.0%	0.1%	0.2%	0.1%	0.2%	0.2%	1.6%
Glaciereexpress (RhB)	Ja		0.0%	0.0%	0.1%	0.1%	0.0%	0.1%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.1%	0.0%	0.0%	1.1%
RhB	Nein		0.3%	1.3%	1.2%	1.2%	0.8%	0.6%	1.1%	1.5%	1.9%	1.1%	1.0%	0.7%	0.3%	13.0%
SOB	Ja		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%
Zentralbahn	Ja		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%
MGB	Ja		0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.2%	0.2%	0.3%	0.2%	0.8%	0.3%	0.1%	2.9%
MOB Rochers-de-Naye	Nein		0.2%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.2%	0.1%	0.2%	0.2%	0.2%	0.1%	0.1%	1.8%
Gesamt			3.3%	8.5%	8.1%	9.7%	5.8%	7.4%	7.5%	6.2%	7.0%	9.4%	10.7%	11.1%	5.4%	100.0%

Anmerkung: «201813» sind Daten für den Dezember 2018 nach Fahrplanwechsel; «201912» sind Daten für den Dezember 2019 vor Fahrplanwechsel. Es wird somit ein vollständiges Kalenderjahr dargestellt.

Tabellen: SBB.

Der Jahresverlauf der Überlaststunden entspricht den Erwartungen. Die höchsten Anteile an Personenstunden in Überlastsituationen weisen die Monate November und Oktober auf. Die tiefsten Anteile treten in den Ferienmonaten im Sommer auf. Bei den eher auf Tourismus ausgerichteten Bahnen sind die Spitzenwerte eher im Sommer. Die Werte der RhB sind jedoch aus der Auswertung ausgeschlossen worden. Die Nachfrage auf den einzelnen Zügen ist unplausibel hoch. Zudem sind die Fahrzeuggrößen in den Daten oft zu klein in den Daten enthalten. Weitere, vornehmlich touristische Angebote sind in der Auswertung ebenfalls nicht mitberücksichtigt worden. Grund dafür ist, dass für diese teils Sitzplatzreservierungen erforderlich sind oder bei einzelnen Strecken auch eine hohe Anzahl Stehplätze angeboten wird, und diese Strecken dann unplausibel stark ins Gewicht fallen.

Jahresgang und Tagesgang an Werktagen

Die folgenden Tabellen zeigen für die Überlast den Jahresgang und Tagesgang an Werktagen.

Die obere Tabelle beinhaltet absolute Werte der Überlast in Personenstunden pro Jahr. Die untere Tabelle Anteile am Gesamtwert Personenstunden. Die Einfärbung in der unteren Tabelle zeigt hohe Anteile Überlast in rot und tiefe Anteile in blau.

Tabelle 52: Jahresgang und Tagesgang an Werktagen. Obere Tabelle absolute Werte in Personenstunden pro Jahr; untere Tabelle Anteile am Gesamtwert Personenstunden. (Untere Tabelle mit Einfärbung gemäss Anteil: hohe Anteile in rot und tiefe Anteile in blau)

Stunde	201813	201901	201902	201903	201904	201905	201906	201907	201908	201909	201910	201911	201912	Total
0	392			12		11	204	2'824	1'973		65		44	5'525
1					218	4		1'125	418					1'764
2								197						197
3			158	731				94	114					1'097
4		7	797	1'729					77			54		2'664
5	536	2'964	3'316	2'570	2'519	3'099	2'998	3'437	1'979	3'364	3'178	5'757	2'425	38'142
6	13'368	45'606	38'435	56'084	37'088	41'605	29'871	17'937	25'224	53'817	53'904	82'315	33'618	528'871
7	68'609	220'050	189'481	289'156	136'001	227'801	107'385	37'190	81'777	263'505	219'599	359'943	174'299	2'374'795
8	14'703	40'722	38'024	42'699	33'987	42'302	52'735	63'523	15'790	32'867	47'918	54'534	29'006	508'811
9	3'352	14'914	10'248	14'659	9'577	11'308	19'123	17'895	18'798	14'736	25'695	7'466	4'910	172'681
10	7'235	16'001	21'968	21'606	9'571	9'967	16'761	26'049	26'733	16'870	25'616	5'728	4'723	208'828
11	6'471	15'566	16'035	17'395	6'553	4'732	18'737	23'321	26'593	16'162	23'029	6'613	4'785	185'995
12	6'186	12'936	15'720	14'326	7'681	12'343	18'873	15'150	14'685	16'511	19'606	8'800	5'488	168'305
13	12'610	17'921	21'570	22'519	11'400	13'312	15'029	17'349	19'482	13'595	17'356	12'679	9'474	204'298
14	9'235	11'521	11'657	10'472	4'609	8'503	14'422	19'824	23'392	18'336	19'118	7'262	5'401	163'763
15	10'916	26'467	23'806	18'986	9'777	14'671	24'551	16'766	24'451	23'185	24'585	18'138	8'244	244'542
16	19'629	54'175	48'305	50'582	31'384	40'920	49'345	23'030	35'536	48'670	59'420	65'422	33'576	559'993
17	34'007	142'500	134'892	140'423	98'676	109'757	74'755	56'444	80'705	144'091	175'446	208'220	91'786	1'491'702
18	13'394	44'768	36'154	36'468	29'472	35'737	37'381	26'858	24'581	36'790	51'090	59'573	27'766	460'031
19	6'143	11'520	10'128	11'075	10'282	8'126	17'068	9'858	6'357	9'493	18'178	10'806	8'187	137'221
20	2'874	4'795	5'244	3'481	2'885	2'074	3'698	2'382	3'542	3'434	7'697	4'258	3'150	49'515
21	991	3'309	2'848	2'066	2'145	2'460	1'327	1'676	3'767	1'282	6'065	3'469	2'062	33'467
22	952	1'556	2'887	1'704	679	1'713	2'997	1'633	1'478	2'236	4'753	3'295	3'996	29'879
23	1'751	1'566	1'744	1'137	1'715	2'329	3'071	1'963	1'049	1'467	684	2'844	806	22'126
Total	233'356	688'864	633'418	759'881	446'220	592'771	510'331	386'525	438'500	720'412	803'003	927'176	453'744	7'594'201

Stunde	201813	201901	201902	201903	201904	201905	201906	201907	201908	201909	201910	201911	201912	Total
0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.03%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.1%
1	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.0%
2	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.0%
3	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.0%
4	0.00%	0.00%	0.01%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.0%
5	0.01%	0.03%	0.04%	0.03%	0.03%	0.03%	0.03%	0.04%	0.02%	0.04%	0.03%	0.06%	0.03%	0.4%
6	0.15%	0.50%	0.42%	0.61%	0.41%	0.45%	0.33%	0.20%	0.28%	0.59%	0.59%	0.90%	0.37%	5.8%
7	0.75%	2.41%	2.07%	3.16%	1.49%	2.49%	1.17%	0.41%	0.89%	2.88%	2.40%	3.93%	1.91%	26.0%
8	0.16%	0.45%	0.42%	0.47%	0.37%	0.46%	0.58%	0.69%	0.17%	0.36%	0.52%	0.60%	0.32%	5.8%
9	0.04%	0.16%	0.11%	0.16%	0.10%	0.12%	0.21%	0.20%	0.21%	0.16%	0.28%	0.08%	0.05%	1.9%
10	0.08%	0.17%	0.24%	0.24%	0.10%	0.11%	0.16%	0.28%	0.29%	0.18%	0.28%	0.06%	0.05%	2.3%
11	0.07%	0.17%	0.18%	0.19%	0.07%	0.05%	0.20%	0.25%	0.29%	0.18%	0.25%	0.07%	0.05%	2.0%
12	0.07%	0.14%	0.17%	0.16%	0.08%	0.13%	0.21%	0.17%	0.16%	0.18%	0.21%	0.10%	0.06%	1.8%
13	0.14%	0.20%	0.24%	0.25%	0.12%	0.15%	0.16%	0.19%	0.21%	0.15%	0.19%	0.14%	0.10%	2.2%
14	0.10%	0.13%	0.13%	0.11%	0.05%	0.09%	0.16%	0.22%	0.26%	0.20%	0.21%	0.08%	0.06%	1.8%
15	0.12%	0.29%	0.26%	0.21%	0.11%	0.16%	0.27%	0.18%	0.27%	0.25%	0.27%	0.20%	0.09%	2.7%
16	0.21%	0.59%	0.53%	0.55%	0.34%	0.45%	0.54%	0.25%	0.39%	0.53%	0.65%	0.72%	0.37%	6.1%
17	0.37%	1.56%	1.47%	1.53%	1.08%	1.20%	0.82%	0.62%	0.88%	1.57%	1.92%	2.28%	1.00%	16.3%
18	0.15%	0.49%	0.40%	0.40%	0.32%	0.39%	0.41%	0.29%	0.27%	0.40%	0.56%	0.65%	0.30%	5.0%
19	0.07%	0.13%	0.11%	0.12%	0.11%	0.09%	0.19%	0.11%	0.07%	0.10%	0.20%	0.12%	0.09%	1.5%
20	0.03%	0.05%	0.06%	0.04%	0.03%	0.02%	0.04%	0.03%	0.04%	0.04%	0.08%	0.05%	0.03%	0.5%
21	0.01%	0.04%	0.03%	0.02%	0.02%	0.03%	0.01%	0.02%	0.04%	0.01%	0.07%	0.04%	0.02%	0.4%
22	0.01%	0.02%	0.03%	0.02%	0.01%	0.02%	0.03%	0.02%	0.02%	0.02%	0.05%	0.04%	0.04%	0.3%
23	0.02%	0.02%	0.02%	0.01%	0.02%	0.03%	0.03%	0.02%	0.01%	0.02%	0.01%	0.03%	0.01%	0.2%
Total	2.6%	7.5%	6.9%	8.3%	4.9%	6.5%	5.6%	4.2%	4.8%	7.9%	8.8%	10.1%	5.0%	83.0%

Anmerkung: «201813» sind Daten für den Dezember 2018 nach Fahrplanwechsel; «201912» sind Daten für den Dezember 2019 vor Fahrplanwechsel. Es wird somit ein vollständiges Kalenderjahr dargestellt.

Tabellen SBB

Im Tagesgang ist die Konzentration der Überlastsituationen auf die Hauptverkehrszeiten deutlich zu erkennen. Zwischen 7 und 8 Uhr fallen 26% der Personenstunden in Überlast an und zwischen 17–18 Uhr sind es deren 16.3%. Dies sind auch die Stunden, in denen gemäss MZMV 2015 der Anteil mobiler Personen im Tagesverlauf am höchsten ist. Insgesamt fallen 83% der

gesamten Personenstunden in Überlast an Werktagen an. Der Verlauf über die Monate zeigt wiederum deutlich die erhöhte Nachfrage im Monat November sowie die entspanntere Situation in den Ferienmonaten.

Jahresgang und Tagesgang an Samstagen

Die folgenden Tabellen zeigen für die Überlast den Jahresgang und Tagesgang an Samstagen. Die obere Tabelle beinhaltet absolute Werte der Überlast in Personenstunden pro Jahr. Die untere Tabelle Anteile am Gesamtwert Personenstunden. Die Einfärbung in der unteren Tabelle zeigt hohe Anteile Überlast in rot und tiefe Anteile in blau.

Tabelle 53: Jahresgang und Tagesgang an Samstagen. Obere Tabelle absolute Werte in Personenstunden pro Jahr; untere Tabelle Anteile am Gesamtwert Personenstunden. (Untere Tabelle mit Einfärbung gemäss Anteil: hohe Anteile in rot und tiefe Anteile in blau)

Stunde	201813	201901	201902	201903	201904	201905	201906	201907	201908	201909	201910	201911	201912	Total
0	501	404	998	869	838	889	1'293	1'721	3'526	1'124	1'161	1'796	324	15'444
1	187	107	85	350	206		617	1'128	909	209	384	408	385	4'974
2	93	146			62		284	179	162	101	8			1'035
3				421				550	131					1'102
4				319				227						547
5			67	113				918	429		67			1'662
6	16	29		63	44	16	332	61	1'043			10		1'614
7	51	1'038	145	942	94	506	2'147	3'480	1'137	1'530	2'448	706	214	14'439
8	1'235	2'678	3'362	4'611	4'023	2'705	11'147	5'239	5'104	8'360	9'660	2'157	1'416	61'699
9	665	1'848	2'819	4'775	4'384	4'411	6'640	11'151	10'251	8'618	9'171	2'106	1'426	68'265
10	1'783	2'621	6'669	7'887	1'680	6'966	6'504	5'533	8'651	9'681	11'309	5'883	2'512	77'678
11	2'974	2'393	8'242	5'701	1'471	4'271	7'922	9'962	8'519	6'263	6'512	3'150	737	68'118
12	2'174	2'078	5'300	5'300	2'121	2'633	6'680	10'272	8'079	4'419	4'235	2'400	722	56'415
13	4'029	2'572	3'921	8'163	2'674	3'965	3'061	8'004	9'374	3'710	4'616	4'522	860	59'471
14	1'687	1'017	3'116	3'335	1'468	3'568	3'858	4'868	8'558	3'667	3'800	2'656	704	42'302
15	3'535	1'904	3'205	4'518	3'448	7'863	4'164	3'250	7'373	2'454	6'509	5'495	1'241	54'959
16	2'763	5'262	4'694	4'651	3'527	6'237	6'918	3'998	6'876	5'023	8'372	6'549	3'379	68'250
17	3'073	3'963	3'540	5'323	3'349	4'159	6'602	6'655	6'873	6'614	6'770	9'484	3'913	70'319
18	2'752	1'801	3'301	3'783	1'814	2'714	4'785	6'083	6'183	5'885	5'571	5'789	2'803	53'265
19	682	2'266	1'027	1'153	516	658	2'566	4'250	4'055	2'594	4'886	3'122	919	28'695
20	649	113	366	491	434	538	1'951	2'602	1'285	1'586	2'019	477	431	12'943
21	413	378	341	680	2'525	2'327	1'410	3'188	2'881	804	1'709	219	1'529	18'404
22	558	487	506	2'714	884	1'013	1'940	1'494	1'175	885	1'290	1'257	477	14'682
23	746	292	1'162	1'626	664	272	2'862	3'207	2'820	1'196	3'485	4'034	301	22'668
Total	30'566	33'397	52'868	67'790	36'227	55'713	83'682	98'020	105'396	74'725	93'984	62'288	24'294	818'950
														9'148'722

Stunde	201813	201901	201902	201903	201904	201905	201906	201907	201908	201909	201910	201911	201912	Total
0	0.01%	0.00%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.02%	0.04%	0.01%	0.01%	0.02%	0.00%	0.2%
1	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.01%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.1%
2	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.0%
3	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.0%
4	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.0%
5	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.0%
6	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.0%
7	0.00%	0.01%	0.00%	0.01%	0.00%	0.01%	0.02%	0.04%	0.01%	0.02%	0.03%	0.01%	0.00%	0.2%
8	0.01%	0.03%	0.04%	0.05%	0.04%	0.03%	0.12%	0.06%	0.06%	0.09%	0.11%	0.02%	0.02%	0.7%
9	0.01%	0.02%	0.03%	0.05%	0.05%	0.05%	0.07%	0.12%	0.11%	0.09%	0.10%	0.02%	0.02%	0.7%
10	0.02%	0.03%	0.07%	0.09%	0.02%	0.08%	0.07%	0.06%	0.09%	0.11%	0.12%	0.06%	0.03%	0.8%
11	0.03%	0.03%	0.09%	0.06%	0.02%	0.05%	0.09%	0.11%	0.09%	0.07%	0.07%	0.03%	0.01%	0.7%
12	0.02%	0.02%	0.06%	0.06%	0.02%	0.03%	0.07%	0.11%	0.09%	0.05%	0.05%	0.03%	0.01%	0.6%
13	0.04%	0.03%	0.04%	0.09%	0.03%	0.04%	0.03%	0.09%	0.10%	0.04%	0.05%	0.05%	0.01%	0.7%
14	0.02%	0.01%	0.03%	0.04%	0.02%	0.04%	0.04%	0.05%	0.09%	0.04%	0.04%	0.03%	0.01%	0.5%
15	0.04%	0.02%	0.04%	0.05%	0.04%	0.09%	0.05%	0.04%	0.08%	0.03%	0.07%	0.06%	0.01%	0.6%
16	0.03%	0.06%	0.05%	0.05%	0.04%	0.07%	0.08%	0.04%	0.08%	0.05%	0.09%	0.07%	0.04%	0.7%
17	0.03%	0.04%	0.04%	0.06%	0.04%	0.05%	0.07%	0.07%	0.08%	0.07%	0.07%	0.10%	0.04%	0.8%
18	0.03%	0.02%	0.04%	0.04%	0.02%	0.03%	0.05%	0.07%	0.07%	0.06%	0.06%	0.06%	0.03%	0.6%
19	0.01%	0.02%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.03%	0.05%	0.04%	0.03%	0.05%	0.03%	0.01%	0.3%
20	0.01%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.01%	0.02%	0.03%	0.01%	0.02%	0.02%	0.01%	0.00%	0.1%
21	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.03%	0.03%	0.02%	0.03%	0.03%	0.01%	0.02%	0.00%	0.02%	0.2%
22	0.01%	0.01%	0.01%	0.03%	0.01%	0.01%	0.02%	0.02%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.2%
23	0.01%	0.00%	0.01%	0.02%	0.01%	0.00%	0.03%	0.04%	0.03%	0.01%	0.04%	0.04%	0.00%	0.2%
Total	0.3%	0.4%	0.6%	0.7%	0.4%	0.6%	0.9%	1.1%	1.2%	0.8%	1.0%	0.7%	0.3%	9.0%

Anmerkung: «201813» sind Daten für den Dezember 2018 nach Fahrplanwechsel. «201912» sind Daten für den Dezember 2019 vor Fahrplanwechsel. Es wird somit ein vollständiges Kalenderjahr dargestellt.

Tabellen: SBB.

Insgesamt fallen 9% aller Personenstunden in Überlastsituationen auf die Samstage. Im Gesamtbild zeigt sich, dass diese Situationen eher am Samstagvormittag auftreten und in den Sommermonaten bis und mit Oktober häufiger sind. Dies sind auch die Stunden, in denen gemäss MZMV 2015 der Anteil mobiler Personen am Tagesverlauf am höchsten ist.

Jahresgang und Tagesgang an Sonn- und Feiertagen

Die folgenden Tabellen zeigen für die Überlast den Jahresgang und Tagesgang an Sonn- und Feiertagen. Die obere Tabelle beinhaltet absolute Werte der Überlast in Personenstunden pro Jahr. Die untere Tabelle Anteile am Gesamtwert Personenstunden. Die Einfärbung in der unteren Tabelle zeigt hohe Anteile Überlast in rot und tiefe Anteile in blau.

Tabelle 54: Jahresgang und Tagesgang an Sonn- und Feiertagen. Obere Tabelle absolute Werte in Personenstunden pro Jahr; untere Tabelle Anteile am Gesamtwert Personenstunden. (Untere Tabelle mit Einfärbung gemäss Anteil: hohe Anteile in rot und tiefe Anteile in blau)

Stunde	201813	201901	201902	201903	201904	201905	201906	201907	201908	201909	201910	201911	201912	Total
0	184	43		101	252		347	676	189	100		106	209	2'207
1	431	713	535	70	593	200	828	573	999	238	706	567	333	6'785
2		1'357	265	190		18		743	1'516	165	18	333	89	4'694
3		1'420	98	1'153				708	642	49				4'069
4		21		796				149	805					1'771
5		146	75	309			149	670	178			75		1'602
6		93		170				439	636	26	62	360		1'844
7	44	276	49	412	54	669	403	550	1'022	113	562			4'153
8	481	432	887	524	359	665	2'964	1'451	594	1'546	1'425	243	35	11'605
9	2'018	1'219	2'040	998	3'017	2'771	2'707	3'210	4'531	2'016	3'991	252	212	28'983
10	2'825	3'770	4'420	3'655	3'532	1'853	3'120	3'721	8'262	2'230	5'245	721	275	43'628
11	4'306	5'754	3'997	4'364	4'294	2'328	4'806	3'342	7'267	3'384	5'077	774	527	50'221
12	2'559	3'108	3'175	2'077	1'322	1'193	5'478	5'908	4'116	4'587	6'556	444	674	41'196
13	5'610	7'603	2'951	5'466	5'954	2'097	5'710	8'325	6'101	5'518	4'623	2'091	911	62'959
14	2'515	2'731	4'533	3'364	3'542	3'003	6'939	6'058	5'463	7'053	3'573	1'637	1'195	51'607
15	2'738	5'978	4'845	3'407	6'692	1'924	7'541	4'418	9'668	8'771	6'731	2'578	2'042	67'333
16	1'469	5'885	6'342	7'132	4'269	3'891	12'702	4'373	12'838	7'859	7'496	3'176	1'384	78'817
17	2'999	2'836	7'311	6'008	4'417	1'688	15'816	8'970	11'339	7'629	13'039	1'606	4'166	87'826
18	5'019	1'316	4'062	5'042	2'298	1'368	8'994	3'918	6'083	3'217	7'063	1'325	2'016	51'721
19	777	3'604	1'699	4'672	815	3'392	5'036	11'880	7'051	6'901	10'864	6'818	3'402	66'913
20	363	3'491	687	4'631	991	1'094	5'021	5'676	2'463	2'661	3'382	784	268	31'514
21	506	1'113	2'797	2'083	2'108	795	6'517	3'094	2'102	2'121	2'440	345	593	26'616
22	188	55			2'688	532	109	60	226	564	409	338	75	5'245
23	116		65			265	189	199	397	201				2'264
Total	35'148	52'965	50'834	56'625	47'236	29'766	95'376	79'111	94'489	66'947	83'262	24'574	19'238	735'571
														9'148'722

Stunde	201813	201901	201902	201903	201904	201905	201906	201907	201908	201909	201910	201911	201912	Total
0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.09%
1	0.00%	0.01%	0.01%	0.00%	0.01%	0.00%	0.01%	0.01%	0.01%	0.00%	0.01%	0.01%	0.00%	0.1%
2	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.1%
3	0.00%	0.02%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.0%
4	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.0%
5	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.0%
6	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.0%
7	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.01%	0.01%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.0%
8	0.01%	0.00%	0.01%	0.01%	0.00%	0.01%	0.03%	0.02%	0.01%	0.02%	0.02%	0.00%	0.00%	0.1%
9	0.02%	0.01%	0.02%	0.01%	0.03%	0.03%	0.03%	0.04%	0.05%	0.02%	0.04%	0.00%	0.00%	0.3%
10	0.03%	0.04%	0.05%	0.04%	0.04%	0.02%	0.03%	0.04%	0.09%	0.02%	0.06%	0.01%	0.00%	0.5%
11	0.05%	0.06%	0.04%	0.05%	0.05%	0.03%	0.05%	0.04%	0.08%	0.04%	0.06%	0.01%	0.01%	0.5%
12	0.03%	0.03%	0.03%	0.02%	0.01%	0.01%	0.06%	0.06%	0.04%	0.05%	0.07%	0.00%	0.01%	0.5%
13	0.06%	0.08%	0.03%	0.06%	0.07%	0.02%	0.06%	0.09%	0.07%	0.06%	0.05%	0.02%	0.01%	0.7%
14	0.03%	0.03%	0.05%	0.04%	0.04%	0.03%	0.08%	0.07%	0.06%	0.08%	0.04%	0.02%	0.01%	0.6%
15	0.03%	0.07%	0.05%	0.04%	0.07%	0.02%	0.08%	0.05%	0.11%	0.10%	0.07%	0.03%	0.02%	0.7%
16	0.02%	0.06%	0.07%	0.08%	0.05%	0.04%	0.14%	0.05%	0.14%	0.09%	0.08%	0.03%	0.02%	0.9%
17	0.03%	0.03%	0.08%	0.07%	0.05%	0.02%	0.17%	0.10%	0.12%	0.08%	0.14%	0.02%	0.05%	1.0%
18	0.05%	0.01%	0.04%	0.06%	0.03%	0.01%	0.10%	0.04%	0.07%	0.04%	0.08%	0.01%	0.02%	0.6%
19	0.01%	0.04%	0.02%	0.05%	0.01%	0.04%	0.06%	0.13%	0.08%	0.08%	0.12%	0.07%	0.04%	0.7%
20	0.00%	0.04%	0.01%	0.05%	0.01%	0.01%	0.05%	0.06%	0.03%	0.03%	0.04%	0.01%	0.00%	0.3%
21	0.01%	0.01%	0.03%	0.02%	0.02%	0.01%	0.07%	0.03%	0.02%	0.02%	0.03%	0.00%	0.01%	0.3%
22	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.03%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.1%
23	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.0%
Total	0.4%	0.6%	0.6%	0.6%	0.5%	0.3%	1.0%	0.9%	1.0%	0.7%	0.9%	0.3%	0.2%	8.0%

Anmerkung: «201813» sind Daten für den Dezember 2018 nach Fahrplanwechsel «201912» sind Daten für den Dezember 2019 vor Fahrplanwechsel. Es wird somit ein vollständiges Kalenderjahr dargestellt.

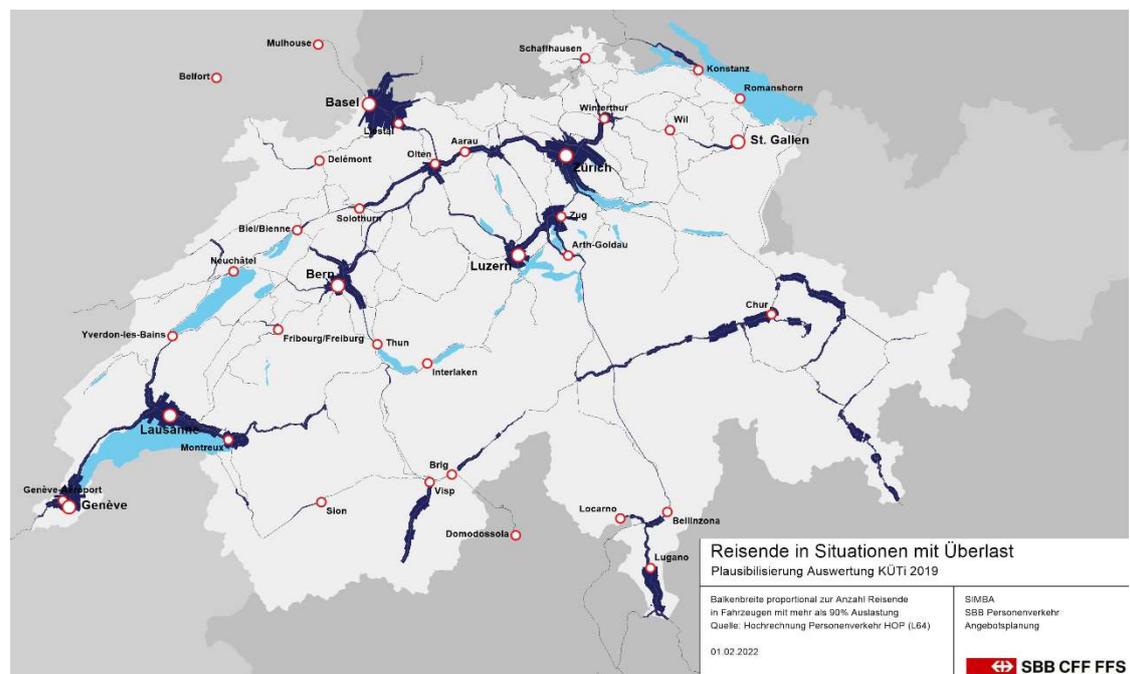
Tabellen SBB

Insgesamt fallen 8% aller Personenstunden in Überlastsituationen auf die Sonn- und Feiertage. Im Gesamtbild zeigt sich, dass diese Situationen eher am Sonntagnachmittag bis Abend auftreten und in den Sommermonaten bis und mit Oktober häufiger sind. Die tageszeitliche Verteilung korrespondiert auch wieder mit dem Anteil mobiler Personen am Tagesverlauf gemäss MZMV 2015.

Überlastsituationen im Bahnnetz 2019

Die folgende Abbildung zeigt die Reisenden in Situationen mit Überlast im Jahr 2019.

Abbildung 40: Reisende in Situationen mit Überlast im Jahr 2019 (Überlast = Auslastung > 90% Sitzplatzangebot)



Grafik SBB

Die Darstellung zeigt, dass ein Grossteil der Überlast in der Nähe der Agglomerationszentren entsteht. Oft handelt es sich dabei um RV-Angebote bei denen die Dimensionierung des Rollmaterials mit Berücksichtigung der Stehplatzkapazitäten der Fahrzeuge vorgenommen werden. Dabei werden im Rahmen der Planung im Dreieck «Nachfrage – Rollmaterial – Infrastruktur» auch Stehplätze bewusst in Kauf genommen.

Fazit Plausibilisierung

Die HOP-Daten zeigen prinzipiell Überlastsituationen, wo und wann diese auch erwartet werden. Sie sind somit plausibel. Aufgrund der Analysen wird in der definitiven Auswertung die

RhB auf Grund von unplausiblen Daten nicht mehr berücksichtigt werden. Auch die mehrheitlich touristischen Angebote Glacierexpress und die Ausflugslinien der MOB sowie die Leistungen der SBB GmbH in Deutschland werden nicht berücksichtigt.

Zu 3: Ergebnisse 2019, 2020 und 2021

Die folgende Tabelle zeigt die Personenstunden der Reisenden in überlasteten Zügen (Nachfrage > 90% der Anzahl Sitzplätze) für die Jahre 2019, 2020 und 2021.

Tabelle 55: Personenstunden der Reisenden in überlasteten Zügen (Nachfrage > 90% der Anzahl Sitzplätze)

	2019	2020	2021
Fernverkehr	1'590'748	420'507	593'651
Regionalverkehr	5'562'601	1'743'433	965'809
Summe	7'153'349	2'163'940	1'559'460

Quelle SBB

Die 7.2 Mio. Personenstunden im Jahr 2019 entsprechen rund 2.7% der gesamten Anzahl Personenstunden im hier betrachteten Bahnverkehr. Der Rückgang der Überlast im Jahr 2020 und 2021 gegenüber 2019 ist mit der COVID-Pandemie zu erklären. Das auch 2021 ein Rückgang gegenüber 2020 erfolgte, ergibt sich aus mehreren Faktoren: Zum einen waren zumindest Anfang 2020 noch keine Restriktionen ergriffen worden, während im Jahr 2021 das ganze Jahr mehr oder weniger starke Restriktionen bestanden.

4.3.3. Mengengerüste regionaler Busverkehr

Die Schätzung der Komfortverlustkosten im regionalen Busverkehr basiert auf der RPV-Datenbank. Diese Datenbank stellt Auslastungen je Linie als Durchschnitt über das gesamte Jahr zur Verfügung. Zudem ist die Summe der Personenkilometer im Jahr auf der Linie angegeben. Tägliche Spitzenauslastungen sowie Schwankungen der Auslastung im Wochen- oder Jahresverlauf sind nicht erkennbar. Deshalb musste ein Verfahren zur Schätzung des Anteils an Fahrten im überlasteten Zustand entwickelt werden.

Das Verfahren beruht darauf, dass für eine Stichprobe effektiver Auslastungszählungen für sieben PostAuto-Linien (siehe unten Schritt 1a) Verteilungsdichtekurven geschätzt werden, welche die Verteilung der Auslastungen innerhalb eines Jahres abbilden. In einem zweiten Schritt wird diese geschätzte Verteilungskurve den einzelnen Linien der RPV-Datenbank hinterlegt und anhand der mittleren Auslastung der Linie verschoben, um den Anteil an Fahrten im überlasteten Zustand zu ermitteln. Dieses Vorgehen wird in Folge näher beschrieben entlang der einzelnen Schritte beschrieben:

1. Anhand der Stichproben-Zählraten:
 - a. Ermittlung von Verteilungsfunktionen aus den Stichproben-Zählraten
 - b. Schätzung der Verteilungsdichtekurven und der entsprechenden Mittelwerte
 - c. Schätzung des Fahrtanteils im überlasteten Zustand
2. Anhand der RPV-Datenbank:
 - a. Ermittlung der Differenz zwischen den Stichprobenmittelwert und den Mittelwert der Linie für jede einzelne Linie.
 - b. Verschiebung der Verteilungskurve in der Höhe der Differenz der Mittelwerte zwischen dem der Stichprobe und dem der beobachteten Mittelwerte in der Linie.
 - c. Schätzung des Anteils an Fahrten im überlasteten Zustand.
3. Schätzung der Summe der Personenstunden welche in einem Streckenabschnitt im überlasteten Zustand verkehren

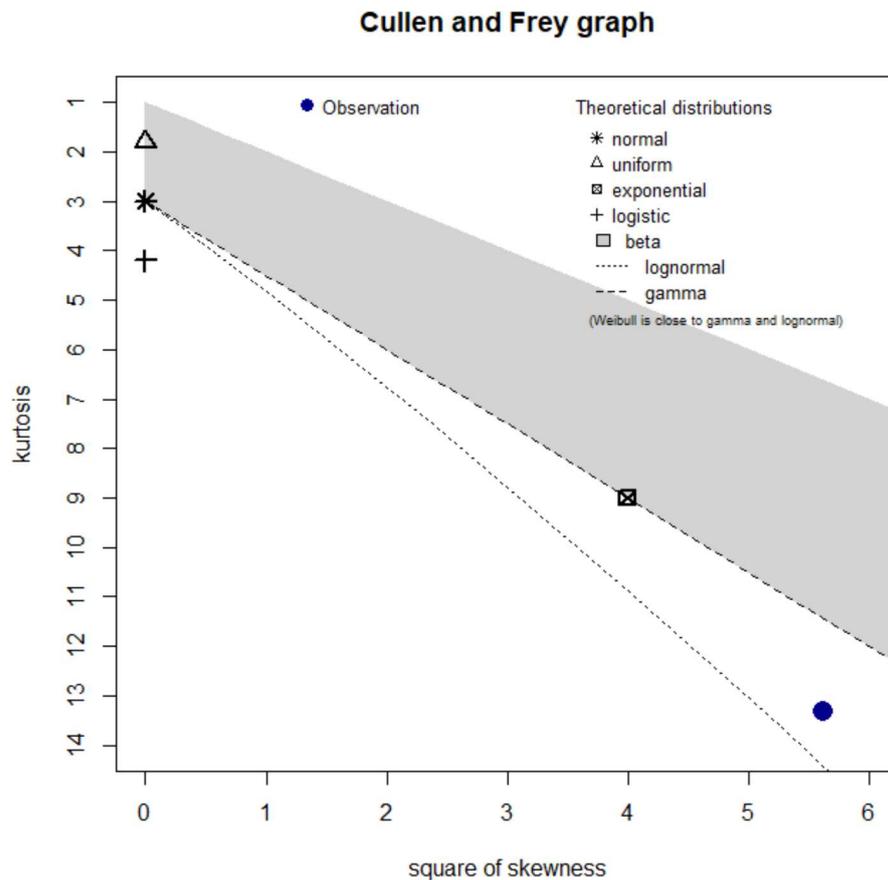
Jeder einzelne Schritt wird nun detailliert beschrieben:

Zu 1a: Ermittlung potenzieller Verteilungsdichtekurven der Auslastung

Die Stichprobe für die Ermittlung der Verteilungsdichtekurven besteht aus rohen Zählraten (jede Fahrt jedes Kurses für den Zeitraum eines Jahres) für sieben PostAuto-Linien für den Zeitraum eines gesamten Jahres. Es wurde darauf geachtet, dass die Linien die massgeblichen Nachfrageprofile des regionalen Busverkehrs (Pendlerverkehr, Grunderschliessung und touristische Nachfrage) abgedeckt sind. Die Auswahl der Linien wurde durch PostAuto vorgenommen. Eine klare Abgrenzung der Nachfrageprofile ist allerdings nicht möglich, da touristische Linien z.B. unter der Woche oft auch Zentren bedienen und hohe Auslastungen aufgrund des Pendlerverkehrs innerorts haben können. Abbildung 42 zeigt die Auslastungsverteilung der Daten.

Abbildung 41 stellt das Cullen & Frey Diagramm für die Stichprobe der Regionalbuslinien dar. Anhand dieses Diagramms wurde der Entscheid für eine Lognormal Verteilung gefällt, da diese am nächsten zu der Verteilung der beobachteten Daten liegt.

Abbildung 41: Cullen & Frey Grafiken der Verteilungen für Stichprobedaten des Busverkehrs



Grafik EBP.

Zu 1b Schätzung der Verteilungsdichtekurven

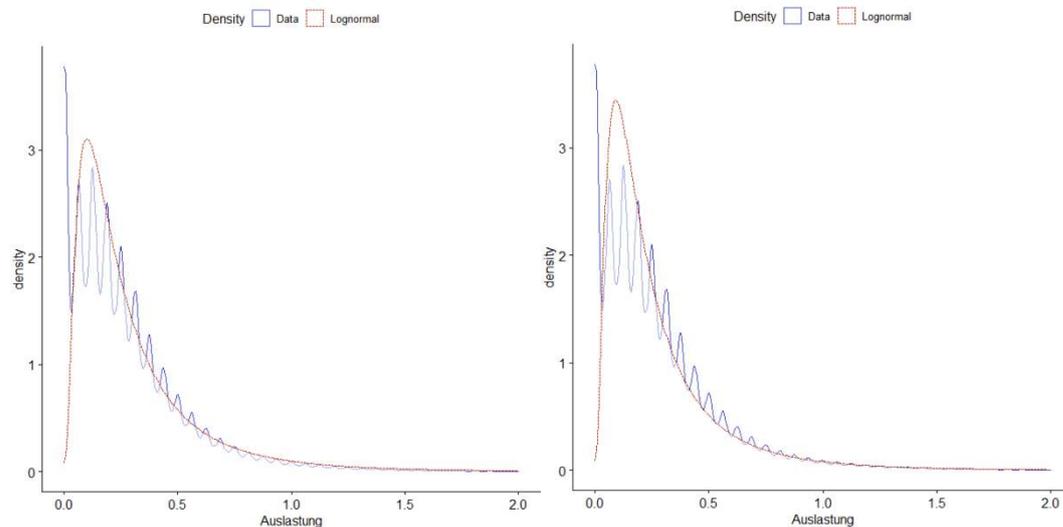
Der nächste Schritt beinhaltet die Schätzung der Parameter der Lognormal Verteilungsdichtekurve anhand der Zählraten. Dies erfolgte mit der statistischen Software R. Die Schätzung der Lognormal Verteilung für den Busverkehr erfolgte ohne Einbindung der vielen Nullwerte²⁸ in der Stichprobe, da diese die Aussagekraft der Verteilungsdichtekurve im überlasteten Bereich sehr stark verzerren. Falls die geschätzte Kurve stark von der beobachteten Kurve abweicht, besteht das Risiko die Anzahl Fahrten im überlasteten Zustand und somit die Summe der Komfortverlustkosten für den regionalen Busverkehr stark zu über- oder unterschätzen. Dies wird in der Abbildung 42 dargestellt. Die linke Grafik entspricht einer ersten Schätzung der Lognormal-Verteilungsdichtekurve (rote Kurve mit Nullwerten). Die blaue Kurve entspricht in der rechten und linken Darstellung den jeweils hinterlegten Messdaten. Aufgrund der Stichprobengröße

²⁸ Aus den Daten ist nicht ersichtlich, ob Nullwerte keiner Datenverfügbarkeit oder einer effektiven Nachfrage von Null entsprechen.

sind hier «Wellen» zu beobachten und es erfolgt keine «Glättung» wie sie bei einer grösseren Stichprobe zu erwarten wäre. Das Histogramm in Abbildung 43 soll diese Problematik der geringen Stichprobe verdeutlichen. Es ist gut zu sehen, dass gewisse Auslastungswerte in der Stichprobe nie gemessen wurden. Im überlasteten Bereich ist die Fläche unter der roten Kurve (Lognormal- Verteilungsdichtekurve) allerdings deutlich grösser als die der blauen Kurve (Verteilung der Zähl-daten), was zu einer Überschätzung der Komfortverlustkosten anhand der geschätzten Verteilung führen würde. Die Lognormal-Verteilungsdichtekurve in der rechten Grafik (ohne Nullwerte) andererseits, weist eine Fläche unter der Kurve im überlasteten Bereich aus, die nah an der beobachteten Verteilungskurve liegt, wodurch der Fehler geringer ist. Die Höhe solcher Fehler mögen für eine einzelne Fahrt einer beliebigen Linie zwar gering sein, diese gewinnen jedoch an Bedeutung bei der Schätzung der Summe aller Kurse über ein Jahr.

Mittels dieser Kurven kann anschliessend anhand der RPV-Daten der Anteil an Personen einer Linie geschätzt werden, die einen überlasteten Zustand ausgesetzt sind.

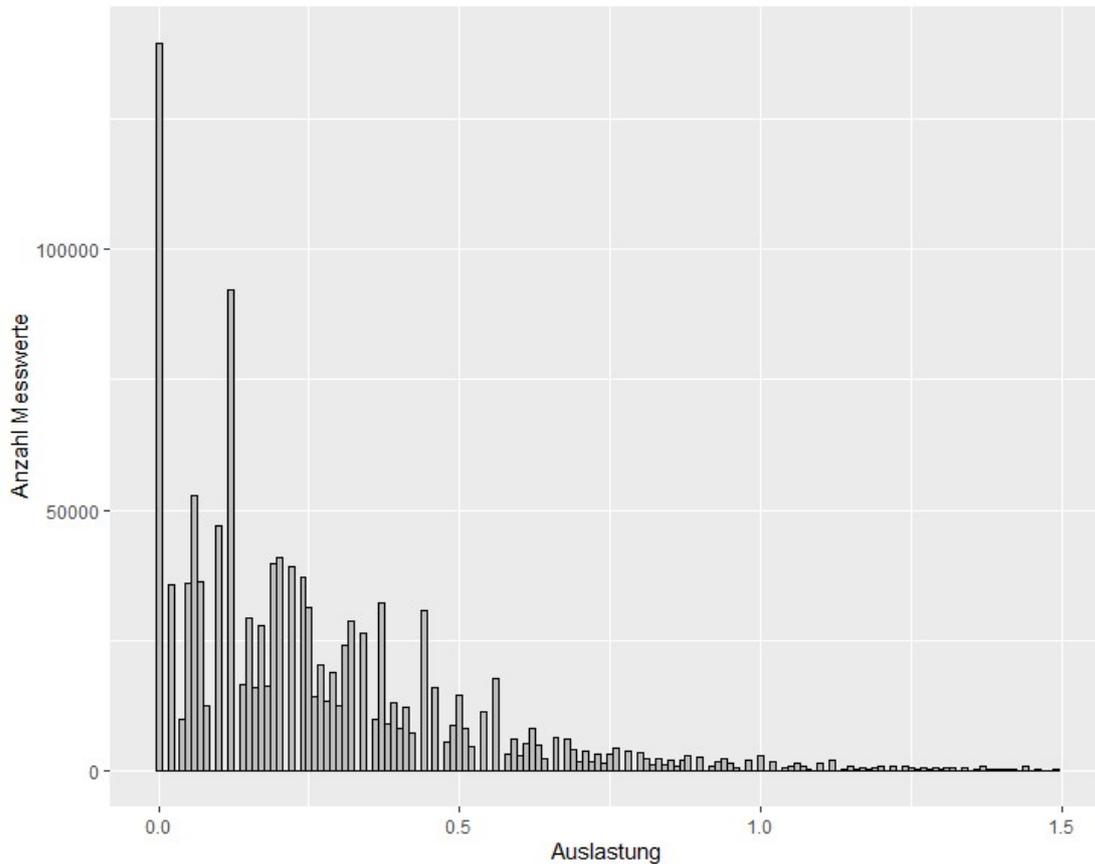
Abbildung 42: Gegenüberstellung der beobachteten (blau) und geschätzte Lognormal Verteilungsdichtekurven der Auslastungen (rot) für den regionalen Busverkehr



Linke Grafik: Lognormal-Dichtekurve vor der Korrektur (mit Nullwerte). Rechte Grafik: Lognormal-Dichtekurve nach der Korrektur (ohne Nullwerte)

Grafik EBP.

Abbildung 43: Histogramm der Auslastungen für den regionalen Busverkehr (Überlast = Auslastung > 90%)



Zu 1c: Schätzung des Fahrtanteils im überlasteten Zustand

Der anhand der Verteilungsdichtekurven ermittelten Anteil an Personen, die einer Fahrt im überlasteten Zustand ausgesetzt sind, liefert die Summe der Personen, die im überlasteten Zustand verkehren. Da die Zielgrösse des Mengengerüsts aber Personenstunden im überlasteten Zustand ist, müssen noch die Stunden die jede Person im Schnitt diesen Zustand ausgesetzt sind auch geschätzt werden. Dieser Wert wurde für die Zähl Daten berechnet und für die Schätzung der Kennzahl *Fahrplanstunden/Person im überlasteten Zustand* verwendet.

Für jede Fahrt in den Zähl Daten, die mindestens einen Streckenabschnitt in Überlast aufwies, wurde der Anteil der Streckenabschnitte in Überlast berechnet und anschliessend über alle Linien gemittelt. Dieser Wert beträgt 25.5%

Zu 2 Ermittlung des Anteils Fahrten im überlasteten Zustand anhand RPV-Datenbank

Die verbleibenden Schritte zielen darauf ab, anhand der geschätzten Verteilungsdichtekurven den Anteil an Fahrten im überlasteten Zustand anhand der RPV-Datenbank zu schätzen. Die Da-

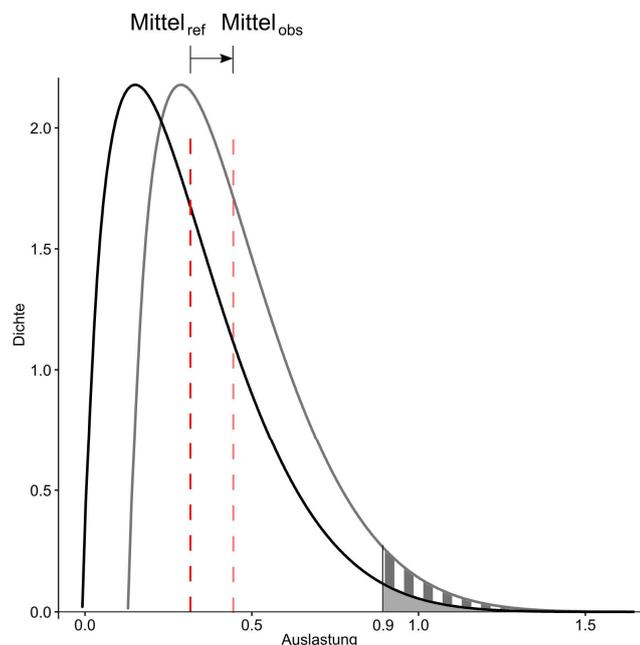
tengrundlage ist die RPV-Datenbank, in der linienbezogene Kennzahlen im regionalen Busverkehr zusammengefasst werden. Es wurden aus dieser Datenbank die folgenden Kennzahlen im Rahmen der vorliegenden Schätzung verwendet (kursive Kennzahlen stehen für aus den RPV-Kennzahlen abgeleiteten Kennzahlen):

- *Auslastung* = Personenkilometer/Platzkilometer
- *Passagiere* = Personenkilometer/Linienlänge
- *Fahrplanstunden/Person im überlasteten Zustand* = $0.255 * \text{Fahrplanstunden} / (\text{Kurs-km} + \text{Kurs-km der Beiwagen}) / \text{Linienlänge}$

Die Kennzahlen aus der RPV-Datenbank sind Summen über das gesamte Fahrplanjahr.

Die geschätzten Verteilungsdichtekurven werden für alle Linien der entsprechenden Kategorie hinterlegt. Um den Anteil an Fahrten im überlasteten Zustand zu schätzen, wird die Abweichung zwischen den beobachteten Mittelwert einer Linie in der RPV-Datenbank gegenüber dem Mittelwert der Stichprobe, die der Verteilungsdichtekurve hinterlegt, gesetzt. Die Verteilungsdichtekurve wird in Folge über den Betrag dieser Abweichung entlang der x-Achse verschoben. Das Prozedere wird anhand von Abbildung 44 graphisch erläutert.

Abbildung 44: Methodik zur Ermittlung des Anteils an Fahrten im überlasteten Zustand anhand der Verteilungsdichtekurve der Auslastungen



Die Fläche unter der Dichtekurve und ab einer Auslastung von 0.9 bedingt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Fahrtabschnitt überlastet ist.

Grafik EBP.

Die linke Verteilungsdichtekurve in Abbildung 44 und der damit zusammenhängende Mittelwert $Mittel_{ref}$ entspricht der aus den Zähl­daten geschätzten Verteilungsdichtekurve. Die leichtgraue Fläche entspricht dem Prozentsatz an Fahrten im überlasteten Zustand (>90% Auslastung) für die anhand der Stichproben geschätzten Verteilungsdichtekurve. Der $Mittel_{obs}$ entspricht dem Mittelwert der Auslastung eines beliebigen Streckenabschnitts. Dieser liegt über $Mittel_{ref}$, was bedeutet, dass dieser Streckenabschnitt erwartungsweise einen höheren Anteil an Fahrten im überlasteten Zustand hat als der Durchschnitt der Stichprobedaten. Um diesen Anteil zu schätzen, wird die Verteilungsdichtekurve entlang der x-Achse um den Betrag der Differenz zwischen beide Mittelwerten verschoben. Der somit geschätzte Anteil an Fahrten im überlasteten Zustand entspricht somit die Fläche unter der verschobenen Kurve ab dem Auslastungswert 0.9, was in der Grafik der Summe der schraffierten und der leichtgrauen Flächen entspricht.

Zu 3: Schätzung der Summe der Personenstunden im überlasteten Zustand

Da die RPV-Datenbank nicht streckenabschnittsspezifisch, sondern linienspezifisch ist, wurde für jede Linie die Summe der Personen sowie die Anzahl Fahrplanstunden pro Person im überlasteten Zustand anhand der oben erläuterten Methodologie geschätzt. Die Summe der Personenstunden entsteht dann aus der Multiplikation der Passagiere im überlasteten Zustand mit den Fahrplanstunden pro Person im überlasteten Zustand.

Für das Jahr 2019 belaufen sich die Personenstunden in Überlast auf rund 396'718 [Persh/a].

4.3.4. Städtischer Nahverkehr

Landesweite Auslastungsdaten für den städtischen Nahverkehr liegen nicht vor. Probeweise wurde allerdings eine Auswertung von Daten der Basler Verkehrsbetriebe (BVB) vorgenommen, welche für das vorliegende Projekt zur Verfügung gestellt wurden. Diese Daten stammen aus dem ersten Quartal des Jahres 2019. Die Mengengerüste mussten in diesem Fall nicht anhand von Verteilungsdichtekurven geschätzt werden, da die vorliegenden Daten deutlich präziser sind als diejenigen für den regionalen Busverkehr. Diese entsprechen nämlich der mittleren Auslastung jeder Fahrt, je Linie und Richtung und Wochentag im beobachteten Zeitraum (sog. Belastungsteppiche). Somit sind die Auslastung und die absolute Zahl an Personen auf jeden Streckabschnitt gegeben. Das Mengengerüst entspricht den aus der BVB-Datenbank ermittelten Anzahl an Personen, welche auf Streckenabschnitte einer Linie mit Überlastung zu finden waren. Für die Hochrechnung der Quartalswerte auf das Jahr stellte die BVB noch die Anzahl beförderter Personen je Monat zur Verfügung. Die Hochrechnung erfolgte entsprechend dem Anteil des Quartals an der Jahresnachfrage.

Für das Jahr 2019 belaufen sich die Personenstunden in Überlast bei den BVB auf rund 2'106'934 [Pers/h/a]. Dabei ist aber zu berücksichtigen, dass insbesondere im städtischen Nahverkehr auch Fahrzeuge mit einem hohen Anteil Stehplätze eingesetzt werden.

Für den Versuch einer schweizweiten Abschätzung wird dieser Wert hochgerechnet. Dazu wird für die sechs grössten Städte der Schweiz (Einwohner > 100'000) eine ähnliche Überlast wie in Basel unterstellt. Für diese Städte werden die Anzahl Kurse in ermittelt.²⁹ Kurse sind jede Fahrt einer Linie an einem Tag. Die BVB hat einen Anteil von ca. 6.8% an den Daten. Unterstellt man eine identische Überlastsituation in den sechs grössten Städten der Schweiz können die Werte der BVB die Personenstunden auf 100% hochgerechnet werden. Es ergeben sich 33'278'545 [Pers/h/a] mit Überlast.

4.4. Ergebnisse und Fazit

Die ermittelten Mengengerüste je Verkehrsart aus Kapitel 4.3 werden mit den zusätzlichen Zeitkosten bei Überlast aus Tabelle 50 multipliziert. Die folgende Tabelle zeigt die Resultate

Tabelle 56: Komfortverlustkosten der Reisenden in öffentlichen Verkehr für das Jahr 2019 (Überlast = Auslastung > 90% der Anzahl Sitzplätze)

Verkehrsart	Segment	Personenstunden mit Überlast [Pers/h/a] (Anteil am Gesamt in %)	Komfortkosten bei Überlast [CHF/h]	Komfortverlustkosten je Jahr [CHF/a]
Bahn	<i>Fernverkehr</i>	1'590'748	0.644	1'023'859
	<i>Regionalverkehr</i>	5'562'601	0.644	3'580'278
	Summe	7'153'349 (17.5%)	-	4'604'137
Regionalbusverkehr		396'718 (1%)	0.662	262'660
Städtischer Nahverkehr	Basler Verkehrsbetriebe	2'106'934	0.677	1'427'353
	Weitere 5 grösste Städte	31'171'611	0.677	21'117'373
	Summe	33'278'545 (81.5%)		22'544'726
Summe		40'828'612		27'411'523

²⁹ Gemäss Open Transport Data (<https://opentransportdata.swiss/de/dataset/timetable-2019-gtfs>) sind dies neben den Basler Verkehrsbetrieben: Zürich (Verkehrsbetriebe Zürich (Busse), Verkehrsbetriebe Zürich INFO+ (Tram)), Bern (Städtische Verkehrsbetriebe Bern), Genf (Transport Public Genevois), Lausanne (Transport Publics de la Région Lausannoise), Winterthur (Stadtbus Winterthur).

Mit den hier durchgeführten Auswertungen und Berechnungen wurden erstmals die Komfortverlustkosten im öffentlichen Verkehr in der Schweiz berechnet. Damit ist es auch nicht möglich, diese durch Vergleiche mit anderen Quellen zu plausibilisieren. Eine weitere Schwierigkeit für eine Plausibilisierung der Grössenordnung der Ergebnisse besteht darin, dass in den Statistiken keine Angaben zu Reisezeiten – zum Beispiel analog zu den Verkehrsleistungen je Jahr – erhoben und ausgewiesen werden. Ein Rückschluss von den jährlichen Verkehrsleistungen zum Beispiel auf der Bahn, im Regionalbusverkehr und im städtischen Nahverkehr auf die Komfortverlustkosten je Verkehrsart ist aufgrund des unterschiedlichen Aufkommens und der Geschwindigkeiten nicht möglich.

Für die Relation der Verkehrsarten untereinander kann noch das Verkehrsaufkommen je Verkehrsart beigezogen werden. Der Anteil der hier berechneten Personenstunden mit Überlast im städtischen Nahverkehr und im Regionalbusverkehr ist mit 82.5% grösser als auf der Bahn mit 17.5%. Gemäss BFS ist das Verkehrsaufkommen im öffentlichen Verkehr von 2291 Mio. Personenfahrten im Jahr 2019 wie folgt aufgeteilt:

- Eisenbahn: 641 Mio. Personenfahrten je Jahr (= 28% des Aufkommens im ÖV)
- Tram, Trolley, Bus: 1650 Mio. Personenfahren je Jahr (= 72% des Aufkommens im ÖV)

Die Anteile liegen in ähnlichen Grössenordnungen. Dabei gibt es zwei Effekte zu beachten:

- Da das Verhältnis Stehplätze zu Sitzplätze bei Tram und Bus höher als bei der Bahn sein dürfte und die Reisezeiten langsamer sind, spricht dafür, dass der Anteil der Personenstunden in Überlast im städtischen Nahverkehr auch höher als der Anteil am Aufkommen sein kann.
- Die längeren Distanzen und Reisezeiten auf der Bahn würden dafür sprechen, dass der Anteil der Bahn bei den Personenstunden mit Überlast höher als der Anteil beim Aufkommen sein könnte.

Während für die Bahn und für die Probeauswertung für den Nahverkehr in Basel die Methodik nach Einschätzung der Autoren relativ genaue Mengengerüste liefert, weisen die Mengengerüste für den regionalen Busverkehr aufgrund der geringeren Datenqualität und der kleinen Stichprobe für die Ermittlung der Verteilungsdichtekurven eine deutlich grössere Ungenauigkeit auf. Ebenso ist die Hochrechnung auf weitere Verkehrsbetriebe sehr grob.

Die Ergebnisse zeigen, dass Komfortverlustkosten aufgrund von Überlast vor allem im Regionalverkehr auf der Bahn und im städtischen Nahverkehr auftreten. Dies sind gerade diejenigen Bereiche, in denen die Besteller und Transportunternehmen aufgrund von Optimierungs- und Effizienzüberlegungen auch bewusst Stehplätze in Kauf nehmen. In diesem Bereich stösst das hier entwickelte Verfahren aber an seine Grenzen, da die Überlast allein über die verfüg-

bare Anzahl Sitzplätze definiert ist. Eine differenzierte Betrachtung des Komforts von Sitzplätzen und Stehplätzen würde zweierlei erfordern: Es müsste die Stehplatzkapazität in Personen oder noch besser die Stehplatzfläche je Fahrzeug bekannt sein. Im städtischen Nahverkehr (zumindest bei einzelnen Städten) liegen Kapazitätsangaben vor, nicht aber beim Regionalbusverkehr und bei der Bahn. Ferner müssten Wertgerüste auch für den Komfort von Stehplätzen ermittelt werden. Diese sollten dann bspw. in einer Zahlungsbereitschaft bezogen auf die verfügbare Fläche je Person bestehen. Hier besteht weitergehender Datenerhebungs- und Forschungsbedarf.

5. Schnittstellen und Kompatibilität KfV-Statistik

5.1. Konzeption der heutigen KfV-Statistik

Das Bundesamt für Raumentwicklung publiziert seit 2005 jährlich Zahlen zu den externen Effekten des Strassen- und Schienenverkehrs in der Schweiz (ARE 2022). Die externen Kosten und Nutzen fliessen auch in die Publikation der Kosten und der Finanzierung des Verkehrs (ehemals Transportrechnung) des Bundesamts für Statistik (BFS) ein. Die Stauzeitkosten werden bisher separat und lediglich aus Sicht der Verkehrsart Schwerverkehr ausgewiesen. Kosten für den Komfortverlust wurden bisher nicht geschätzt.

Die Statistik der Kosten und der Finanzierung des Verkehrs (KfV-Statistik) ist eine volkswirtschaftliche Vollkostenrechnung aus Sicht der Verkehrsträger, wobei ein Verkehrsträger in seiner Gesamtheit betrachtet wird. Der Umgang mit den Zeitkosten in der KfV-Statistik ist aktuell wie folgt (BFS 2019a, BFS 2019b):

- Die Zeitkosten der Fahrzeuglenkenden im gewerblichen Sachen- und Personentransportverkehr sind in der KfV-Statistik enthalten. Sie sind Teil der Betriebskosten der Transportunternehmen (BFS 2019a). Zur Abschätzung dieser Kosten werden für die Strasse Durchschnittsgeschwindigkeiten aus dem Nationalen Personenverkehrsmodell des UVEK zugrunde gelegt (BFS 2019b). Insofern sind für den gewerblichen Verkehr Zeitverlustkosten implizit berücksichtigt.
- Die privaten Zeitkosten für den Betrieb eigener Verkehrsmittel (Selbstfahrende) wie beispielsweise Personenwagen sind zwar implizite Eigenleistungen der Verkehrsnutzenden, sind aber nicht Teil der KfV-Statistik (BFS 2019a). Die Stauzeit- und Verspätungskosten im privaten Strassenverkehr sind nicht Teil der KfV-Statistik. Ein Grund liegt darin, dass die Berücksichtigung von Verspätungs- bzw. Stauzeitkosten im Rahmen der KfV-Statistik nur dann sinnvoll ist, wenn sie für alle Verkehrsträger ermittelt werden kann. Bisher liegen allerdings nur Berechnungen zu den Verspätungs- bzw. Stauzeitkosten der Strasse vor. Hervorzuheben ist aber v.a., dass aus Sicht der Verkehrsträger Stauzeit- und Verspätungskosten bzw. Zeitverlustkosten keine externen Kosten darstellen. Die Kosten werden also von den Verkehrsteilnehmenden getragen, d.h. Verursacher sind gleich Betroffene (BFS 2019a). Eine Überlastung verursacht – bezogen auf die Zeitkosten – jeweils nur den Verkehrsteilnehmenden zusätzliche Zeitkosten (Zeitverlustkosten), die sie sich gegenseitig anlasten, bei ihrem Entscheid aber nicht berücksichtigen. Sie verursachen demnach keine Kosten für die Allgemeinheit wie beispielsweise bei den Klimakosten.

Im Rahmen der Konzeption der Transportrechnung und den Vertiefungsarbeiten wurden die Verspätungskosten im privaten Strassenverkehr daher auch als Zusatzinformationen ausgewiesen, aber nicht empfohlen, diese zu integrieren (Maibach et al. 2006; Maibach et al. 2008). Verspätungskosten auf der Strasse aber auch auf der Schiene und in der Luft wurden generell als Kosten für Qualitätsverluste betrachtet. Steht bei einer Verkehrsträgerrechnung die Überprüfung der Kostendeckung beispielsweise hinsichtlich der Besteuerung im Vordergrund, sind Stauzeit- und Verspätungskosten bzw. Zeitverlustkosten nicht mit einzubeziehen. Die Komfortverlustkosten wurden im Rahmen der Konzeption der Transportrechnung nicht thematisiert.

5.2. Künftige Sicht der Verkehrsteilnehmenden und Empfehlungen

Künftig soll die KFV-Statistik aus Sicht der Verkehrsteilnehmenden erstellt werden. Bei diesem Wechsel stellt sich daher die Frage, inwiefern Zeit- und Komfortverlustkosten auszuweisen und diese mit anderen Kostenkategorien vergleichbar sind. Zudem wurden im Rahmen eines BFS-Workshops im Jahr 2019 mögliche Revisionspunkte der KFV-Statistik identifiziert und der Umgang mit Zeitkosten im privaten Verkehr generell diskutiert.

In Bezug auf die Zeitverlust- und Komfortverlustkosten sind grundsätzlich drei Varianten denkbar:

1. Keine Integration in die KFV-Statistik
2. Integration in die KFV-Statistik als ergänzende Information im Sinne eines Exkurses
3. Integration in die KFV-Statistik und Aggregation mit den anderen Kostenkategorien

Wir empfehlen aus folgenden Gründen Variante 2:

- Der Fokus der vorliegenden Studie lag auf der volkswirtschaftlich optimalen Nutzung und Preisung der Infrastruktur- bzw. Transportmittelnutzung. Daher lag der Fokus auf dem Grenzkostenansatz und der Berechnung des Wohlfahrtsverlusts. Statistische Aussagen zur Kostendeckung und Kostendeckungsgrade sind hierbei nicht relevant. Der Aspekt der Zeit- und Komfortverlustkosten könnte aber in einem Spezialkapitel in der KFV-Statistik als externer Exkurs aufgegriffen und als zusätzliche Information bereitgestellt werden. Im Fokus sollten dabei Durchschnitts- und Grenzkosten liegen.
- Das BFS beabsichtigt nicht, generell private Zeitkosten in der KFV-Statistik zu berücksichtigen. Hingegen sollen Zeitkosten im gewerblichen Verkehr weiterhin berücksichtigt werden. Im gewerblichen Verkehr sind aufgrund des Ansatzes, Durchschnittsgeschwindigkeiten zugrunde zu legen, Zeitverlustkosten bereits (zumindest zu einem gewissen Teil) mitberücksichtigt. Eine Aggregation der vorliegend berechneten Zeitverlustkosten (Variante 3) würde

daher im gewerblichen Verkehr zu Doppelzählungen führen bzw. sind die Ansätze nicht kompatibel. Zeitverlustkosten generell nicht auszuweisen (Variante 1) würde der heutigen Praxis widersprechen, da diese im gewerblichen Verkehr berücksichtigt werden.

- Zeitverlustkosten aufgrund der Auslastung der Strasse wurden für den privaten motorisierten Individualverkehr (PW) und dem Strassengüterverkehr (LNF, SNF) quantifiziert. Auf Basis der gewählten Datengrundlagen (HERE-Daten, NPVM-Daten Strasse) konnten die Zeitverlustkosten für Strassenfahrzeuge des öffentlichen Verkehrs nicht quantifiziert werden. Dies bedarf weiterer Untersuchungen. Insofern spricht dies ebenfalls gegen eine Aggregation der Überlastungskosten (v.a. Zeitkosten Strasse) in die KfV-Statistik – zumindest zum aktuellen Zeitpunkt.
- Die Komfortverlustkosten sind nach unserer Einschätzung konzeptionell nicht KfV-relevant. Sie dienen vor allem der Information im Hinblick auf ein auslastungsabhängiges Pricing. Bei den Komfortverlustkosten im ÖV stellt sich zudem die Frage, inwiefern diese aufgrund der Höhe von insgesamt rund 27 Mio. Franken im Jahr 2019 allenfalls vernachlässigbar wären. Zudem besteht Vertiefungsbedarf für die Komfortverlustkosten unter Berücksichtigung von Stehplätzen. Werden dies berücksichtigt würden die Komfortverlustkosten tiefer ausfallen.

6. Fazit und Ausblick

Der vorliegende Grundlagenbericht zu den volkswirtschaftlichen Kosten der Überlastung der Transportinfrastruktur soll neue Erkenntnisse zur Debatte über aktuelle und zukünftige Instrumente in Bezug auf die optimale Nutzung und Bepreisung der Infrastruktur- bzw. Verkehrsmittelnutzung (z.B. LSV, weitere fahrleistungsabhängige Abgaben) liefern. Die Sicht der Verkehrsteilnehmenden steht im Vordergrund. Er orientiert sich daher an der Grenzkostensicht, die auch Gegenstand des EU Handbooks zu den externen Kosten im Verkehr ist (Van Essen et al. 2019). In Bezug auf die Zeitkosten Strasse weicht dieser Grundlagenbericht daher von den bisherigen Berechnungen der Stauzeitkosten für den Verkehrsträger Strasse und Verkehrsart Schwerverkehr ab. Die Komfortverlustkosten im ÖV für die Schweiz wurden bisher noch nie ermittelt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Zeitverlustkosten, die sich die Verkehrsteilnehmenden gegenseitig aufbürden, auf der Strasse bedeutend sind. Die gesamten Zeitverlustkosten betragen rund 3.1 Mrd. Franken und die externen Grenzzeitkosten rund 1.2 Mrd. Franken im Jahr 2019. Der Wohlfahrtsverlust in Höhe von rund 33 Mio. Franken zeigt, dass es punktuell und insbesondere an Wochenenden zu deutlichen Überlastungen kommt.

Mit den hier durchgeführten Auswertungen und Berechnungen wurden auch erstmals die Komfortverlustkosten im öffentlichen Verkehr in der Schweiz berechnet. Sie betragen im Jahr 2019 rund 27 Mio. Franken. Komfortverlustkosten aufgrund von Überlast treten vor allem im Regionalverkehr auf der Bahn (17.5%) und im städtischen Nahverkehr (81.5%) auf. Dies sind gerade diejenigen Bereiche, in denen die Besteller und Transportunternehmen aufgrund von Optimierungs- und Effizienzüberlegungen auch bewusst Stehplätze in Kauf nehmen.

Die Arbeiten haben gezeigt, dass es weiteren Vertiefungsbedarf gibt:

- Bei den **Zeitverlustkosten auf der Strasse** konnten aufgrund der gewählten Datengrundlagen drei Fahrzeugkategorien (Personenwagen, Lieferwagen, schwere Nutzfahrzeuge) berücksichtigt werden. Auf die einzelnen Strassensegmente umgelegte Belastungszahlen für Fahrzeuge im ÖV standen jedoch nicht zur Verfügung. Hierfür bedürfte es weiterer Vertiefungen, um die Daten entsprechend aufzubereiten.
- Der Fokus bei der Ermittlung der Zeitverlustkosten lag auf den getragenen Kosten. In einer Vertiefungsarbeit wäre der Aspekt der Verursachung zu vertiefen. Im EU Handbook wurde hierfür ein vereinfachter Ansatz gewählt (Van Essen et al. 2019, vgl. Kap. 2.2.1.4). Die Anwendung dieses pragmatischen Ansatzes wäre zu prüfen.
- Aufgrund des Fokus auf die Überlastung wurden keine Verspätungskosten ÖV, Schienen- und Luftverkehr quantifiziert, da diese mehrheitlich nicht auf Überlastungen zurückzuführen

sind. Gleichwohl gibt es für diese Kosten, die Qualitätseinbussen für die Verkehrsteilnehmenden darstellen, einen Bedarf an aktuellen Angaben wie die Diskussionen in der Begleitgruppe zeigt. Frühere Vorarbeiten liegen hierzu vor, die aktualisiert werden könnten (z.B. Maibach et al. 2008).

- Das vorliegend entwickelte Verfahren zur Schätzung der **Komfortverlustkosten im ÖV** stösst an gewisse Grenzen, da die Stehplätze nicht berücksichtigt werden konnten. Hier besteht weitergehender Datenerhebungs- und Forschungsbedarf.

Annex

A1. Wohlfahrtstheoretische Grundlagen

Externalitäten werden in den beiden Hauptsätzen³⁰ der Wohlfahrtsökonomie ausgeschlossen, d.h. bei Externalitäten sind Märkte nicht Pareto-effizient³¹. Unter Externalitäten werden Wirkungen verstanden, die von der ökonomischen Aktivität eines Marktteilnehmers ausgehen, jedoch nicht im Marktpreis berücksichtigt werden (Kupferschmidt 2018). Externe Effekte führen zu Allokationsproblemen, denn durch sie werden in der privaten Entscheidungsfindung nicht alle Kosten (oder Nutzen) reflektiert. Bei der Optimierung werden lediglich die internen Kosten, d.h. die Kosten, welche von den Konsumierenden und Produzierenden selbst getragen werden, einbezogen. Die externen Kosten werden dagegen ausser Acht gelassen, da sie nicht von den Verursachenden selbst getragen werden (INFRAS und EcoPlan 2019). Die private Optimierung verursacht daher eine kollektiv suboptimale Allokation (Pindyck und Rubinfeld 2009). Folglich gilt der erste Lehrsatz der Wohlfahrtstheorie nicht mehr, da die auf einem Wettbewerbsmarkt erzielte Gleichgewichtsallokation der Ressourcen ineffizient ist. Der durch die Marktlösung verursachte Verlust der Rente wird als Wohlfahrtsverlust bezeichnet.

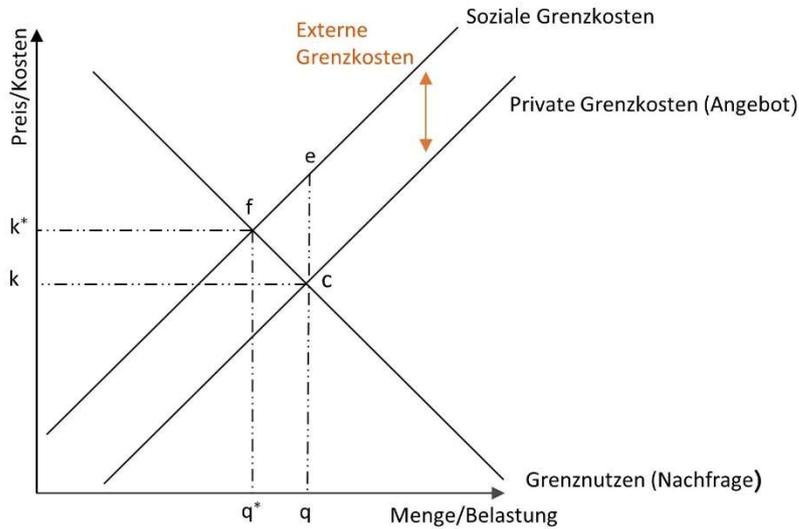
Abbildung 45 zeigt die Angebots- und Nachfragekurve eines Marktes mit negativer Externalität. Im ökonomischen Grundmodell ergibt sich eine optimale Menge eines Gutes, wenn der Grenznutzen (Nachfragekurve) gleich den Grenzkosten (Angebotskurve) ist und die gesellschaftliche Wohlfahrt maximiert wird. Im Schnittpunkt der Nachfrage- und Angebotskurve (c) in Abbildung 45 wird demnach der Grenznutzen und der Gewinn maximiert. Dieses Gleichgewicht wird auf einem Wettbewerbsmarkt erreicht.

Bei Vorliegen von Externalitäten ist aus gesellschaftlicher Sicht die nachgefragte Menge in dieser Allokation zu gross, weil die externen Grenzkosten nicht im Kalkül berücksichtigt werden. Die externen Grenzkosten messen die Kosten, die ein/e zusätzliche/r Nutzende/r den anderen Marktteilnehmern auferlegt. Für eine effiziente Ressourcenallokation müssten die sozialen Grenzkosten, also die Summe aus den privaten Durchschnittskosten und den externen Grenzkosten, berücksichtigt werden. Die Kosten sind also zu tief, da sie nur die privaten Durchschnittskosten wiedergeben, jedoch nicht die externen Grenzkosten. Die Ursache der ökonomischen Ineffizienz liegt daher in der fehlenden Berücksichtigung der Externalitäten im Marktpreis.

³⁰ Der erste Lehrsatz der Wohlfahrtsökonomie besagt, dass ein Wettbewerbsgleichgewicht ökonomisch effizient ist. Der zweite Lehrsatz besagt, dass wenn die individuellen Präferenzen konvex sind, jede Pareto-effiziente Allokation als ein Wettbewerbsgleichgewicht für eine bestimmte Anfangsallokation implementiert werden kann. Eine Umverteilung muss also nicht mit ökonomischer Effizienz in Konflikt stehen.

³¹ Eine Pareto-effiziente Allokation ist eine Güterallokation, bei der keine Umverteilung stattfinden kann, mit der ein Individuum bessergestellt wird, ohne dadurch ein anderes schlechter zu stellen.

Abbildung 45: Negativer Externer Effekt



Grafik INFRAS.

Das Konzept der Externalitäten geht auf Pigou (1920) zurück. Eine effiziente Ressourcenallokation kann durch eine Erhöhung, der in der Entscheidungsfindung berücksichtigten Kosten, erreicht werden. Die Internalisierung der externen Effekte kann über eine Pigou-Steuer erfolgen. Durch die Pigou-Steuer werden die Verursacher negativer Effekte mit den externen Grenzkosten besteuert, um eine Lenkung im Markt erzielen zu können. Nach dem Coase Theorem können externe Effekte durch den Markt selbst, ohne Regulierung, internalisiert werden, wenn die Eigentumsrechte klar verteilt sind, keine Transaktionskosten vorhanden sind und alle vollständig über die Externalitäten informiert sind.

Die Kosten, die durch jede zusätzlich nachgefragte Menge oberhalb vom effizienten Optimum für die Gesellschaft anfallen, können aus dem Dreieck zwischen den sozialen Grenzkosten und dem Grenznutzen (der Nachfrage) hergeleitet werden (Pindyck und Rubinfeld 2009). In Abbildung 45 entspricht der Wohlfahrtsverlust der Fläche des Dreiecks der Punkte c, e und f.

A2. Soziale Grenzkosten gemäss EU Handbook

Im Folgenden werden die sozialen Grenzzzeitkosten nach dem EU Handbook hergeleitet.

Umschreibung der privaten Durchschnittskosten mit $C_0 = VOT \cdot t_0$:

$$C = C_0 \cdot \left(1 + \alpha \cdot \left(\frac{q}{c} \right)^\beta \right)$$

Private Durchschnittskosten ohne Überlastung ($q = 0$) für ein Fahrzeug:

$$PDK(q = 0) = t_0 \cdot VOT$$

Steigende Überlastung und zunehmende Interaktion zwischen den Fahrzeugen ($q \neq 0$):

$$\frac{dPDK}{dq} = VOT \cdot t_0 \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \left(\frac{q}{c} \right)^{(\beta-1)} \quad (= t_0 \cdot \frac{\alpha\beta}{c^{\beta-1}} q^{\beta-1} \cdot VOT)$$

Die sozialen Grenzzzeitkosten, die ein Fahrzeug in einer Stausituation zu tragen hat, sind die Summe der privaten Durchschnittskosten in einer Situation mit freiem Verkehrsfluss und den zusätzlichen Kosten, die vom Grenzfahrzeug abhängen:

$$\begin{aligned} SGK(q) &= VOT \cdot t_0 + VOT \cdot t_0 \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \left(\frac{q}{c} \right)^{(\beta-1)} \\ &= C_0 + C_0 \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \left(\frac{q}{c} \right)^{(\beta-1)} \end{aligned}$$

Die Gleichung bestimmt die Kosten, die ein Fahrzeug trägt, wenn ein zusätzliches Fahrzeug dazustösst. Die allgemein formulierte Grenzzzeitkostenfunktion (vgl. Kap. 2.1) schätzt dagegen die gesamten sozialen Grenzkosten aller auf einer überlasteten Strasse fahrenden Fahrzeuge.

A3. Capacity-Restraint Funktionen und Ableitung von Grenz- und Durchschnittskosten

Um die Abhängigkeit zwischen Streckenauslastung und -widerstand zu berücksichtigen, erfolgt die Berechnung der Reisezeit im NPVM unter Verwendung von Kapazitätsbeschränkungsfunktionen (Capacity-Restraint-Funktionen). Diese CR-Funktionen beschreiben den Zusammenhang von Verkehrsauslastung (Sättigung) einer Strecke und deren Reisezeiten / Geschwindigkeiten für die jeweiligen Streckentypen (ARE 2020). Unterschiedlichen Streckentypen sind unterschiedliche CR-Funktionen und -parameter zugeordnet. Im NPVM gibt es insgesamt 100 Streckentypen, denen CR-Funktionen zugeordnet sind.

Tabelle 57: CR-Funktionen und Parameter

Typ	Funktion	v_z [km/h]	v_0 [km/h]	α	β_1	β_2	γ	R^2
innerorts	BPR-2	30	29	0.05	5.0	4.5	-	0.83
innerorts	BPR-2	50	42	0.16	2.5	6.0	-	0.23
innerorts*	BPR-2	50	36	0.09	1.7	6.5	-	0.06
ausserorts	BPR-2	60	50	0.18	2.6	5.2	-	0.20
ausserorts	BPR-2	80	74	0.18	5.0	3.4	-	0.76
Autobahn	BPR-2	80	79	0.31	2.7	5.0	-	0.79
Tunnel	Inrets	80	77	0.97	-	-	-	0.45
Autobahn	BPR-2	100	100	0.23	2.2	5.3	0.11	0.64
Tunnel	Inrets	100	94	0.97	-	-	0.11	0.89
Autobahn	BPR-2	120	117	0.27	2.6	5.9	0.31	0.62

Tabelle INFRAS. Quelle: Vrtic et al. 2018.

Die häufigste und vorliegend auch relevante BPR-2 Funktion ist wie folgt:

$$q < c: v = \frac{v_0}{1 + a \cdot \left(\frac{q}{c}\right)^{b_1}}$$

$$q \geq c: v = \frac{v_0}{1 + a \cdot \left(\frac{q}{c}\right)^{b_2}}$$

wobei

q: Belastung der Strecke

c: Kapazität der Strecke

α, β : Parameter

v_0 : Geschwindigkeit auf unbelasteter Strecke (freier Verkehrsfluss)

v: Geschwindigkeit auf belasteter Strecke

t_0 : Fahrzeit auf unbelasteter Strecke (freier Verkehrsfluss)

t : Fahrzeit auf belasteter Strecke (Fahrzeit bei aktueller Auslastung)

Auf Basis der Capacity-Constraint-Funktionen kann die Durchschnittskostenfunktion (bezogen auf die Zeitkosten) hergeleitet werden (vgl. hierzu auch Maibach et al. 2008).

Herleitung der privaten Durchschnittskostenfunktion (PDK):

$$v = \frac{1}{t} = \frac{v_0}{1 + \alpha \cdot \left(\frac{q}{c}\right)^\beta}$$

$$t = t_0 \cdot \left(1 + \alpha \cdot \left(\frac{q}{c}\right)^\beta\right)$$

$$PDK(q) = t_0 \cdot \left(1 + \alpha \cdot \left(\frac{q}{c}\right)^\beta\right) \cdot VOT$$

A4. Kenngrößen zur Herleitung der Kostensätze

Kostensätze in CHF/Std.	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
PW	39.7	40.2	40.6	41.0	41.4	41.7	41.9	42.2	42.3	42.1	42.5
LI	37.4	37.8	38.1	38.4	38.7	39.0	39.1	39.3	39.5	39.7	40.0
LMW (Fzkm-gewichtet)	39.6	40.1	40.5	40.9	41.2	41.6	41.7	42.0	42.1	41.9	42.4
SNF	64.9	65.4	65.9	66.2	66.5	66.8	66.7	67.0	67.2	67.7	68.2
Car/Reisebus	313.5	316.0	318.8	321.3	323.4	325.5	326.5	328.5	329.7	331.4	334.4
SMW (Fzkm-gewichtet)	77.6	78.1	78.9	79.6	80.0	80.8	81.1	81.7	82.4	83.1	84.1
Verkehrsindikatoren	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
PWKm (Mio/a)	50'373	50'949	51'575	52'582	53'493	54'313	55'291	56'396	57'524	59'344	59'833
LIKm (Mio/a)	3'558	3'643	3'795	3'956	3'874	3'998	4'130	4'270	4'415	4'530	4'668
%PW	93.4%	93.3%	93.1%	93.0%	93.2%	93.1%	93.1%	93.0%	92.9%	92.9%	92.8%
%LI	6.6%	6.7%	6.9%	7.0%	6.8%	6.9%	6.9%	7.0%	7.1%	7.1%	7.2%
SNFKm (Mio/a)	2'164	2'226	2'258	2'229	2'243	2'236	2'236	2'236	2'236	2'238	2'226
Car/RbusKm (Mio/a)	116	118	122	124	125	128	131	134	137	139	142
%SNF	94.9%	95.0%	94.9%	94.7%	94.7%	94.6%	94.5%	94.3%	94.2%	94.2%	94.0%
%Car/Rbus	5.1%	5.0%	5.1%	5.3%	5.3%	5.4%	5.5%	5.7%	5.8%	5.8%	6.0%
Besetzungsgrad PW	1.64	1.64	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.63	1.64
Besetzungsgrad Car/Rbus	20.1	20.1	20.1	20.1	20.1	20.1	20.1	20.1	20.1	20.1	20.1
Weitere Indikatoren	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Teuerung/LIK (ggü. Vorjahr)	99.5%	100.7%	100.3%	99.3%	99.8%	99.9%	98.9%	100.3%	100.5%	100.9%	100.4%
Nominallohn (ggü. Vorjahr)	102.1%	100.8%	100.9%	100.9%	100.7%	100.8%	100.4%	100.7%	100.4%	100.5%	100.9%
Reallohn (ggü. Vorjahr)	102.8%	100.0%	101.0%	101.3%	101.0%	101.0%	101.3%	101.3%	99.7%	99.7%	100.6%

LI: Lieferwagen, LMW: leichte Motorwagen (Personenwagen und leichte Nutzfahrzeuge), PW: Personenwagen, Rbus: Reisebusse, SMW: schwere Motorwagen (Lastwagen und Reisebusse), SNF: Schwere Nutzfahrzeuge

Tabelle INFRAS. Quellen: BFS, VSS-Normen.

A5. Plausibilisierung Aktualisierungstool

Zur Plausibilisierung des Aktualisierungstools wurde die gesamten Zeitverlustkosten gegenüber Free-Flow, die von den Verkehrsteilnehmenden getragen werden, mit unterschiedlichen Fahrleistungsentwicklungen im 2019 gegenüber 2017 ermittelt, um zu prüfen, wie sich die Zeitverlustkosten ändern, wenn die Fahrleistungsentwicklung höher ist.

Tabelle 58: Veränderung der Fahrleistungsentwicklung von 2017 auf 2019

	Tatsächliche Veränderung		Hypothetische Veränderung	
	Nationalstrassen	Nicht-Nationalstrassen	Nationalstrassen	Nicht-Nationalstrassen
PW	-0.9%	3.7%	-1.9%	7.3%
LI	9.6%	-0.3%	19.2%	-0.5%
SNF	3.6%	-11.4%	7.3%	-22.7%

Abweichungen resultieren aus Rundungsdifferenzen.

Tabelle INFRAS. Eigene Berechnungen basierend auf dem Verkehrsflussbericht (ASTRA 2020).

Tabelle 59: Übersicht gesamte Zeitverlustkosten

	Total	Neues Total	Veränderung
	CHF/Jahr	CHF/Jahr	%
PW	2'708'136'414	2'789'052'055	3.0%
LI	275'321'705	281'049'289	2.1%
SNF	147'979'085	141'828'561	-4.2%
Total	3'131'437'204	3'211'929'905	2.6%

Abweichungen resultieren aus Rundungsdifferenzen.

Tabelle INFRAS. Eigene Berechnungen.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Systemgrenzen Literaturanalyse und Quantifizierung von Überlastungskosten	6
Abbildung 2: Marktgleichgewicht und volkswirtschaftliches Optimum auf der Strasse	7
Abbildung 3: Systemgrenzen Literaturanalyse	15
Abbildung 4: Übersicht zur Quantifizierung von Überlastungskosten aufgrund Ineffizienzen in der Nutzung	16
Abbildung 5: Arbeitsprogramm und -pakete in der Übersicht	18
Abbildung 6: Konsumenten- und Produzentenrente in einem ökonomisch effizienten Marktgleichgewicht	21
Abbildung 7: Stauursachen Strasse und Folgewirkungen	25
Abbildung 8: Fundamentaldiagramm	27
Abbildung 9: Marktgleichgewicht und volkswirtschaftliches Optimum auf der Strasse	30
Abbildung 10: Capacity-Restraint-Funktionen (illustratives Beispiel)	34
Abbildung 11: Negative Externalitäten im Luftverkehr	47
Abbildung 12: Verspätungsursachen im Luftverkehr	48
Abbildung 13: Exemplarische Verspätungsursachen auf der Schiene	52
Abbildung 14: Summe der Verspätung der Züge auf einer Strecke anhand der Initialverspätung eines einzelnen Zuges nach Anzahl Züge auf der Strecke (<i>capacity consumption</i>)	53
Abbildung 15: Verspätungen gegenüber Dichte der Fahrzeuge für verschiedene Streckenabschnitte der Strecke Zürich HB-Pfäffikon SZ	54
Abbildung 16: Auslastungsstufen der SP-Befragung von Haywood & Koning (2013)	62
Abbildung 17: Relative Entwicklung von Fahrleistung und Staudauer auf Autobahnen ab 2013 (Index 2013 = 100)	66
Abbildung 18: Zählstellennetz SASVZ	77
Abbildung 19: Beispiele Jahresganglinien => hier sind für jede Stunde im Jahr Belastungsdaten verfügbar	79
Abbildung 20: Datenbeispiel HERE zu einem TMC-Link (Stundenwerte auf Basis aggreg. 5-min-Raster)	83
Abbildung 21: Überlagerung der Netze NPVM und HERE (Beispiel-Ausschnitt Ebikon-Buchrain)	84
Abbildung 22: Streckentypen im NPVM am Beispiel Region Zürich	86
Abbildung 23: Streckentypen im NPVM im Gesamtnetz Schweiz	87
Abbildung 24: Anwendung CR-Funktion mit Geschwindigkeitsdifferenz (in%) und LOS zur ASP 2017	88
Abbildung 25: Schema zum generellen Ansatz	89
Abbildung 26: HERE-Netz mit den funktionalen Klassen 1–4	93

Abbildung 27: Beispielhafter Tagesgang der HERE-Daten (blau) im Vergleich mit den Zähl- daten (rot) _____	94
Abbildung 28: Typisierung der Strecken nach Morgen- und Abendspitze an Werktagen _____	97
Abbildung 29: Typisierung der Strecken nach Vormittags- und Nachmittagsspitze an Wochenenden _____	98
Abbildung 30: NPVM-Strecken mit Verknüpfungen (eingefärbt) zum HERE-Netz _____	99
Abbildung 31: Vergleich der Geschwindigkeitsprofile anhand eines Beispielabschnitts (A2, MuttENZ, Richtung Osten) _____	101
Abbildung 32: Marktgleichgewicht und volkswirtschaftliches Optimum auf der Strasse _____	105
Abbildung 33: Cobweb-Verfahren zur Bestimmung des Gleichgewichts _____	109
Abbildung 34: Berechnung des Wohlfahrtsverlusts _____	111
Abbildung 35: Veranschaulichung des Wohlfahrtsverlusts am Beispiel einer Strecke _____	115
Abbildung 36: Nutzenfunktion einer ÖV-Reise _____	123
Abbildung 37: Berücksichtigte Auslastungsstufen aus der SP-Befragung _____	124
Abbildung 38: VTT-Multiplikatoren T_{mh} für verschiedene Auslastungsstufen für die Schweiz differenziert nach Reisezeiten (Preisstand 2015) _____	125
Abbildung 39: Cullen & Frey Diagramm für den Mittel der Verteilung der Auslastungen der FRASY- Zähl- daten auf HOP-Aggregationsebene _____	129
Abbildung 40: Reisende in Situationen mit Überlast im Jahr 2019 (Überlast = Auslastung > 90% Sitzplatzangebot) _____	135
Abbildung 41: Cullen & Frey Grafiken der Verteilungen für Stichprobedaten des Busverkehrs _____	138
Abbildung 42: Gegenüberstellung der beobachteten (blau) und geschätzte Lognormal Verteilungsdichtekurven der Auslastungen (rot) für den regionalen Busverkehr _____	139
Abbildung 43: Histogramm der Auslastungen für den regionalen Busverkehr (Überlast = Auslastung > 90%) _____	140
Abbildung 44: Methodik zur Ermittlung des Anteils an Fahrten im überlasteten Zustand anhand der Verteilungsdichtekurve der Auslastungen _____	141
Abbildung 45: Negativer Externer Effekt _____	152

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Aktualisierter Kostensatz für das Jahr 2019 (in CHF pro Fahrzeugstunde) _____	7
Tabelle 2: Getragene Zeitverlustkosten, Wohlfahrtsverlust und externe Grenzzeitkosten auf der Strasse nach Fahrzeugkategorien im Jahr 2019 (Mio. CHF) _____	8
Tabelle 3: Ermittlung der zusätzlichen individuellen Komfortkosten pro Person und Verkehrsart bei Überlast (Preisstand 2019) _____	10
Tabelle 4: Komfortkosten der Reisenden in öffentlichen Verkehr für das Jahr 2019 (Überlast = Auslastung > 90% der Anzahl Sitzplätze) _____	11
Tabelle 5: Definitionen und Begriffe _____	16
Tabelle 6: Definition relevanter Begriffe _____	23
Tabelle 7: Verkehrsqualitätsstufen _____	25
Tabelle 8: Übersicht ausgewählter Schweizer Studien zur Ermittlung der Stauzeitkosten _____	31
Tabelle 9: Zeitkostensätze (CHF pro Fahrzeugstunde) _____	40
Tabelle 10: Bewertung von unerwarteten Reisezeitveränderungen (Zuverlässigkeitsverhältnis) _____	41
Tabelle 11: Zeitwert im Personen- und Güterverkehr Schweiz (Euro/Stunde pro Person oder Euro/Stunde pro Tonne, Preisstand 2016) _____	43
Tabelle 12: Nachfrageelastizitäten basierend auf Litman (2011) und Oum et al. (1990) _____	43
Tabelle 13: Personenwagenäquivalent verwendet im EU Handbook (2019) _____	44
Tabelle 14: Gesamte Wohlfahrtsverluste und Verspätungskosten verursacht nach Verkehrsmitteln für die Schweiz, vereinfachter Ansatz (Milliarden Euro/Jahr, Preisstand 2016) _____	44
Tabelle 15: Übersicht durchschnittlicher Wohlfahrtsverlust und Verspätungskosten verursacht pro Fahrzeugkilometer für die Schweiz, vereinfachter Ansatz (Cent/Fzkm, Preisstand 2016) _____	44
Die sozialen Grenzkosten pro Fahrzeug- bzw. Personenkilometer werden in der Studie als externe Grenzkosten interpretiert (van Essen et al. 2019, S. 313). Tabelle 16: Soziale Grenzkosten verursacht pro Fahrzeugkilometer für die Schweiz, vereinfachter Ansatz (Cent/Fzkm, Preisstand 2016) _____	45
Tabelle 17: Bewertung von unerwarteten Reisezeitveränderungen (Zuverlässigkeitsverhältnis) _____	56
Tabelle 18: VTT-Multiplikatoren aus der Literatur _____	61
Tabelle 19: Entwicklung von jährlicher Fahrleistung und Staudauer auf Autobahnen _____	66
Tabelle 20: Abschätzung der Fahrzeug-Staustunden 2014 bis 2019 _____	67
Tabelle 21: Aktualisierte Kostensätze (in CHF pro Fahrzeugstunde) _____	68
Tabelle 22: Fahrzeug-Staustunden in Mio. pro Jahr für 2010–2019 _____	70
Tabelle 23: Fahrzeug-Stauzeitkosten in Mio. CHF pro Jahr für 2010–2019 _____	70
Tabelle 24: Totale Stauzeitkosten und vom Schwerverkehr verursachte Stauzeitkosten in Mio. CHF pro Jahr _____	72

Tabelle 25: Aktualisierte Fahrzeug-Stauzeitkosten in Mio. CHF pro Jahr 2010–2019 _____	73
Tabelle 26: Vom Schwerverkehr verursachte Stauzeitkosten in Mio. CHF pro Jahr 2010–2019 _	73
Tabelle 27: Generelle Datengrundlagen zum Verkehrszustand auf der Strasse _____	75
Tabelle 28: Übersicht und Kurzbeschreibung Daten HERE _____	83
Tabelle 29: Grenzwerte Geschwindigkeitseinbrüche an Werktagen in Morgen- und Abendspitze ⁹⁵	
Tabelle 30: Grenzwerte Geschwindigkeitseinbrüche am Wochenende (vor-/nachmittags) ____	97
Tabelle 31: Fahrleistungen nach Fahrzeug- und Strassenkategorien _____	102
Tabelle 32: Reisezeitverluste in Fahrzeugstunden pro Tag nach functional class und Spitzenstuententyp (Morgen-/Abendspitze) an Werktagen _____	103
Tabelle 33: Reisezeitverluste in Fahrzeugstunden pro Tag nach Typen an Wochenenden ____	104
Tabelle 34: Übersicht zu Nachfrageelastizitäten für die Schweiz _____	108
Tabelle 35: Zeitverluste ggü. Free-Flow-Geschwindigkeit nach Fahrzeugkategorien 2019 (Fahrzeugstunden) _____	112
Tabelle 36: Übersicht Zeitverluste nach Tageszeiten 2019 (Fahrzeugstunden bzw. %) _____	112
Tabelle 37: Übersicht der Zeitverluste nach Strassenkategorien 2019 (Fahrzeugstunden bzw. %) _____	113
Tabelle 38: Übersicht gesamte getragene Zeitverlustkosten nach Fahrzeugkategorien 2019 (Mio. CHF/Jahr) _____	113
Tabelle 39: Übersicht durchschnittlich getragene Zeitverlustkosten 2019 (Rp./Fzkm) _____	114
Tabelle 40: Übersicht Wohlfahrtsverlust nach Fahrzeugkategorien 2019 (Mio. CHF/Jahr) ____	114
Tabelle 41: Übersicht Wohlfahrtsverlust nach Tageszeiten 2019 (Mio. CHF/Jahr) _____	116
Tabelle 42: Übersicht Wohlfahrtsverlust nach Strassenkategorien 2019 (Mio. CHF/Jahr) ____	116
Tabelle 43: Übersicht Summe der externen Grenzzeitkosten 2019 (Mio. CHF) _____	116
Tabelle 44: Übersicht durchschnittliche Grenzzeitkosten 2019 (Rp./Fzkm) nach Fahrzeugkategorien _____	117
Tabelle 45: Übersicht getragene durchschnittliche Grenzzeitkosten 2019 (Rp./Fzkm) nach Strassenkategorien _____	117
Tabelle 46: Übersicht verursachte durchschnittliche Grenzzeitkosten 2019 (Rp./Fzkm) nach Strassenkategorien _____	117
Tabelle 47: Fahrzeug(stau)stunden und gesamte Verspätungs- bzw. Stauzeitkosten 2019 ____	118
Tabelle 48: Verspätungskosten EU Handbook und Zeitverlustkosten vorliegende Studie ____	118
Tabelle 49: Vergleich Kostensätze EU Handbook und vorliegende Studie (CHF pro Personenstunde im PV bzw. Fahrzeugstunde im GV) _____	119
Tabelle 50: Ermittlung der zusätzlichen individuellen Komfortkosten pro Person und Verkehrsart bei Überlast (Preisstand 2019) _____	126

Tabelle 51: Jahresgang je Betreiber. Obere Tabelle absolute Werte in Personenstunden pro Jahr; _____	131
Tabelle 52: Jahresgang und Tagesgang an Werktagen. Obere Tabelle absolute Werte in Personenstunden pro Jahr; untere Tabelle Anteile am Gesamtwert Personenstunden. (Untere Tabelle mit Einfärbung gemäss Anteil: hohe Anteile in rot und tiefe Anteile in blau) _____	132
Tabelle 53: Jahresgang und Tagesgang an Samstagen. Obere Tabelle absolute Werte in Personenstunden pro Jahr; untere Tabelle Anteile am Gesamtwert Personenstunden. (Untere Tabelle mit Einfärbung gemäss Anteil: hohe Anteile in rot und tiefe Anteile in blau) _____	133
Tabelle 54: Jahresgang und Tagesgang an Sonn- und Feiertagen. Obere Tabelle absolute Werte in Personenstunden pro Jahr; untere Tabelle Anteile am Gesamtwert Personenstunden. (Untere Tabelle mit Einfärbung gemäss Anteil: hohe Anteile in rot und tiefe Anteile in blau) _____	134
Tabelle 55: Personenstunden der Reisenden in überlasteten Zügen (Nachfrage > 90% der Anzahl Sitzplätze) _____	136
Tabelle 56: Komfortverlustkosten der Reisenden in öffentlichen Verkehr für das Jahr 2019 (Überlast = Auslastung > 90% der Anzahl Sitzplätze) _____	143
Tabelle 57: CR-Funktionen und Parameter _____	154
Tabelle 58: Veränderung der Fahrleistungsentwicklung von 2017 auf 2019 _____	156
Tabelle 59: Übersicht gesamte Zeitverlustkosten _____	156

Abkürzungsverzeichnis

AB	Autobahnen
ASP	Abendspitze
ASTRA	Bundesamt für Strassen
BAZG	Bundesamt für Zoll und Grenzsicherheit
CR	Capacity-Restraint
DNWV	Durchschnittlicher
DTV	Durchschnittlicher Tagesverkehr
DWV	Durchschnittlicher Werktagsverkehr
ErZu	Ereignisdatenbank Zugmeldungen
FäG	Fahrzeugähnliche Geräte
FCD	Floating Car Data
FPD	Floating Phone Data
FRASY	Frequenzauswertesystem
Fzg	Fahrzeug
Fzkm	Fahrzeugkilometer
GIS	Geographisches Informationssystem
GPS	Global Position System
GV	Güterverkehr
HLS	Hochleistungsstrassen
HOP	Hochrechnung Personenverkehr
HVS	Hauptverkehrsstrassen
KFV	Kosten und Finanzierung des Verkehrs
LI	Lieferwagen
LMW	Leichter Motorwagen
LOS	Level of Service
LSVA	Leistungsabhängige Schwerverkehrsabgabe
LV	Langsamverkehr (Fuss- und Veloverkehr)
LW	Lastwagen
LZ	Lastzüge
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MSP	Morgenspitze
MZMV	Mikrozensus Mobilität und Verkehr
NIBA	Nachhaltigkeitsbeurteilung für Bahninfrastrukturprojekte
NPVM	Nationales Personenverkehrsmodell

OTT	OpenTimeTable
ÖV	Öffentlicher Verkehr
PCU	Passenger car unit (Personenwageneinheit)
PV	Personenverkehr
PW	Personenwagen
PWE	Personenwageneinheit
RPV	Regionaler Personenverkehr
SASVZ	Schweizerische automatische Verkehrszählung
SP	Stated Preference
SMW	Schwerer Motorwagen
SV	Schwerverkehr
TMC	Travel Message Channel
VOT	Value of Time
VOR	Value of Reliability
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute
VTT	Value of Travel Time
WIM	Weigh in motion

Literatur

- Akbar, P. A., G. Duranton 2017:** Measuring the cost of congestion in highly congested city: Bogotá, Development Bank of Latin America. Working Paper.
- ARE 2012:** Übersicht zu Stated Preference-Studien in der Schweiz und Abschätzung von Gesamtelastizitäten, Bern.
- ARE 2015:** Aggregierte Methode Güterverkehr (AMG) – Methodenbeschrieb, Bundesamt für Raumentwicklung, Bern, September 2015.
- ARE 2016:** SP-Befragung 2015 zum Verkehrsverhalten. Bundesamt für Raumentwicklung (ARE), September 2016.
- ARE 2017:** Analyse der SP-Befragung zur Verkehrsmodus- und Routenwahl, Bundesamt für Raumentwicklung, September 2017.
- ARE 2020:** Modelletablierung Nationales Personenverkehrsmodell (NPVM) 2017. Schlussbericht, Bundesamt für Raumentwicklung (ARE), Mai 2020.
- ARE 2022:** Externe Kosten und Nutzen des Verkehrs in der Schweiz – Strasse-, Schienen-, Luft- und Schiffsverkehr 2019. Bundesamt für Raumentwicklung (ARE), Juni 2022.
- ASTRA 2016:** Verkehrsentwicklung und Verfügbarkeit der Nationalstrassen, Jahresbericht 2016
- ASTRA 2018:** Verkehrsentwicklung und Verfügbarkeit der Nationalstrassen. Jahresbericht 2018.
- ASTRA 2020:** Verkehrsentwicklung und Verkehrsfluss 2019. Ausgabe 2019 V1.00, Juni 2020.
- ASTRA 2022a:** Verkehrsentwicklung und Verkehrsfluss 2022. Ausgabe 2021 V1.0, Juni 2022.
- ASTRA 2022b:** Verkehrsfluss und Stauaufkommen, Definitionen, URL: <https://www.astra.admin.ch/astra/de/home/themen/nationalstrassen/verkehrsfluss-stauaufkommen/definitionen.html>.
- Axhausen K. W., M. Vrtic 2002:** Experiment mit einem dynamischen Umlegungsverfahren. Institut für Verkehrsplanung und Transporttechnik, Strasse- und Eisenbahnbau (IVT), ETH Zürich, Zürich.
- Axhausen, K. W., Hess, S., König, A., Abay, G., Bates, J. Bierlaire, M. 2008:** Income and distance elasticities of values of travel time savings: New Swiss results, Transport Policy, Volume 15, Issue 3, 173-185.
- Ball et al. 2010:** Total Delay Impact Study A Comprehensive: Assessment of the Costs and Impacts of Flight Delay in the United States, Final report, National Center of Excellence for Aviation Operations Research (NEXTOR), 2010.
- Bansal, P. & Graham, D. Bansal und Graham 2020:** A Dynamic Choice Model with Heterogeneous Decision Rules Application in Estimating the User Cost of Rail Crowding. Preprint (2020).
- Bastes J. et al. 2001:** The valuation of reliability for personal travel. Transportation Research Part E, 37, 191–229.

- Bešinović, N. 2020:** Resilience in railway transport systems: a literature review and research agenda, *Transport Reviews*
- Björklund, G & Swärdh, J. 2015:** Valuing in-vehicle comfort and crowding reduction in public transport, *CTS Working Paper 2015:12*.
- BFS 2019a:** Statistik der Kosten und der Finanzierung des Verkehrs. Methodenbericht, Version 2.0, Neuchâtel 2019.
- BFS 2019b:** Berechnung der Verkehrsmittelkosten des motorisierten Strassenverkehrs, Neuchâtel, 2019.
- BFS 2021a:** Schweizerischer Lohnindex, Tabelle, Entwicklung der Nominallohne, der Konsumentenpreise und der Reallöhne, veröffentlicht am 30.04.2021, Neuchâtel 2021
- BFS 2021b:** Landesindex der Konsumentenpreise (LIK), Tabelle, Totalindex auf allen Indexbasen, veröffentlicht am 02.08.2021, Neuchâtel 2021
- BFS 2021c:** Kosten und Finanzierung des Verkehrs 2018 – Strassen-, Schienen- und Luftverkehr, Neuchâtel, November 2021.
- Brueckner J. K. 2005:** Internalization of airport congestion: A network analysis, In: *International Journal of Industrial Organization*, 23(7–8), S. 599–614.
- Bureau of Transport and Regional Economics (BTRE) 2007:** Estimating urban traffic and congestion cost trends for Australian cities.
- Bundesrat 2010:** Zukunft der nationalen Infrastrukturnetze in der Schweiz. Bericht des Bundesrates vom 17. September 2010.
- BVU, TNS Infratest, KIT 2016:** Entwicklung eines Modells zur Berechnung von modalen Verlagerungen im Güterverkehr für die Ableitung konsistenter Bewertungssätze für die Bundesverkehrswegeplanung. Endbericht.
- Commissariat Général du Plan 2001:** Transports : choix des investissements et coût des nuisances, Commissariat Général du Plan, Groupe Présidé par M. Boiteux, L. Baumstarck rapporteur.
- Cook A. 2015:** European airline delay cost reference values – update and extended values (Version 4.1), University of Westminster, 24. Dezember 2015.
- Cook A. und Tanner G. 2011:** European airline delay cost reference values – Final Report (Version 3.2), University of Westminster, London, 2011.
- Corman F. Henken, J 2021:** Estimating aggregate railway performance from realized empirical data. Submitted to the 9th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis (ICROMA), Rail Beijing.
- Cuniasse, P.-A., Buisson, C., Rodriguez, J., Teboul, E., & de Almeida, D. 2015:** Analyzing railroad congestion in a dense urban network through the use of a road traffic network fundamental diagram concept. *Public Transport*, 7(3), 355–367.

- Dings et al. 2003:** External Costs of Aviation, im Auftrag des Umweltbundesamts, 2003.
- Doll C. 2002:** UNITE Case Studies 7A to 7D: Inter-Urban and Rail User Costs.
- Eliasson J. 2004:** Car drivers' valuations of travel time variability, unexpected delays and queue driving. European Transport Conference, Transek AB, Sweden.
- Eurocontrol 2020:** CODA Digest – All-Causes delay and cancellations to air transport in Europe. Annual report for 2019.
- Gerike R. 2018:** Das Phänomen Stau. Verkehrspolitik, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Dresden, 2018.
- Goldmann K, G. Sieg 2021:** Quantifying the phantom jam externality: the case of an Autobahn section in Germany. European Transport Research Review, Vol. 13, No. 1, 1–15.
- Greenshield B. D. 1993:** A study in highway capacity. Highway Research Board Proceedings 14, 448–447.
- Gysin, K. 2018:** An Investigation of the Influences on Train Dwell Time. MSc Thesis, IVT, ETH Zürich.
- Harrison M. 2012:** The problem of road congestion: the futility of 'avoidable cost' estimates. Agenda: a journal of policy analysis and reform, Vol. 19, No. 2, 77–86.
- Haywood, L., Koning, M., 2013:** Estimating Crowding Costs in Public Transport. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung. Discussion Paper.
- Haywood, L., Koning, M., 2015:** The distribution of crowding costs in public transport: New evidence from Paris. Transportation Research Part A 77, 182–201.
- Hüschelrath K. 1998:** Infrastrukturengpässe im Luftverkehr: die Vergabe von Start- und Landerechten an Flughäfen, Springer, Wiesbaden, 1998.
- ITA 2000:** Cost of air Transport delay in Europe, Institut du Transport Aérien, Final Report, 2000.
- INFRAS 1998:** Staukosten im Strassenverkehr. Im Auftrag des Bundesamts für Strassen (ASTRA), Schlussbericht, Dezember 1998.
- INFRAS 2011:** CO₂-Abgabe auf Treibstoffen, im Auftrag BAFU, Zürich.
- INFRAS und Ecoplan 2019:** Externe Effekte des Verkehrs 2015. Bundesamt für Raumentwicklung (ARE), Zürich/Bern, März 2019.
- Kaddoura I., B. Kickhöfer 2014:** Towards an Agent-based marginal Social Cost Approach. Technische Universität Berlin, Deutschland.
- Keller M. 2019:** Staukosten Schweiz 2015 Schlussbericht. Im Auftrag des Bundesamts für Raumentwicklung (ARE), Bern, März 2019.
- Keller M. et al. 2007:** Staukosten des Strassenverkehrs in der Schweiz - Aktualisierung 2000/2005. Im Auftrag des Bundesamts für Raumentwicklung (ARE), Schlussbericht, Bern, 2007.

- Keller M. und P. Wüthrich 2012:** Neuberechnung der Stauzeitkosten. Im Auftrag des Bundesamts für Raumentwicklung (ARE), Schlussbericht, Bern, April 2012.
- Keller M. und P. Wüthrich 2016:** Neuberechnung Staukosten Schweiz 2010-2014. Im Auftrag des Bundesamts für Raumentwicklung (ARE), 2016.
- Knieps G. 1992:** Infrastrukturprobleme im europäischen Luftverkehr, In: Schweizerische Zeitschrift für Volkswirtschaft und Statistik 128(4), S. 643–653, Februar 1992.
- Knieps G. 2007:** Netzökonomie, Grundlagen – Strategien – Wettbewerbspolitik, Gabler, 1. Auflage, Wiesbaden, April 2007.
- Kupferschmidt F. 2018:** Marktversagen. Markt und Staat, Springer Gabler, Wiesbaden.
- Kuwahara M. 2007:** A theory and implications on dynamic marginal cost. Transportation Research Part A: Policy and Practice, Vol. 41, No. 7, 627–643.
- Kroes, E., Kouwenhoven, M., Debrincat, L., Pauget, N. 2014:** Value of Crowding on Public Transport in Île-de-France, France. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2417. 37-45. 10.3141/2417-05.
- Lindsey C.R., E. T. Verhoef 1999:** Congestion Modelling.
- Litman 2011:** Transportation Cost and Benefit Analysis, Victoria Transport Policy Institute.
- Maibach et al. 2005:** Transportkostenrechnung (TRAKOS) – Konzept und Pilotrechnung. Schlussbericht, im Auftrag des Bundesamts für Statistik (BFS) und Bundesamt für Raumentwicklung (ARE), Zürich, März 2005.
- Maibach et al. 2006:** Transportkostenrechnung (TRAKOS) – Konzept und Pilotrechnung. Expertenbericht, im Auftrag des Bundesamts für Statistik (BFS) und Bundesamt für Raumentwicklung (ARE), Zürich, Oktober 2006.
- Maibach et al. 2008:** Weiterentwicklung der Transportrechnung – Vertiefungsarbeiten. Schlussbericht, im Auftrag des Bundesamts für Statistik (BFS) und Bundesamt für Raumentwicklung (ARE), Zürich/Bern, August 2008.
- Mohring, H. 1972:** Optimization and Scale Economies in Urban Bus Transportation, American Economic Review, 591-604.
- Molin et al. 2020:** Does conducting activities while traveling reduce the value of time Evidence from a within-subjects choice experiment. Transportation Research Part A: Policy and Practice 132.
- Molloy J., Ch. Tchervenkov, K. W. Axhausen 2021:** Estimating the external costs of travel on GPS tracks, Transportation Research Part D, Volume 95, Juni 2021.
- Noland R.B., J.W. Polak 2002:** Travel Time Variability - A Review of Theoretical and Empirical Issues. Transportation Reviews, Vol. 22, No. 2, 39–54.
- Oum T.H., W.G. Waters, J.S. Yong:** A Survey of recent estimates for prices elasticities of demand of transport, PPR Working Paper WPS 359, Januar 1990.

- Parbo et al. 2016:** Passenger Perspectives in Railway Timetabling: A Literature Review, *Transport Reviews* 40:4
- Pels E. und Verhoef E. 2004:** The economics of airport congestion pricing, In: *Journal of Urban Economics*, 55(2), S. 257–277.
- Pindyck R. S., D. L. Rubinfeld 2009:** *Mikroökonomie*. Pearson Deutschland GmbH, München.
- Prognos 2000:** Sensitivitäten von Angebots- und Preisänderungen im Personenverkehr, SVI-Forschungsauftrag 44/98, Basel, 9. Januar 2000.
- PTV/TCI Röhling/Mann, Hans Ulrich 2016:** *Methodenhandbuch Bundesverkehrswegeplan 2030*, FE-Projekt-Nr.: 97.358/2015, Karlsruhe, Berlin, Waldkirch, München, 08. März 2016
- Rapp Trans & IRE 2005:** Bewertung von Qualitätsmerkmalen im Güterverkehr. Forschungsauftrag ASTRA 2002/011.
- Rapp Trans & IVT 2008:** Modal Split Funktionen im Güterverkehr. Forschungsauftrag SVI 2004/081.
- Russo A. et al. 2019:** Welfare Losses of Road Congestion.
- Santos G. 2000:** Road Pricing on the Basis of Congestion Costs. *Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1732, No. 1, 25–31.
- Small K. A., E. T. Verhoef 2007:** *The Economics of Urban Transportation*.
- Suter et al. 2002:** UNification of accounts and marginal costs for Transport Efficiency – Deliverable 5, Appendix 2: The Pilot Accounts for Switzerland.
- Van Essen et al. 2019:** *Handbook on the external costs of transport*. Version 2019, im Auftrag der Europäischen Kommission.
- Van Woensel T., F.R.B Cruz 2009:** A stochastic approach to traffic congestion costs. *Computers & Operations Research*, Vol. 36, 1731–1739.
- Vickrey W. W. 1963:** Pricing in Urban and Suburban Transport. *American Economic Review*, Vol 53, No. 2, 452–465.
- Vrtic M. und P. Fröhlich 2006:** Was beeinflusst die Wahl der Verkehrsmittel, In: *Der Nahverkehr*, Jg. 2006, Nr. 4, S. 52–57.
- Walters A. A. 1961:** The theory and measurement of private and social cost of highway congestion. *Econometrica*, Vol. 29, No. 4, 676–697.
- Wardman, M., & Whelan, G. 2010:** Twenty Years of Rail Crowding Valuation Studies: Evidence and Lessons from British Experience. In *Transport Reviews*. **Wardman, M., & Batley, R. 2014:** Travel time reliability: a review of late time valuations, elasticities and demand impacts in the passenger rail market in Great Britain.
- Weidmann, U. 1994:** *Der Fahrgastwechsel im öffentlichen Personenverkehr*. Dissertation, ETH Zürich

- Wener et al. 2005:** Commuting stress: Psychological effects of a trip and spillover into the workplace. *Transportation Research Record* 1924/2005.
- Whelan, G. & Crockett, J. 2009:** An Investigation of the Willingness to Pay to Reduce Rail Overcrowding, Conference on Choice Modelling, Harrogate, England.
- Yap, M., Oded C. & van Arem, B. 2020:** Crowding valuation in urban tram and bus transportation based on smart card data, *Transportmetrica A: Transport Science*, 16:1, 23-42
- Yap, M. & Cats, O. 2021:** Taking the path less travelled: Valuation of denied boarding in crowded public transport systems. *Transportation Research Part A* 147, 1-13.
- Yuan D. 2007:** Flight Delay-Cost Simulation Analysis and Airline Schedule Optimization, Dissertation, RMIT University, Victoria, Australia, 2007.