

Bau-, Umwelt- und Wirtschaftsdepartement des Kantons Luzern

# Verkehrsemissionen im Kanton Luzern Jahr 2022

Schlussbericht  
Bern, 18. Januar 2024

Benedikt Notter  
Brian Cox

# Impressum

## Verkehrsemissionen im Kanton Luzern

Jahr 2022

Schlussbericht

Bern, 18. Januar 2024

7519a\_Verkehrsemissionen\_Kt\_LU\_2022.docx

## Auftraggeber

Bau-, Umwelt- und Wirtschaftsdepartement des Kantons Luzern

(BUWD)

Bahnhofstrasse 15, 6002 Luzern

Tel. +41 41 228 51 55

buwd@lu.ch

## Projektleitung

Ronja Bohnenblust (Kanton Luzern, BUWD)

## Autorinnen und Autoren

Benedikt Notter

Brian Cox

INFRAS, Sennweg 2, 3012 Bern

Tel. +41 31 370 19 19

info@infras.ch

## Begleitgruppe

Jürgen Ragaller (Kanton Luzern, BUWD)

Danièle Müller (Kanton Luzern, vif)

Roland Müller (Kanton Luzern, uwe)

Evi Rothenbühler (Kanton Luzern, rawi)

Ronny Meier (Stadt Luzern)

Moritz Kulawik (e4plus)

## Inhalt

<b>Impressum</b>	<b>2</b>
<b>Inhalt</b>	<b>3</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>5</b>
<b>1. Einführung</b>	<b>8</b>
1.1. Ausgangslage	8
1.2. Auftrag und Ziel	8
<b>2. Vorgehen</b>	<b>10</b>
2.1. Übersicht Methodik	10
2.1.1. Strasse	10
2.1.2. Schiene	11
2.1.3. Non-Road-Verkehr	11
2.1.4. Schifffahrt	13
2.1.5. Stationäre Anlagen	14
2.1.6. Sektorübergreifende Aspekte	14
2.2. Aufbereitung Strassenverkehr	15
2.2.1. Übersicht	15
2.2.2. Aufbereitung Strassennetz	15
2.2.3. Aufbereitung Verkehrsmengen	16
2.2.4. Aufbereitung Bestände, Starts, Stopps	19
2.2.5. Linienbusse	20
2.2.6. Reisebusse in der Stadt Luzern	20
2.2.7. Emissionsmodellierung	22
2.3. Aufbereitung Schiene	23
2.4. Aufbereitung Non-Road	23
2.5. Aufbereitung Schifffahrt	25
2.5.1. Fahrgastschiffe	25
2.5.2. Übrige Schifffahrt	25
2.6. Aufbereitung Stationäre Anlagen	26
<b>3. Mengengerüste</b>	<b>27</b>

3.1.	Strasse	27
3.2.	Schiene	28
3.3.	Non-Road	28
3.4.	Schifffahrt	29
3.5.	Stationäre Motoren und Gasturbinen	29
<b>4.</b>	<b>Emissionen und Energieverbrauch</b>	<b>30</b>
4.1.	Übersicht	30
4.2.	Strasse	32
4.3.	Schiene	35
4.4.	Non-Road	37
4.5.	Schifffahrt	39
4.6.	Stationäre Motoren und Gasturbinen	41
<b>5.</b>	<b>Diskussion und Empfehlungen</b>	<b>43</b>
5.1.	Vergleich mit anderen Studien	43
5.2.	Vorgehen bei Aktualisierungen	47
<b>Annex</b>		<b>49</b>
<b>A1.</b>	<b>Methodik</b>	<b>49</b>
<b>A2.</b>	<b>Emissionsresultate</b>	<b>52</b>
A2.1.	Strasse	52
A2.2.	Schiene	53
A2.3.	Non-Road	54
A2.4.	Schifffahrt	55
A2.5.	Stationäre Motoren und Gasturbinen	56
<b>Glossar</b>		<b>57</b>
<b>Literatur</b>		<b>58</b>

## Zusammenfassung

Der Kanton Luzern benötigt aus verschiedenen Gründen aktuelle Datengrundlagen zu den Treibhausgas- (THG-) und Luftschadstoffemissionen des Verkehrs. Unter anderem soll basierend auf dem kantonalen Planungsbericht Klima und Energie (Kanton Luzern 2021) und der entsprechenden Massnahmen- und Umsetzungsplanung (Kanton Luzern 2023) die THG-Bilanz des Kantons Luzern errechnet werden. Zudem soll der kantonale Luftschadstoffkataster, welcher hinsichtlich Strassenverkehr letztmals 2016 aufdatiert wurde, aktualisiert werden. Das Büro INFRAS wurde daher mit der Modellierung der Verkehrsemissionen für das Jahr 2022 beauftragt.

Zum «Verkehr» zählen dabei folgende Emissionsquellen:

- Strassenverkehr
- Schienenverkehr
- Schifffahrt
- Non-Road-Verkehr (mobile Maschinen)
- Stationäre Motoren und Gasturbinen

Die Berechnung der Emissionen basiert auf folgenden Grundlagen:

- **Strassenverkehr:** Modellierung basierend auf dem Handbuch Emissionsfaktoren für den Strassenverkehr (HBEFA), Version 4.2, und dem Verkehrsmengengerüst gemäss dem kantonalen Gesamtverkehrsmodell (GVM-Zustand 2017, Kanton Luzern et al. 2020) sowie Verkehrszählraten aus den Jahren 2017 und 2022. Die Reisedaten in der Stadt Luzern werden basierend auf einer Studie der Stadt Luzern (2023) gesondert behandelt.
- **Schiene:** Verbrauchsfaktoren aus den Ex-Post-Analysen des Energiebedarfs (Prognos et al. 2022) und den Energieperspektiven des BFE (Prognos et al. 2021) sowie Schienenabriebs-Emissionsfaktoren (basierend auf INFRAS 2007, BAFU 2010) werden mit Mengengerüsten basierend auf dem Lärmbelastungskataster für Eisenbahnanlagen (BAFU 2019) und OpenTransportData (OpenTransportData 2022) multipliziert.
- **Non-Road-Maschinen:** Die Emissionen des entsprechenden gesamtschweizerischen Emissionsinventars (BAFU 2015) werden mittels verschiedener Indikatoren nach den Gemeinden des Kantons desaggregiert und auf geeignete Flächen (wie Siedlungs-, Landwirtschafts- oder Waldflächen) alloziert.
- **Schifffahrt:** Die Betriebsstunden der Fahrgastschiffe basieren auf den Angaben der Schifffahrtsgesellschaften SGV und SNG und werden mittels OpenTransportData (2022) auf die Gemeinden des Kantons Luzern alloziert. Für die restlichen, kleineren Schiffe wird analog den Non-Road-Maschinen vorgegangen.

- **Stationäre Motoren und Gasturbinen:** Für die kleineren Anlagen werden die Emissionen des entsprechenden gesamtschweizerischen Emissionsinventars (INFRAS 2022) mittels der Bevölkerung als Indikator sowie basierend auf Angaben der WKK-Statistik des BFE (Kaufmann 2023) nach den Gemeinden des Kantons desaggregiert und auf die Siedlungsflächen alloziert. Für die Verdichterstation Ruswil der Transitgas AG können die entsprechenden Emissionen 1:1 dem gesamtschweizerischen Emissionsinventar entnommen werden.

Gemäss den Resultaten hat der Verkehrssektor im Jahr 2022 im Kanton Luzern ca. 12'300 TJ Endenergie verbraucht und dabei etwa 800'000 t fossiles CO<sub>2</sub> emittiert (Tabelle 1). Von den wichtigsten Luftschadstoffen wurden ca. 1500 t Stickoxide (NO<sub>x</sub>) und 170 t Feinstaub (PM10) emittiert; von letzterem stammen nur ca. 14% aus Abgasen, der Rest entsteht durch Reifen-, Brems-, und Strassenabrieb sowie Aufwirbelung auf der Strasse.

Der Strassenverkehr ist innerhalb des Verkehrssektors der Hauptverursacher von Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen. Er verbraucht rund 82% der Energie und verursacht 88% der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Der Schienenverkehr ist verantwortlich für knapp 4% des Energieverbrauchs, emittiert aber kein CO<sub>2</sub>.

Auch hinsichtlich Luftschadstoffen ist der Strassenverkehr die Hauptquelle innerhalb des Verkehrssektors – er verursacht 79% der NO<sub>x</sub>- und 94% der PM10-Emissionen. Andere Quellen wie die Non-Road-Maschinen oder die Schifffahrt haben aber bei den Luftschadstoffemissionen einen überproportionalen Anteil im Vergleich zum Energieverbrauch. Das liegt v.a. daran, dass die Emissionsstandards in diesen Sektoren noch weniger weit fortgeschritten und weniger strikt sind – daher gibt es dort noch zahlreiche Dieselmotoren (auch ältere) ohne moderne Abgasnachbehandlung (wie z.B. Dieselpartikelfilter oder SCR-Katalysatoren).

Tabelle 1: Übersicht der Verkehrsemissionen pro Quelle im Kanton Luzern im Jahr 2022.

Emissionsquelle	CO <sub>2</sub> (fossil) [t/a]	Energieverbrauch [TJ/a]	NO <sub>x</sub> [t/a]	PM10 (Abgas) [t/a]	PM10 (Abrieb, Aufwirbelung) [t/a]
<b>Absolute Werte</b>					
Strassenverkehr	704 436	10 036	1 200	13.7	146.6
Schiene	0	454	0	0.0	0.048
Schifffahrt	7 270	101	49	1.3	0.0
Non-Road	48 388	670	181	6.6	0.0
Stationäre Anlagen	39 780	1 041	83	1.6	0.0
<b>TOTAL</b>	<b>799 874</b>	<b>12 303</b>	<b>1 513</b>	<b>23.2</b>	<b>146.7</b>
<b>% des Totals</b>					
Strassenverkehr	88.1%	81.6%	79.3%	58.9%	100.0%
Schiene	0.0%	3.7%	0.0%	0.0%	0.0%
Schifffahrt	0.9%	0.8%	3.3%	5.5%	0.0%
Non-Road	6.0%	5.4%	11.9%	28.5%	0.0%
Stationäre Anlagen	5.0%	8.5%	5.5%	7.0%	0.0%

## 1. Einführung

### 1.1. Ausgangslage

Der Kanton Luzern benötigt aus verschiedenen Gründen aktuelle Datengrundlagen zu den Treibhausgas- (THG-) und Luftschadstoffemissionen des Verkehrs.

Als Hauptgrund legen der kantonale Planungsbericht Klima und Energie (Kanton Luzern 2021) und die entsprechende Massnahmen- und Umsetzungsplanung (Kanton Luzern 2023) fest, dass ein Monitoring und Controlling aufgebaut werden soll, mittels welchem die Zielerreichung der Klima- und Energiepolitik regelmässig überprüft wird. Dies erfordert unter anderem die Erarbeitung einer kantonalen Treibhausgasbilanz für den Verkehrssektor, welche ab einem Basisjahr (2022) in 5-Jahres-Intervallen berechnet und aktualisiert werden soll. Diese THG-Bilanz soll in das bestehende Luzerner Klima- und Energie Informations-System (LU-KEIS) einfließen, welches im Rahmen des Monitorings und Controllings erweitert wird.

Des Weiteren basiert der aktuelle kantonale Luftschadstoffkataster, welcher bisher alle 5-10 Jahre aktualisiert wurde, auf dem kantonalen Verkehrsmodell (KVM) aus dem Jahr 2012 und der HBEFA-Version 3.2 aus dem Jahr 2014 (Kanton Luzern 2016). Er bedarf daher einer Aktualisierung.

Mit dem aktuellen Gesamtverkehrsmodell des Kantons (GVM, Kanton Luzern et al. 2020) liegt für die wichtigste Emissionsquelle, den Strassenverkehr, eine kürzlich aktualisierte Datengrundlage für die Modellierung der THG- und Luftschadstoffemissionen vor.

Die Stadt Luzern hat bereits in vergangenen Jahren die Verkehrsemissionen auf Gemeindegebiet basierend auf dem GVM geschätzt (INFRAS 2006, 2013, 2020); somit bestehen grosse methodische Synergien zu einer Verkehrsemissionsmodellierung auf Kantonsebene.

Schliesslich existieren potenzielle Synergien zwischen der Datenaufbereitung für eine Emissionsmodellierung und dem kantonalen Strassenlärmkataster, da gleiche oder ähnliche Inputs (wie Verkehrsmengen und Daten zum Strassennetz) für beide notwendig sind. Der geplante neue Emissionslärmkataster (ELK) soll zudem möglicherweise in das LU-KEIS integriert werden.

### 1.2. Auftrag und Ziel

Vor dem oben beschriebenen Hintergrund wurde das Büro INFRAS mit der Ausarbeitung der vorliegenden Studie beauftragt. **Ziel ist die Modellierung der Verkehrsemissionen für das Bezugsjahr 2022 sowohl für das LU-KEIS (THG-Emissionen) als auch für den Luftschadstoff-Emissionskataster (Luftschadstoffemissionen).**

Zum «Verkehr» zählen dabei folgende Emissionsquellen:

- Strassenverkehr
- Schienenverkehr
- Schifffahrt
- Non-Road-Verkehr (mobile Maschinen)
- Stationäre Motoren und Gasturbinen

Die stationären Motoren und Gasturbinen mögen auf den ersten Blick als ein Fremdkörper unter den Verkehrsaktivitäten erscheinen, da es sich dabei um stationäre und nicht mobile Anlagen handelt; da Motoren und Gasturbinen aber technologisch – und daher auch von ihren Emissionen – nahe verwandt sind mit den Antriebstechnologien des Verkehrs, werden sie in der Schweiz als Emissionsquellen im Allgemeinen zum Verkehr gezählt.

Folgende Parameter wurden im Verlauf der Studie erarbeitet:

- Für das LU-KEIS, aggregiert nach Gemeinde
  - Verkehrsaktivitäten (Fahrzeugkilometer, Personen-/Tonnenkilometer, Arbeitsstunden für Non-Road-Maschinen und stationäre Anlagen)
  - Endenergieverbrauch (TJ)
  - Treibhausgasemissionen (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, und CO<sub>2</sub>e) (t).
- Für den Luftschadstoff-Emissionskataster, räumlich so detailliert wie möglich, die Emissionen folgender Schadstoffe in t:
  - Stickoxide (NO<sub>x</sub>) [t/a]
  - Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) [t/a]
  - Feinstaub (PM10, PM2.5) [t/a] (unterschieden nach Abgas und Abrieb/Aufwirbelung)
  - Methan (CH<sub>4</sub>) [t/a]
  - Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe (NMHC) [t/a]
  - Kohlenwasserstoffe (HC) [t/a]
  - Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) [t/a]
  - Lachgas (N<sub>2</sub>O) [t/a]
  - Ammoniak (NH<sub>3</sub>) [t/a]
  - Benzol (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>) [t/a]
  - Kohlenmonoxid (CO) [t/a]
  - Black Carbon (BC) [t/a] (unterschieden nach Abgas und Abrieb/Aufwirbelung)
- Für die Applikation «Ecospeed Region» werden zusätzlich folgende Parameter aufbereitet und geliefert:
  - Treibstoffmix Strasse/Schiene Personen/Güter (energiebezogene Anteile in %)
  - Spezifischer Endenergieverbrauch Strasse/Schiene Personen/Güter (kWh/Fzkm)

- Nur Strassenverkehr: Strassenkategorien-Mix Personen/Güter (Fzkm-Anteile Autobahn, ausserorts, innerorts in %)
- Fahrzeugbelegung Strasse/Schiene Personen/Güter (Personen bzw. Tonnen/Fzg)

## 2. Vorgehen

### 2.1. Übersicht Methodik

#### 2.1.1. Strasse

Die Emissionen des Strassenverkehrs werden mit dem Handbuch für Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs (HBEFA), Version 4.2 (Notter, Keller, et al. 2022<sup>1</sup>) berechnet. Es deckt den Strassenverkehr sowie die im aktuellen Kontext interessierenden Schadstoffe ab. Die Experten-version des HBEFA enthält neben der Emissionsfaktoren-Abfrage unter anderem ein Emissionsmodell, welches die Berechnung des Endenergieverbrauchs und der Emissionen (des Strassenverkehrs) unter Verwendung der im HBEFA veröffentlichten Emissionsfaktoren mittels gegebener Input-Verkehrsmengengerüste erlaubt. Diese umfassen vier Kategorien:

- Fahrleistungen zur Emissionsberechnung der Fahrzeuge im warmen Betriebszustand, sowie der sogenannten „running losses“ von Benzin durch Verdampfung, gemäss der Berechnungsformel:

$$\text{Emission} = \text{Fahrleistung} \times \text{Emissionsfaktor "warm"}$$

$$\text{bzw. Fahrleistung} * \text{Emissionsfaktor „running losses“}$$

- Anzahl Starts zur Berechnung der Start-Zuschläge gemäss der Formel:

$$\text{Startzuschläge} = \text{Anzahl Startvorgänge} \times \text{Start-Emissionsfaktor}$$

- Anzahl Stopps zur Berechnung der Verdampfungsemissionen (nur Kohlenwasserstoffe) nach Motorabstellen gemäss der Berechnungsformel:

$$\text{Abstellemissionen} = \text{Anz. Abstellvorgänge} \times \text{Abstell-Emissionsfaktor}$$

- Fahrzeugbestand zur Berechnung der Verdampfungsemissionen (nur Kohlenwasserstoffe) infolge Tankatmung gemäss der Berechnungsformel:

$$\text{Tankatmungsemissionen} = \text{Anz. Fahrzeuge} \times \text{Tankatmungs-Emissionsfaktor}$$

Die wichtigsten Inputdaten für die Anwendung des Emissionsmodells sind Gesamtfahrleistungen oder abschnittsweise Belastungen, welche einem Gesamtverkehrsmodell (GVM) entnommen werden können – in diesem Fall dem GVM des Kantons Luzern. Weiter werden Statistiken

---

<sup>1</sup> S. auch [www.hbefa.net](http://www.hbefa.net)

zu den Fahrzeugbeständen (ASTRA 2023) sowie der periodische Mikrozensus Mobilität (BFS 2022) für die Anzahl Starts/Stopps pro Fahrzeug und Tag als Inputs verwendet, Angaben des VVL zur verwendeten Bus-Antriebstechnologie pro Linie, sowie eine Studie der Stadt Luzern (2023) zur sogenannten «Stadtpassage» zum Reisedar-Aufkommen in der Stadt.

Da das HBEFA die Trolleybusse und insbesondere die Emissionen aus deren Fahrdrabtrieb nicht enthält, werden letztere älteren Studien des BAFU (INFRAS 2007, BAFU 2010a) entnommen. Für Energieverbrauch und Brems-, Reifen und Strassenabriebemissionen werden die HBEFA-Angaben für Elektrobusse verwendet.

Das Vorgehen zur Aufbereitung dieser Datensätze ist in Kap. 2.2 beschrieben.

Neben den anwendungsspezifischen Inputdaten (also im vorliegenden Fall den Mengengeräten des Kantons Luzern) stützt sich das HBEFA einerseits auf Messdaten zu Emissionen und daraus mittels detaillierten Modellen (Hausberger und Rexeis 2018) hergeleiteten Basis-Emissionsfaktoren und Korrekturfunktionen für Alter, Temperatur, Treibstoffqualität etc. und andererseits auf ein Flottenmodell, das auf Basis von Bestandes- und Fahrleistungsdaten des jeweiligen Landes die Flottenzusammensetzungen bezogen auf den Bestand und die Fahrleistungen nach Strassenkategorie (Autobahn, innerorts, ausserorts) berechnet. Für Details zur HBEFA-Methodik s. z.B. BAFU (2010b).

### 2.1.2. Schiene

Beim elektrisierten Schienenverkehr interessieren zwei umweltrelevante Parameter:

- Energieverbrauch
- Feinstaub-Emissionen aus dem Schienenabrieb

Der Energieverbrauch wird mittels der Verbrauchsfaktoren abgeschätzt, welche INFRAS jeweils in den Ex-Post-Analysen des Energiebedarfs (Prognos et al. 2022) sowie den Energieperspektiven des BFE (Prognos et al. 2021) anwendet.

Die Abriebs-Emissionsfaktoren werden vorhandenen Studien und Abschätzungen des BAFU zu dieser Thematik (INFRAS 2007, BAFU 2010a) entnommen. Diese stützen sich auf ältere und in den meisten Fällen minimale Datengrundlagen, was die Unsicherheit der Ergebnisse erhöht – Alternativen existieren jedoch bislang nicht.

### 2.1.3. Non-Road-Verkehr

INFRAS hat das nationale Emissionsinventar für den Non-Road-Verkehr im Auftrag des BAFU erarbeitet (BAFU 2015). Die Emissionen des Non-Road-Verkehrs in den Gemeinden des Kantons

Luzern schätzen auf Basis des gesamtschweizerischen Emissionsinventars ab, indem wir annehmen, dass sich die Aktivität der entsprechenden Maschinen in den Gemeinden des Kantons Luzern zu derjenigen in der ganzen Schweiz proportional zu einem inhaltlich verknüpfbaren Indikator verhält, für den statistische Angaben sowohl für die Gemeinden als auch für die Schweiz vorhanden sind. Zum Beispiel nehmen wir an, dass der Anteil der Aktivität von Baumaschinen dem Bevölkerungsanteil in Gemeinde XY an der Schweiz entspricht, oder dass der Anteil der Aktivität land- und forstwirtschaftlicher Maschinen dem Flächenanteil von Landwirtschafts- oder Waldfläche derselben Gemeinde an der ganzen Schweiz entspricht.

Tabelle 2 bietet eine Übersicht zu den verwendeten Indikatoren für die Desaggregation der Emissionen aus dem Schweizer Emissionsinventar nach den Gemeinden des Kantons Luzern, sowie zu den verwendeten räumlichen Bezugsgeometrien, auf welche die Emissionen für den Luftschadstoff-Emissionskataster alloziert werden.

Zu beachten ist hinsichtlich der Abgrenzung des «Non-Road-Verkehrs», dass die Schifffahrt, welche im Schweizer Emissionsinventar ebenfalls zum Non-Road-Verkehr gezählt wird, hier gesondert behandelt wird (s. nächstes Kapitel). Bei der Schiene werden die Emissionen der dieselbetriebenen Rangier- und Unterhaltsfahrzeuge zum Non-Road-Verkehr gezählt, die Güter- und Personenzüge werden aber separat behandelt (s. vorangehendes Kapitel).

**Tabelle 2: Indikatoren für die Desaggregation des schweizerischen Emissionsinventars für Non-Road-Maschinen nach Gemeinden des Kantons Luzern.**

<b>Maschinengattung</b>	<b>Indikator für Desaggregation</b>	<b>Räumlicher Bezug</b>	<b>Datenquelle</b>
Baumaschinen, Kommunalfahrzeuge <sup>2</sup>	Bevölkerung	Siedlungsflächen	Gemeindekennzahlen Schweiz (BFS 2021), swissnames3D (swisstopo 2020)
Industriemaschinen (ausser Pistenfahrzeuge, Kommunalmaschinen, Flughafenvorfeld <sup>3</sup> )	Arbeitsplätze (Vollzeit-äquivalente) im 2. Sektor	Siedlungsflächen	Gemeindekennzahlen Schweiz (BFS 2021), swissnames3D (swisstopo 2020)
Pistenfahrzeuge	Skilifte	Skilifte	Swissnames3D (swisstopo 2020)
Landwirtschaft	Landwirtschaftl. Nutzfläche	Landwirtschaftl. Nutzfläche	Gemeindekennzahlen Schweiz (BFS 2021), Geodatenportal RAWI
Forstwirtschaft	Waldfläche	Waldfläche	Gemeindekennzahlen Schweiz (BFS 2021), Geodatenportal RAWI
Garten/Hobby	Gartenfläche	Gartenfläche	Arealstatistik (BFS 2019)
Dieselfahrzeuge Schiene	Energieverbrauch Schiene	Schienenetz	Vorliegendes Projekt (s. Kap. 4.3)
Militär	Flächen Truppenübungsplätze	Flächen Truppenübungsplätze	swissnames3D (swisstopo 2020)

#### 2.1.4. Schifffahrt

Die Schifffahrt wird separat vom restlichen non-road Verkehr behandelt. Das heisst, die Emissionen in den Gemeinden des Kantons Luzern werden auf Basis des gesamtschweizerischen Emissionsinventars geschätzt. Die Schätzung erfolgt proportional zur Seefläche. Die Seefläche der Luzerner Seen wird aus den Seeinformationen der Geodatenportal RAWI entnommen. Die Gesamtseefläche der Schweiz wird aus der swissTLMRegio Datensatz «swissTLMRegio\_Lake» (swisstopo 2023a) gerechnet.

Güterschiffe auf dem Rhein werden nicht berücksichtigt, da sie für den Kanton Luzern nicht relevant sind.

Die Fahrgastschiffe der St. Niklausen Schiffgesellschaft Genossenschaft (SNG) und der Schifffahrtsgesellschaft des Vierwaldstättersees (SGV) werden etwas detaillierter behandelt (s. Kap 2.5).

<sup>2</sup> Unter "Kommunalfahrzeuge" werden Maschinen der Gemeinden für den Unterhalt öffentlicher Flächen zusammengefasst, z.B. Strassenreinigungsfahrzeuge.

<sup>3</sup> "Flughafenvorfeld" fasst mobile Maschinen auf grösseren Flughäfen zusammen. Da es im Kt. LU keine grösseren Flughäfen gibt, werden diese im vorliegenden Projekt nicht berücksichtigt.

### 2.1.5. Stationäre Anlagen

INFRAS hat das nationale Emissionsinventar für stationäre Motoren und Gasturbinen im Auftrag des BAFU erarbeitet (INFRAS 2022). Diese umfassen folgende Anlagekategorien:

- Grosse Anlagen: Davon gibt es nur eine im Kanton Luzern, die Verdichterstation Ruswil der Transitgas AG mit vier Gasturbinen;
- Kleine WKK-(Wärme-Kraft-Kopplungs-)Anlagen – dabei handelt es sich v.a. um Blockheizkraftwerke in Haushalten, in Industrie und Gewerbe oder in kommunalen Anlagen wie A-RAs;
- Notstromaggregate, welche i.d.R. weniger als 50 Stunden pro Jahr im Testbetrieb laufen.

Für die Emissionen der kleinen WKK-Anlagen und Notstromaggregate im Kanton Luzern folgen wir grundsätzlich dem gleichen Ansatz wie für den Non-Road-Verkehr: Wir nehmen an, dass die Aktivität stationärer Anlagen in den Gemeinden des Kantons zur Gesamtaktivität in der Schweiz sich proportional zur Bevölkerung verhält. Räumlich werden die Emissionen auf die Siedlungsfläche pro Gemeinde alloziert.

Bei den kleinen WKK-Anlagen liegen als Zusatzinfo aus dem Anhang der WKK-Statistik des BFE (Kaufmann 2023) die kantonalen Anteile an der schweizerischen Anzahl Aggregate, der installierten elektrischen Leistung und dem Endenergieverbrauch vor. Daher werden für die kleinen WKK-Anlagen diese Angaben auf Kantonsebene für Luzern verwendet und innerhalb Luzern der Bevölkerungsanteil pro Gemeinde für die Desaggregation nach Gemeinden.

Für die Verdichterstation Ruswil als einzige grosse Anlage im Kanton Luzern extrahieren wir die entsprechenden Daten aus dem Schweizer Emissionsinventar.

Weil es sich bei der Verdichterstation Ruswil um die einzige grosse Anlage im Kanton handelt, können im vorliegenden Bericht aus Datenschutzgründen keine Angaben zu stationären Motoren und Gasturbinen auf Ebene Anlagentyp dargestellt werden – es werden nur Totale oder Durchschnittswerte aller stationären Anlagen gezeigt.

### 2.1.6. Sektorübergreifende Aspekte

Bezüglich **Treibhausgasen** ist zu beachten:

- Beim CO<sub>2</sub> unterscheiden wir in den abgegebenen Zahlenresultaten fossiles und gesamtes CO<sub>2</sub>; letzteres schliesst die Emissionen aus den Treibstoffen beigemischten Biotreibstoffen mit ein, welche aber beim Wachstum der verwendeten Biomasse der Atmosphäre entzogen und damit kompensiert wurden. Daher wird im Bericht ausschliesslich das fossile CO<sub>2</sub> rapportiert.
- CO<sub>2</sub>-Äquivalente (CO<sub>2</sub>e) berechnen wir mit den aktuell vom BAFU empfohlenen GWP-Faktoren gemäss dem 5. IPCC-Assessment-Report (BAFU 2023):

$$\text{CO}_2\text{e} = \text{CO}_2 (\text{fossil}) + \text{CH}_4 * 28 + \text{N}_2\text{O} * 265$$

Hinsichtlich der **Abgrenzung** ist zu beachten, dass sich die vorliegende Studie auf Endenergieverbrauch und direkte Emissionen (also Emissionen aus dem Betrieb der Fahrzeuge und Maschinen) beschränkt. Primärenergieverbrauch und indirekte Emissionen (also bspw. aus der Herstellung der Energieträger oder der Fahrzeuge) sind in den Resultaten nicht mit enthalten.

## 2.2. Aufbereitung Strassenverkehr

### 2.2.1. Übersicht

Die Datenaufbereitung für die Berechnung der Strassenverkehrsemissionen umfasst folgende Schritte:

- Aufbereitung Strassennetz: Allen Strassenabschnitten müssen die statischen Parameter der HBEFA-Verkehrssituationen (Strassentyp, Gebietstyp, Höchstgeschwindigkeit, Steigung) sowie die Gemeindezugehörigkeit zugewiesen werden (Kap. 2.2.2).
- Aufbereitung Verkehrsmengen: Die Verkehrsmengen aus dem GVM (Gesamtverkehrsmodell) des Kt. Luzern müssen von 2017 (Zustand des GVM) auf das Zieljahr 2022 hochgerechnet und nach HBEFA-Fahrzeugkategorien desaggregiert werden. Schliesslich müssen sie pro Strassenabschnitt nach Verkehrsdichtestufe («Level of Service», abgekürzt als LOS) differenziert werden (Kap. 2.2.3).
- Für die Berechnung der Kaltstart- und Verdampfungsemissionen müssen die Fahrzeugbestände sowie die Anzahl täglicher Starts und Stopps pro Gemeinde aufbereitet werden (Kap. 2.2.4)
- Die Inputdaten für Linienbusse sowie Reisebusse in der Stadt Luzern werden als Sonderfälle separat aufbereitet (Kap. 2.2.5 und 2.2.6).
- Energieverbrauch und Emissionen werden mit HBEFA 4.2 berechnet (Kap. 2.2.7).

### 2.2.2. Aufbereitung Strassennetz

In einem ersten Schritt wird das GVM-Strassennetz mit den Gemeindegrenzen gemäss swisstopo (2023b) verschnitten und den Strassenabschnitten die BFS-Gemeindennummer und Gemeindennamen zugewiesen, damit die Resultate nach Gemeinden ausgewertet werden können.

Die statischen Parameter der HBEFA-Verkehrssituationen (Strassentyp, Gebietstyp, Höchstgeschwindigkeit, Steigung) werden den Strassenabschnitten anschliessend folgendermassen zugewiesen:

- HBEFA-Strassentyp und Höchstgeschwindigkeit werden basierend auf dem Attribut «Streckentyp» des GVM zugewiesen – s. Tabelle 28 im Annex A1.
- Die HBEFA-«Strassenkategorie» unterscheidet (im Unterschied zum feiner differenzierten «Strassentyp») zwischen Autobahn, ausserorts und innerorts. Basierend auf der «Strassenkategorie» werden entsprechende Flottenzusammensetzungen zugewiesen, welche bspw. für PW höhere Dieselfahrzeuganteile auf Autobahnen als innerorts beinhalten. Die «Strassenkategorie» wird einerseits von den «Strasstypen» (s. oben) und den Siedlungsgebiet-Flächen gemäss Swisnames3D (swisstopo 2020) hergeleitet.
- Der HBEFA-«Gebietstyp» unterscheidet städtische und Agglomerationsgebiete von ländlichen Gegenden und kleinen Ortschaften. Strassenabschnitte im Siedlungsgebiet in Agglomerationen mit >10'000 Einwohnern (d.h. im Kanton Luzern die Gemeinden Luzern, Emmen, Kriens, Horw, Ebikon und Sursee) werden der ersteren Kategorie zugewiesen, alle restlichen der zweiten.
- Die Längsneigung wird als durchschnittliche Steigung in % zwischen den Meereshöhen der Linienstützpunkte pro Strassenabschnitt, basierend auf dem DHM (digitalen Höhenmodell) in 5m Auflösung aus dem Geoportal des RAWI, geschätzt. Da das Strassennetz des GVM geometrisch z.T. sehr vereinfacht ist und die hier gestellten Anforderungen an Genauigkeit nicht erfüllt, liegen die Stützpunkte in einigen Fällen abseits der eigentlichen Strasse und somit einige Höhenmeter unter- oder oberhalb des Strassenniveaus. Daher werden unrealistische Längsneigungen zwischen einzelnen Linienstützpunkten auf 0 gesetzt. Für Brücken und Tunnels, bei denen die Information der Meereshöhe an der Landoberfläche nicht der Meereshöhe der Strasse entspricht, wird vereinfachend die Längsneigungsklasse  $\pm 0\%$  unterstellt.

Abbildung 2 zeigt beispielhaft einige der oben beschriebenen Klassifikationen als Kartendarstellung.

### 2.2.3. Aufbereitung Verkehrsmengen

Da das GVM für den Ist-Zustand 2017 etabliert und kalibriert wurde, mussten die MIV-Belastungen anhand der an Zählstellen festgestellten Veränderungen auf das Jahr 2022 hochgerechnet werden. Die Analyse der Zählstellen des ASTRA (Autobahn), des Kantons sowie der Stadt Luzern ergaben folgendes Bild:

- Auf den Autobahnen sowie abseits der Autobahnen ausserhalb der Stadt Luzern wurden Veränderungen von weniger als 2% zwischen 2017 und 2022 festgestellt. Da diese Veränderungen innerhalb des Bereichs der Unsicherheiten (aufgrund Baustellen und der Aufbereitung der Zählstellendaten) liegen, wurde auf den entsprechenden Strassenabschnitten keine Veränderung zwischen 2017 und 2022 unterstellt.

- Innerhalb der Stadt Luzern, abseits der Autobahn wurde an den Zählstellen eine durchschnittliche Verkehrsabnahme um 7.8% festgestellt. Da diese Veränderung höher ist als die Unsicherheit von ca. 5%, wurde sie berücksichtigt – die Verkehrsmengen aus dem GVM für 2017 für die entsprechenden Strassenabschnitte wurden daher um 7.8% reduziert, um die Verkehrsmengen 2022 zu approximieren.

Da die erhaltenen GVM-Daten bereits den durchschnittlichen täglichen Verkehr (DTV) abbilden, war kein Faktor notwendig, um aus dem durchschnittlichen Wochenverkehr (DWV) den DTV herzuleiten, wie dies bei der Aufbereitung anderer Verkehrsmodell-Inputs teilweise nötig ist.

Die Fahrzeugkategorien des GVM entsprechen nicht 1:1 den im HBEFA unterschiedenen Fahrzeugkategorien:

- Die PW gemäss GVM entsprechen PW und Motorrädern gemäss HBEFA.
- Die Summe der Lastwagen sowie Last- und Sattelzüge gemäss GVM entspricht den Schwere Güterfahrzeugen und den Reisebussen gemäss HBEFA. Zu den Reisebussen in der Stadt Luzern s. auch Kap. 2.2.6.
- Die Lieferwagen im GVM entsprechen den Lieferwagen im HBEFA.
- Die Linienbusse sind in einem separaten Output des GVM enthalten – die entsprechende Aufbereitung in Kap. 2.2.5.

Um die Verkehrsmengen nach HBEFA-Fahrzeugkategorien aus denjenigen gemäss GVM-Fahrzeugkategorien herzuleiten, wurden daher Splitfaktoren angewendet, welche auf den gesamtschweizerischen Fahrleistungen nach HBEFA-Fahrzeug- und Strassenkategorien aus den Ex-Post-Analysen des Energieverbrauchs des BFE (2022) basieren; diese Splitfaktoren sind in Annex A1 in Tabelle 29 dargestellt.

Um den durchschnittlichen täglichen Verkehr (DTV) pro Strassenabschnitt und Fahrzeugkategorie nach den unterschiedlichen Verkehrsdichtestufen oder «Levels of Service» zu differenzieren, wird mittels zwei unterschiedlicher Ansätze vorgegangen:

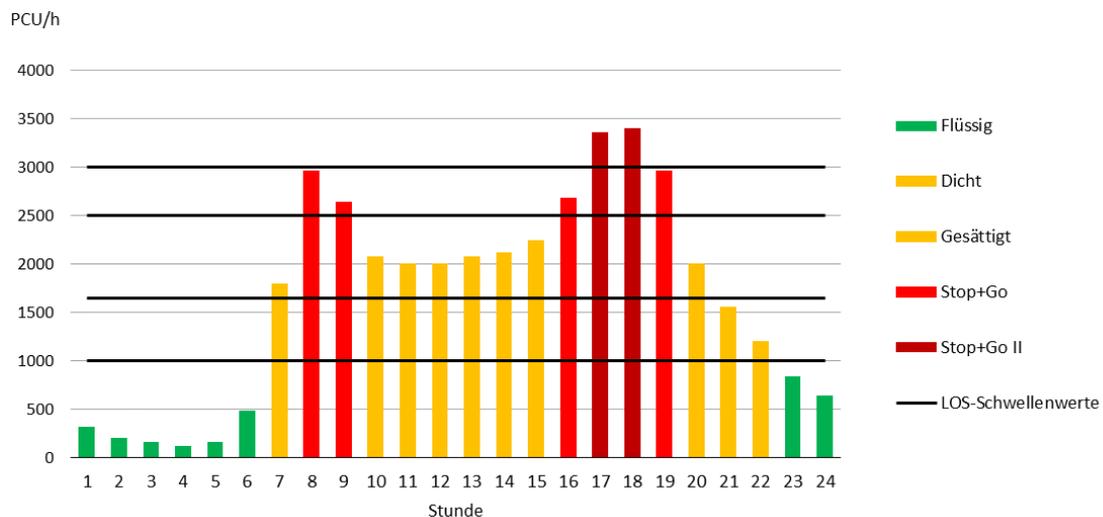
- Auf Hauptverkehrsstrassen (HVS), Autostrassen und Autobahnen wird der sogenannte Kapazitäts-Ansatz angewendet. Hierfür werden die täglichen Verkehrsbelastungen in PW-Einheiten mittels typischer Tagesganglinien in stündliche Belastungen aufgeteilt. Überschreiten diese stündlichen Belastungen bestimmte Anteile der Stundenkapazität des Strassenabschnittes, werden sie einer bestimmten Verkehrsdichtestufe, auch «Level of Service» (LOS) genannt, zugeordnet. Dieses Prinzip ist in Abbildung 1 grafisch dargestellt. Die Normganglinie SN 640 005a (VSS 2001) wurde für die Aufteilung des DTV in Stundenwerte beim Kapazitätsansatz angewendet. Die Vergleiche mit Ganglinien von Luzerner Zählstellen zeigten in einer Vorgängerstudie (INFRAS 2020) fast identische Tagesverläufe.

Die Schwellenwerte zur Abgrenzung der LOS hängen jeweils von der Parametrisierung des verwendeten Input-GVM ab (besonders den Strecken-Kapazitäten) und müssen jeweils an diese angepasst werden. In der vorliegenden Studie wurden für alle Strassentypen identische Schwellenwerte verwendet, welche in Tabelle 3 dargestellt sind.

- Auf dem untergeordneten Strassennetz werden empirisch hergeleitete, fixe Anteile der LOS pro Gebietstyp und Strassenkategorie angenommen. Diese sind in Tabelle 30 in Annex A1 aufgelistet.

Zu beachten ist, dass die Differenzierung nach LOS erst nach der Datenaufbereitung der Linien- und Reisebusse (Kap. 2.2.5 und 2.2.6) und deren Zusammenführung mit den Verkehrsmengen der restlichen Fahrzeugkategorien stattfindet – auch wenn die Reihenfolge der Beschreibung im vorliegenden Bericht aus praktischen Gründen anders ist.

**Abbildung 1: Aufteilung des DTV in Verkehrsdichteklassen («Levels of Service», LOS) nach dem Kapazitätsansatz.**

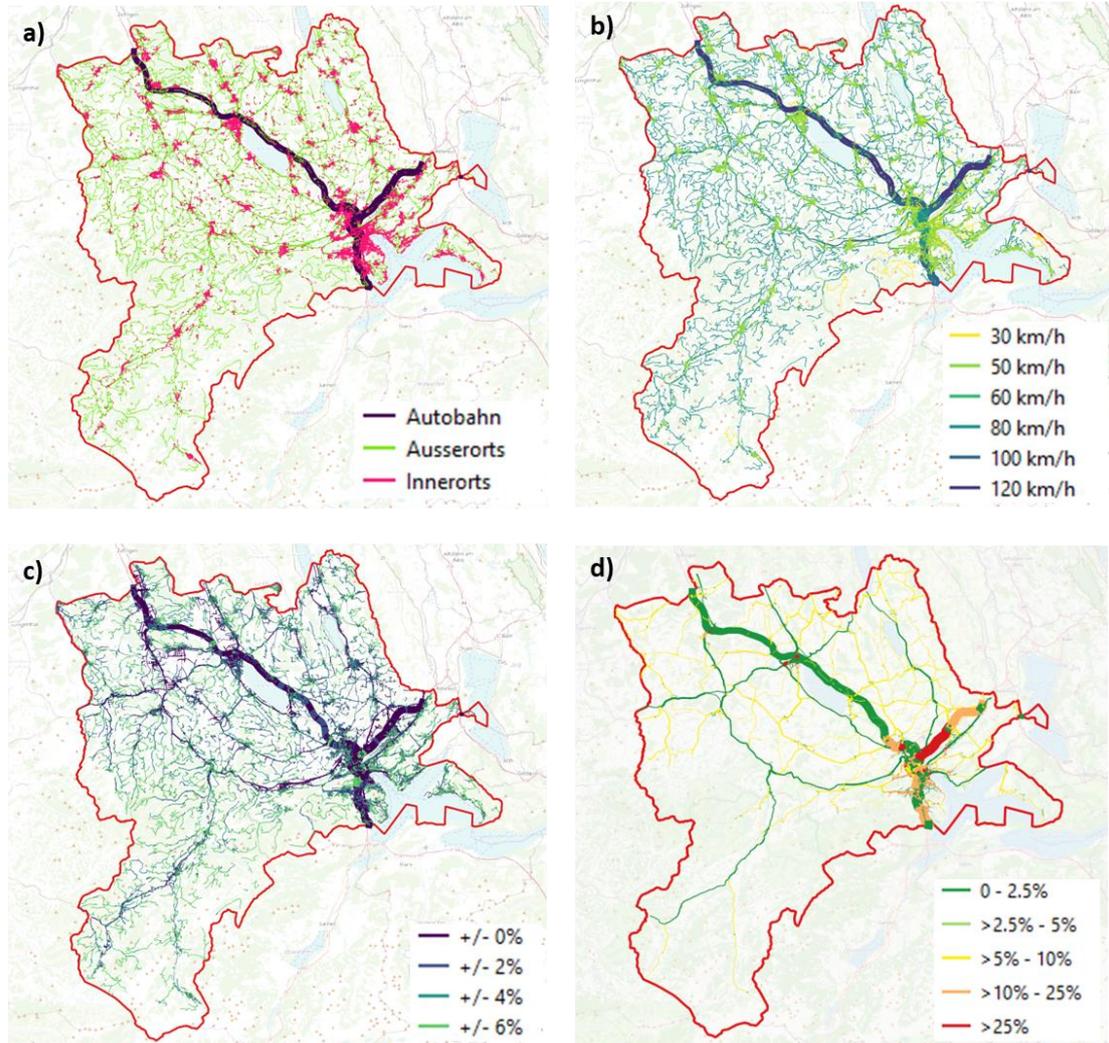


Grafik INFRAS. Quelle: Eigene Darstellung

**Tabelle 3: Verwendete Schwellenwerte zur Abgrenzung der Verkehrsdichtestufen (LOS) in % der stündlichen Kapazität pro Strassenabschnitt.**

LOS-Grenze	% der Stundenkapazität
Flüssig - dicht	40%
Dicht - gesättigt	66%
Gesättigt - Stop+Go	100%
Stop+Go - Stop+Go II	120%

Abbildung 2: Kartendarstellungen einiger Klassifizierungen der GVM-Strassenabschnitte nach HBEFA-Parametern: a) Strassenkategorien/Flottenzusammensetzungen; b) Höchstgeschwindigkeiten; c) Längsneigungsklassen; d) Anteile Stop+Go-Verkehr.



Grafik INFRAS. Quellen: GVM Kt. Luzern, swisstopo, RAWI, eigene Auswertungen

#### 2.2.4. Aufbereitung Bestände, Starts, Stopps

Fahrzeugbestände sowie die Anzahl Starts und Stopps werden für die Berechnung der Kaltstart- und Verdampfungsemissionen benötigt. Da Kaltstart-Zuschläge nur für leichte Nutzfahrzeuge (PW und Lieferwagen) berechnet werden und Verdampfungsemissionen nur bei Benzin-Fahrzeugen (also Teilen der PW, Lieferwagen und Motorräder) auftreten, müssen diese Parameter nur für PW, Lieferwagen und Motorräder aufbereitet werden.

Die Bestände werden dem eidgenössischen «Informationssystem Verkehrszulassung» (IVZ) des ASTRA (2023) entnommen, in dem für jedes registrierte Fahrzeug die Postleitzahl hinterlegt ist. Mittels eines GIS-Verschnitts aus den PLZ-Gebieten und den Gemeindegrenzen werden die ermittelten Bestände den Gemeinden des Kantons Luzern zugeordnet.

Die Anzahl Starts und Stopps wird durch Division der Fahrleistungen pro Gemeinde durch die durchschnittlichen Fahrlängen pro Fahrzeugkategorie gemäss dem neusten Mikrozensus Mobilität (BFS 2022) – d.h. 14.8 km für PW und Lieferwagen, und 10.9 km für Motorräder – abgeschätzt.

### 2.2.5. Linienbusse

Die Linienbusse stellen aus mehreren Gründen einen Sonderfall dar:

- Die Daten zu den Linienbussen stehen ebenfalls aus dem GVM zur Verfügung, aber in einem leicht anderen Format als der motorisierte Individualverkehr (MIV).
- Die Flottenzusammensetzung wird pro Buslinie zwischen Diesel-, Trolley- und batterieelektrischen Bussen unterschieden (im Unterschied zu den restlichen Fahrzeugkategorien, für welche innerhalb der Fahrzeugkategorie schweizerische Durchschnitts-Flottenmixe pro Strassenkategorie angewendet werden).

Die durchschnittliche Anzahl Busse pro Linie, Tag und Strassenabschnitt wird mittels Verschnitt der (bereits mit Gemeindegrenzen verschnittenen, s. Kap. 2.2.2) MIV-Strassenabschnitte mit den ÖV-Linien aus dem GVM ermittelt. Direkt vom VVL stammt die Information, welche Linien mit Bussen welcher Antriebstechnologie (Diesel-, Trolley oder batterieelektrisch) betrieben werden. Innerhalb jeder Antriebstechnologie wird die durchschnittliche schweizerische Zusammensetzung nach Grössenklassen und Euro-Emissionsstandards unterstellt. Der so aufbereitete Linienbus-DTV wird mit dem DTV der restlichen Fahrzeugkategorien zusammengeführt, bevor die Verkehrsmengen nach den LOS klassiert werden (s. Kap. 2.2.3).

### 2.2.6. Reisebusse in der Stadt Luzern

Reisebusse sind grundsätzlich im vom GVM hergeleiteten Verkehrsmengengerüst mit enthalten (s. Kap. 2.2.3). Wegen des hohen Reisebus-Aufkommens in der Stadt Luzern aufgrund des Tourismus werden die Verkehrsmengen der Reisebusse in der Stadt Luzern separat behandelt, um der besonderen Situation Rechnung zu tragen.

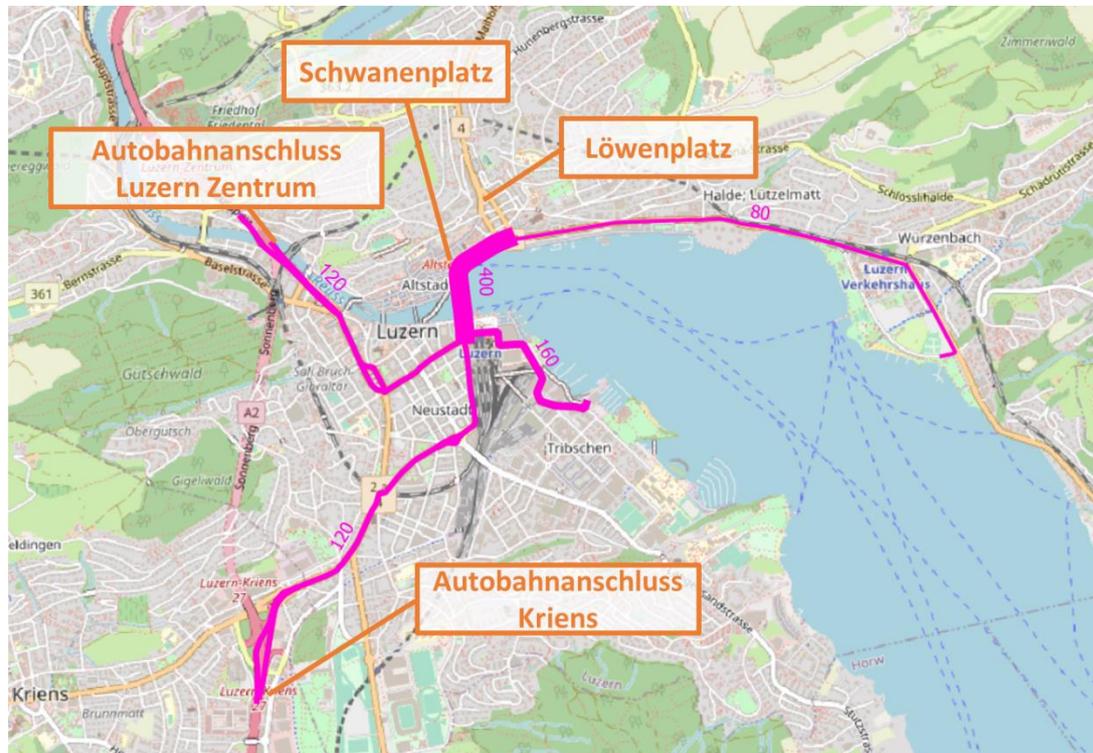
Dabei gehen wir davon aus, dass sich «outgoing»-Fahrten – z.B. Carreisen von Einheimischen an andere Orte und Fernbuslinienfahrten wie von Flixbus – nicht grundsätzlich von anderen Regionen unterscheiden und durch den durchschnittlichen schweizerischen Anteil der Reisebusse am Schwerverkehr abgedeckt sind.

Speziell betrachtet werden die «incoming»-Fahrten. Einem Bericht der Stadt Luzern zur Projektidee «Stadtpassage» (Stadt Luzern 2023) kann aufgrund Zählraten von Carparkplätzen entnommen werden, dass auf dem Löwen- und Schwanenplatz, d.h. den Hauptzielen der «incoming»-Touristen, ca. 400 Reisedar-Bewegungen pro Tag stattfinden. Da jeder Car die Touristen einmal absetzt und einmal abholt, entspricht das rund 200 Cars an Spitzentagen. Gemäss Angaben des Tiefbauamts der Stadt Luzern ergibt dies durchschnittlich rund 120 Cars pro Tag im Jahresdurchschnitt. Typischerweise verlassen die Cars die Autobahn von Zürich kommend in Luzern Zentrum, setzen die Touristen dann an Löwen- oder Schwanenplatz ab, parkieren auf verschiedenen Carparkplätzen (z.B. Lido oder Inseli) zwischen, holen ihre Fahrgäste wieder ab und gehen schliesslich in Kriens auf die Autobahn und fahren Richtung Süden weiter. Wir gehen im Weiteren von der vereinfachten Annahme aus, dass alle Reisebusse diese Route fahren. Da einige Abschnitte dabei mehrfach von den gleichen Cars befahren werden andere nur von einem Teil der Cars, ergeben sich im jährlichen Durchschnitt zwischen 80 und 400 Durchfahrten pro Abschnitt (s. auch Abbildung 3).

Da die Reisebusse an den städtischen Zählstellen zwar nicht als solche identifiziert aber mitgezählt werden, und weil das GVM an den Zählstellen kalibriert wird, sind die Carfahrten durch die Stadt im GVM bereits mit enthalten – sie stellen aber im Vergleich zu den anderen Fahrzeugkategorien einen zu geringen Anteil an der gesamten Verkehrsmenge dar. Daher wird auf jedem Abschnitt der betroffenen Strecke die Anzahl Reisedars vom gesamten DTV subtrahiert und der Rest gemäss den ursprünglichen relativen Anteilen auf die anderen Fahrzeugkategorien verteilt.

Auf dem durch diese Cars «umgungenen» Autobahnabschnitt zwischen Luzern Zentrum und Kriens wird der an der entsprechenden ASTRA-Zählstelle (welche Reisedars von anderen Fahrzeugtypen unterscheiden kann) gezählte Anteil Reisedars unterstellt.

**Abbildung 3: Typische Route vom «incoming»-Reisecars durch die Stadt Luzern. Die durchschnittliche Anzahl Carfahrten pro Tag und Abschnitt ist eingezeichnet; die Anzahl Carfahrten variiert pro Abschnitt, weil die Cars auf einigen Abschnitten mehrfach durchfahren und/oder sich auf mehrere Zwischenparkierplätze verteilen.**



Grafik INFRAS. Quellen: OpenStreetMap, Stadtverwaltung Luzern, eigene Auswertung

### 2.2.7. Emissionsmodellierung

Die Modellierung von Energieverbrauch und Emissionen erfolgt mit der Expertenversion des HBEFA 4.2 (INFRAS et al. 2022). Dabei wird das gemäss den vorangegangenen Kapiteln aufbereitete Verkehrsmengengerüst mit den entsprechenden Emissions- und Energieverbrauchsfaktoren multipliziert.

Die Modellierung erfolgt:

- Für die betriebswarmen Emissionen und die Verdampfungsverluste während der Fahrt («Running losses») auf Ebene Strassenabschnitt;
- Für die restlichen Emissionskategorien (Kaltstart-Zuschläge und Verdampfungsverluste durch tägliche Temperaturschwankungen sowie nach dem Warmabstellen) auf Ebene Gemeinde.

Die auf Gemeindeebene modellierten Kaltstart-Zuschläge und Verdampfungsverluste werden räumlich auf die innerorts-Strassenabschnitte der entsprechenden Gemeinden alloziert, wobei die allozierten Anteile den relativen Anteilen der betriebswarmen Emissionen pro Strassenabschnitt in derselben Gemeinde entsprechen.

Da die Trolleybusse nicht im HBEFA enthalten sind, werden sie in einer Zusatzschleife modelliert. Energieverbrauch und Abrieb-/Aufwirbelungsemissionen von Bremsen, Reifen und Strasse werden auf Basis mittelgrosser batterieelektrischer Busse gemäss HBEFA abgeschätzt. Die Abrieb-Emissionsfaktoren für den Fahrdratabrieb (konstant 0.17 g/km) stammen aus INFRAS (2007); die entsprechenden Emissionen werden als Teil von PM10 bzw. PM2.5 aus Abrieb und Aufwirbelung ausgewiesen.

### 2.3. Aufbereitung Schiene

Das Schienennetz und die relative Anzahl Personen- und Güterzüge pro Tag und Schienenabschnitt werden aus dem Lärmbelastungskataster für Eisenbahnanlagen (BAFU 2019) entnommen und mit den Gemeindegrenzen gemäss swisstopo (2023b) verschnitten. Die Anteil der Zugskilometer pro Schienenabschnitt werden separat für Personen- und Güterverkehr auf das Total der Zugskilometer der Schweiz im Jahr 2022 (BFS 2023) skaliert.

Für Personenzüge wird zwischen Regional- und Intercityzügen unterschieden, da ihr Energieverbrauch pro km unterschiedlich ist. Die Anteile der Zugskilometer nach den zwei Personenzugstypen werden nach dem Fahrplan in OpenTransportData berechnet (OpenTransportData 2022).

### 2.4. Aufbereitung Non-Road

In einem ersten Schritt werden die Anteile der Indikatoren, welche zur Desaggregation der Schweizer Emissionen nach Luzerner Gemeinden verwendet werden (s. Tabelle 2), am Total der Schweiz bestimmt:

- Für die Indikatoren, die den Gemeindeporträts des BFS (2021) entnommen werden (Bevölkerung, Arbeitsplätze im 2. Sektor, Landwirtschafts- und Waldfläche), können die Werte pro Gemeinde durch das Total für die Schweiz dividiert werden.

Für die entsprechenden räumlichen Bezüge – d.h. die Siedlungsfläche für Bevölkerung, Arbeitsplätze im 2. Sektor, sowie Landwirtschafts- und Waldflächen – werden die entsprechenden GIS-Layers (Siedlungsflächen aus swissnames3D, swisstopo 2020 und Landwirtschafts- und Waldflächen aus dem Geoportal des RAWI) mit den Gemeindegrenzen gemäss swisstopo (2023b) verschnitten und anschliessend nach Gemeinde zu Multigeometrien aggregiert, welche mit den jeweiligen Feature-IDs des Indikator-Layers sowie der Gemeindegrenzen referenziert sind, damit später im Luftschadstoff-Emissionskataster die entsprechenden Emissionen verknüpft werden können.

- Für die Indikatoren, die auf GIS-Layers basieren (Skilifte, Gartenflächen, Truppenübungsplätze) werden die entsprechenden Layers mit den Gemeindegrenzen gemäss swisstopo (2023b) verschnitten, und die resultierenden Flächen und daraus die Flächenanteile pro Gemeinde an der Gesamtfläche des Indikators in der Schweiz berechnet.  
Zu den Skiliften, welche für die Desaggregation der Pistenfahrzeug-Emissionen verwendet werden, ist anzumerken, dass die Linien der Skilifte für diesen Zweck mit 25m gepuffert wurden, um Flächen zu erhalten. Die Grössen des Puffers ist nicht entscheidend, sondern der relative Anteil am Schweizer Total. Dabei dienen die Skilifte nur als Approximation der Pistenflächen, welche ein geeigneterer Indikator wären – aufbereitete, schweizweite Geo-daten dazu sind aber nicht verfügbar.

Da das schweizerische Non-Road-Emissionsinventars (BAFU 2015) in 5-Jahres-Schritten vorliegt, werden zuerst die Schweizer Emissionen für 2022 anhand linearer Interpolation der entsprechenden Werte für 2020 und 2025 berechnet. Anschliessend werden die Gemeindeanteile pro Indikator für die jeweilige Maschinenkategorie mit den Mengengerüsten und Emissionen des schweizerischen Non-Road-Emissionsinventars (BAFU 2015) verknüpft und multipliziert. Daraus resultieren Mengengerüste (Anzahl Maschinen, Betriebsstunden) sowie Emissionen der meisten benötigten Schadstoffe pro Gemeinde für das Jahr 2022.

Folgende der im vorliegenden Projektkontext benötigten Schadstoffe liegen aus den Schweizer Non-Road-Emissionsinventar nicht vor und werden daher entweder im Anschluss hergeleitet oder weggelassen:

- Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>): Dieses wird in grundsätzlicher Analogie zum HBEFA als Anteil der Stickoxide (NO<sub>x</sub>) berechnet. Die verwendeten Anteile pro Treibstoff, teilweise weiter differenziert nach Abgastechnologie, sind in Tabelle 4 dargestellt. Sie stellen eine Vereinfachung dar: Bspw. nehmen die NO<sub>2</sub>-Anteile neuerer Emissionsstandards mit zunehmendem Maschinenalter aufgrund der Katalysator-Alterung ab, oder bestimmte im Non-Road-Inventar nicht explizit berücksichtigte Abgastechnologien wie EGR (Abgasrückführung) hätten auch einen Einfluss; die Berücksichtigung solcher Effekte wäre aber entweder aufgrund mangelnder Informationen oder aufgrund des Aufwandes im Rahmen des vorliegenden Projektes nicht möglich.
- PM2.5: Dieses wird in Analogie zum HBEFA als gleich PM10 angenommen, da die meisten Partikel aus der Verbrennung kleiner als 2.5 µm sind.
- Non-exhaust-, also aus Abrieb und Aufwirbelung entstehende Emissionen von PM10, PM2.5 und BC sind im Schweizer Emissionsinventar nicht verfügbar. Veraltete entsprechende Emissionsfaktoren werden zwar in der EMIS-Datenbank des BAFU angewendet; wichtige

Methodik- und Abgrenzungsfragen sind dabei aber nicht geklärt (was ist z.B. der Einfluss des nicht-asphaltierten Untergrundes bei Aufwirbelungsemissionen von Bau- und Landwirtschaftsmaschinen, was ist der Einfluss des Wetters, welche Emissionen werden auch in Immissionsmodellen berücksichtigt und u.U. doppelt gezählt), weswegen wir von deren Verwendung abraten. Non-exhaust-Emissionen sind daher in den vorliegenden Non-Road-Emissionsresultaten nicht mit enthalten.

**Tabelle 4: Für Non-Road-Maschinen und stationäre Motoren und Gasturbinen angenommene Anteile Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) an den Stickoxiden (NO<sub>x</sub>).**

Treibstoff	Abgastechnologie	Anteil NO <sub>2</sub> an NO <sub>x</sub>
Diesel, Heizöl extraleicht (HEL)	Diesel-Partikelfilter (DPF)	25%
	Kein DPF	7%
Erd- und Biogas	(alle)	10%
Benzin	(alle)	5%
Flüssiggas (LPG)	(alle)	10%

## 2.5. Aufbereitung Schifffahrt

### 2.5.1. Fahrgastschiffe

Die Schiffsflotte der SGV und deren Fahrleistung wird den Statistikdaten 2022 der SGV entnommen (SGV 2022). Die Zusammensetzung der Schiffsflotte und die Betriebsstunden der SNG wurden direkt von der SNG geliefert.

Der Fahrplan der SGV ist auf OpenTransportData (OpenTransportData 2022) verfügbar. Aus dieser Datenquelle kann die Anzahl Verbindungen und Betriebsstunden pro Jahr zwischen allen Häfen des Vierwaldstättersees berechnet werden. Die Verteilung der Betriebsstunden auf die Gemeinden wird auf Basis der Seeinformationen im Geodatenportal RAWI geschätzt: Es wird eine gerade Linie zwischen jedem gefahrenen Hafenpaar gezeichnet. Diese Linien werden anschliessend mit den Gemeindegrenzen gemäss swisstopo (2023b) verschnitten, um die Betriebsstunden während der Fahrt auf die Gemeinden zu verteilen.

Der Fahrplan der SNG-Schiffe ist nicht auf OpenTransportData vorhanden. Deshalb wird die gleiche Verteilung der Betriebsstunden auf die Gemeinden wie bei den SGV-Schiffen unterstellt.

### 2.5.2. Übrige Schifffahrt

Die übrige Schifffahrt wird ähnlich wie die anderen Non-Road Maschinen behandelt. Die Seeflächen der vier grösseren Luzerner Seen (Vierwaldstättersee, Zugersee, Hallwilersee, und Sempachersee) werden mit den Gemeindegrenzen gemäss swisstopo (2023b) verschnitten, und die

resultierenden Flächen und daraus die Flächenanteile pro Gemeinde an der Gesamtfläche des Indikators in der Schweiz berechnet.

Die Stickstoffdioxid- ( $\text{NO}_2$ )-Emissionen der Schifffahrt (inkl. Fahrgastschiffe) werden gleich wie bei den anderen Non-Road Maschinen, anhand der Anteile in Tabelle 4 und mit angemessenem DPF-Anteil von 35% für Diesel- und HEL-Maschinen, berechnet. Wie bei den anderen Non-Road-Maschinen wird auch angenommen, dass die  $\text{PM}_{2.5}$ - den  $\text{PM}_{10}$ -Emissionen entsprechen.

## 2.6. Aufbereitung Stationäre Anlagen

Die Aufbereitung der Emissionen der stationären Motoren und Gasturbinen erfolgt grösstenteils analog derjenigen der Non-Road-Maschinen: Die Gemeindeanteile der Bevölkerung am Total der Schweiz werden zur Desaggregation der Mengengerüste und Emissionen der sogenannten «kleinen Anlagen» – d.h. den Generatoren ohne Wärme-Kraft-Kopplung (Notstromanlagen) und kleinen WKK-Anlagen verwendet.

Für letztere kommen jedoch zusätzliche Faktoren zur Anwendung, da aus der WKK-Statistik des BFE (Kaufmann 2023) die Anteile des Kantons Luzern an der gesamtschweizerischen Anzahl Aggregate, der installierten elektrischen Leistung und dem Endenergieverbrauch bekannt sind. Geteilt durch den Anteil des Kantons Luzern an der Schweizer Bevölkerung (4.8% im Jahr 2022) ergeben sich Skalierfaktoren, welche in Tabelle 5 dargestellt sind und mit den Bevölkerungsanteilen pro Gemeinde multipliziert werden können, so dass die kantonalen Anteile an Bestand, Leistung und Energieverbrauch gem. BFE-Statistik gewahrt bleiben. Der kantonale Anteil am Endenergieverbrauch wird auch auf die Emissionen angewendet, da im Emissionsinventar der stationären Motoren und Gasturbinen sowieso energiebasierte Emissionsfaktoren in g/MJ zur Anwendung kommen.

Bei den grossen Anlagen ist, wie bereits in Kap. 2.1.3 erwähnt, die Verdichterstation Ruswil der Transitgas AG die einzige Anlage im Kanton Luzern. Daher können die Emissionen ihrer 4 Aggregate (Gasturbinen) einfach aus dem Schweizer Emissionsinventar extrahiert werden.

Wie bei den Non-Road-Maschinen ist auch bei den stationären Anlagen Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ ) nicht im schweizerischen Emissionsinventar enthalten und wird deswegen mit den Anteilen an den Stickoxiden ( $\text{NO}_x$ ) aus Tabelle 4 aus letzteren hergeleitet. NMHC (Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe) sind ebenfalls nicht im schweizerischen Emissionsinventar der stationären Anlagen enthalten, können aber als Differenz von HC (Gesamt-Kohlenwasserstoffe) und  $\text{CH}_4$  (Methan) hergeleitet werden. Non-exhaust- (durch Abrieb und Aufwirbelung entstehende) Emissionen kommen bei stationären Anlagen nicht vor.

**Tabelle 5: Für die Desaggregation der Klein-WKK-Mengengerüste und -Emissionen verwendete Faktoren (basierend auf der BFE-WKK-Statistik, Kaufmann 2023).**

Parameter	Anteil Kt. LU an CH	Skalierfaktor Gemeindeanteil
Anzahl Aggregate	0.043	0.890
Installierte Leistung	0.058	1.205
Endenergieverbrauch, Emissionen	0.088	1.843

### 3. Mengengerüste

#### 3.1. Strasse

Auf der Strasse wurden im Jahr 2022 rund 3260 Millionen Fahrzeugkilometer zurückgelegt (Tabelle 6). Von den Fahrzeugkategorien entfallen dabei 90% auf PW und Lieferwagen und 5% auf Schwere Güterfahrzeuge (SGF). Bei den Strassentypen entfallen über 40% auf Autobahn und Autostrassen.

Die Input-Fahrleistung aus dem GVM (Zustand 2017) ist fast identisch mit dem schlussendlichen Total: Die Reduktion aufgrund der Verkehrsabnahme in der Gemeinde Luzern abseits der Autobahn (s. Kap. 2.2.3) wird fast 1:1 kompensiert durch die zusätzlich hinzukommenden Fahrleistungen der Linienbusse.

**Tabelle 6: Fahrleistungen Strasse, nach Fahrzeugkategorie und Strassentyp, in Mio. Fahrzeugkilometer im Kanton Luzern im Jahr 2022.**

FzKat	Autobahn	Stadt-Autobahn	Autostrasse	HVS	Sammelstrasse	Erschliessungsstrasse	TOTAL
PW	999.1	28.8	77.0	615.4	915.5	83.4	2 719.2
Lieferwagen	105.3	1.9	8.2	49.3	61.3	5.2	231.1
Reisebus	5.5	0.1	0.4	3.4	4.1	0.4	13.8
Linienbus	0.2	0.0	0.1	6.6	10.3	2.1	19.3
Motorrad	29.7	0.9	2.7	28.5	42.6	3.7	108.1
SGF	74.3	1.4	5.0	37.3	46.0	3.2	167.3
<b>TOTAL</b>	<b>1 214.2</b>	<b>33.1</b>	<b>93.3</b>	<b>740.6</b>	<b>1 079.6</b>	<b>98.1</b>	<b>3 258.8</b>

Fahrzeugbestände sowie die Anzahl Starts und Stopps sind für die Kaltstart-Zusatzemissionen sowie für die Verdampfung von Benzin zu Kohlenwasserstoff-Emissionen relevant. Erstere sind nur bei PW und Lieferwagen relevant, letztere bei PW, Lieferwagen und Motorrädern. Die entsprechenden Bestände, sowie Millionen Starts und Stopps im Jahr 2022 im Kanton Luzern sind in Tabelle 7 dargestellt. Die Bestände können sich aufgrund der Methodik der Aufbereitung (Quelle ASTRA, unterschiedliche Abgrenzungen) leicht von den Zahlen des kantonalen Strassenverkehrsamtes unterscheiden.

**Tabelle 7: Fahrzeugbestände sowie Anzahl Starts und Stopps für die diesbezüglich relevanten Fahrzeugkategorien im Kanton Luzern im Jahr 2022.**

FzKat	Fahrzeugbestand	Mio. Starts & Stopps
PW	222'910	183.7
Lieferwagen	25'523	15.6
Motorrad	36'528	9.9
<b>TOTAL</b>	<b>284'961</b>	<b>209.3</b>

### 3.2. Schiene

Auf der Schiene wurde 2022 rund 10.4 Millionen Zugskilometer zurückgelegt (Tabelle 8). Personenzüge machen etwa 96% davon aus. Unter den Personenzügen machen Intercity-Züge etwa 55% und Regionalzüge etwa 45% der Fahrleistung aus.

**Tabelle 8: Fahrleistung Schiene in Mio. Zugskilometer im Kanton Luzern im Jahr 2022.**

Zugstyp	Mio. Fahrzeugkilometer
Güterverkehr	0.38
Personenverkehr	10.00
-davon Intercity	5.55
-davon Regional	4.45
<b>TOTAL Schienenverkehr</b>	<b>10.38</b>

### 3.3. Non-Road

Im Jahr 2022 standen im Kanton Luzern schätzungsweise 120'000 Non-Road-Maschinen für knapp 13 Millionen Arbeitsstunden im Einsatz (Tabelle 9). Der grösste Teil davon sind kleine benzinbetriebene oder elektrische Geräte aus dem Bereich Gartenpflege/Hobby. Diese stellen 85% des Bestandes und 65% der gesamten Betriebsstunden, sind aber nur für 3% des Energieverbrauchs aller Non-Road-Maschinen verantwortlich – die verbleibenden rund 20'000 grösseren Maschinen der restlichen Maschinengattungen machen 97% des Energieverbrauchs aus (vgl. Kap. 4.4).

Im Durchschnitt werden mobile Non-Road-Maschinen ca. 100 Stunden pro Jahr eingesetzt; dieser Wert schwankt aber stark je nach Maschinengattung – Schienen-Dieselfahrzeuge, Industrie- und Baumaschinen weisen deutlich höhere individuelle Betriebsstunden auf als andere Maschinengattungen.

**Tabelle 9: Anzahl Maschinen und Betriebsstunden von Non-Road-Maschinen (ohne Schiffe) im Kanton Luzern im Jahr 2022.**

Maschinengattung	Anz. Maschinen	Mio. BetrStd	BetrStd/Maschine
Baumaschinen	2'946	1.25	423
Industrie	3'206	2.17	678
Landwirtschaft	10'732	1.05	98
Forstwirtschaft	707	0.12	177
Gartenpflege/Hobby	101'665	7.96	78
Schiene	76	0.05	719
Militär	163	0.01	73
<b>TOTAL Non-Road-Verkehr</b>	<b>119'496</b>	<b>12.62</b>	<b>106</b>

### 3.4. Schifffahrt

Auf den Seen im Kanton Luzern waren 2022 25 Fahrgastschiffe und schätzungsweise 3577 andere Boote und Schiffe für 15'800 bzw. 129'000 Betriebsstunden im Einsatz (Tabelle 10). Die Fahrgastschiffe auf dem Vierwaldstättersee waren insgesamt etwa 28'000 Stunden im Einsatz, aber nur ca. 56% davon in Gewässern des Kanton Luzerns. Die durchschnittlichen 632 Betriebsstunden pro Schiff beziehen sich nur auf den Einsatz im Kanton Luzern.

Der Bestand der Fahrgastschiffe ist zwar viel geringer als derjenige der anderen Schiffs- und Bootstypen, die Fahrgastschiffe sind aber viel grösser und haben viel höhere Betriebsstunden pro Jahr als die andere Schiffs- und Bootstypen.

**Tabelle 10: Anzahl Maschinen und Betriebsstunden von Schiffen im Kanton Luzern im Jahr 2022.**

Schiffstyp	Anz. Maschinen	Mio. BetrStd	BetrStd/Schiff
Fahrgastschiffe	25	0.016	632
Andere	3'577	0.129	36
<b>TOTAL Schiffsverkehr</b>	<b>3'602</b>	<b>0.15</b>	<b>40</b>

### 3.5. Stationäre Motoren und Gasturbinen

Im Jahr 2022 standen im Kanton Luzern schätzungsweise knapp 370 Aggregate stationärer Motoren und Gasturbinen für total rund 426'000 Betriebsstunden im Einsatz (Tabelle 11). Es ist zu beachten, dass eine Anlage aus mehreren Aggregaten bestehen kann. So gibt es bspw. nur eine sogenannte «grosse Anlage» im Kanton Luzern – die Verdichterstation Ruswil der Transitgas AG – diese umfasst aber mehrere Aggregate (in diesem Fall Gasturbinen).

Da sie fast ausschliesslich als Notstromanlagen eingesetzt werden, weisen Generatoren ohne Abwärmenutzung nur rund 13 Betriebsstunden pro Aggregat und Jahr auf – meist für monatliche Funktionstests von rund einer Stunde. Kleine WKK-Anlagen haben hingegen sehr hohe Betriebsstunden – viele laufen als Heizungen und Kleinkraftwerke fast die ganze Zeit.

**Tabelle 11: Anzahl Aggregate und Betriebsstunden stationärer Motoren und Gasturbinen im Kanton Luzern im Jahr 2022.**

Quellkategorie	Anz. Aggregate	1000 BetrStd	BetrStd/Aggregat
Stationäre Motoren und Gasturbinen	366	426.4	1'165

**Beachte:** Aus Datenschutzgründen (Verdichterstation Ruswil als einzige grosse Anlage) können die Mengengerüste stationärer Motoren und Gasturbinen nicht nach Anlagentyp desaggregiert dargestellt werden.

## 4. Emissionen und Energieverbrauch

### 4.1. Übersicht

Der Verkehrssektor hat im Jahr 2022 im Kanton Luzern ca. 12'300 TJ Endenergie verbraucht und dabei etwa 800'000 t fossiles CO<sub>2</sub> emittiert (Tabelle 12). Zudem wurden als wichtigste Luftschadstoffen ca. 1500 t Stickoxide (NO<sub>x</sub>) und 170 t Feinstaub (PM10) emittiert; von letzterem stammen nur ca. 14% aus Abgasen, der Rest entsteht durch Reifen-, Brems-, und Strassenabrieb sowie Aufwirbelung auf der Strasse.

Der Strassenverkehr ist innerhalb des Verkehrssektors der Hauptverursacher von Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen. Er verbraucht rund 82% der Energie und verursacht 88% der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Der Schienenverkehr ist verantwortlich für knapp 4% des Energieverbrauchs, emittiert aber kein CO<sub>2</sub>.

Auch hinsichtlich Luftschadstoffen ist der Strassenverkehr die Hauptquelle innerhalb des Verkehrssektors – er verursacht 79% der NO<sub>x</sub>- und 94% der PM10-Emissionen. Andere Quellen wie die Non-Road-Maschinen oder die Schifffahrt haben aber bei den Luftschadstoffemissionen einen überproportionalen Anteil im Vergleich zum Energieverbrauch. Das liegt v.a. daran, dass die Emissionsstandards in diesen Sektoren noch weniger weit fortgeschritten und weniger strikt sind – daher gibt es dort noch zahlreiche Dieselmotoren (auch ältere) ohne moderne Abgasnachbehandlung (wie z.B. Dieselpartikelfilter oder SCR-Katalysatoren).

Die Emissionen der in den folgenden Tabellen nicht dargestellten Schadstoffe finden sich im Annex A2 dieses Berichts. Die Zuordnung der Emissionsquellen zu den NFR-Codes gemäss der

Nomenklatur des Reportings im Rahmen der CLRTAP (Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution) sind in Tabelle 31 im Annex A1 aufgelistet.

**Tabelle 12: Übersicht der Verkehrsemissionen pro Quelle im Kanton Luzern im Jahr 2022.**

Emissionsquelle	CO <sub>2</sub> (fossil) [t/a]	Energieverbrauch [TJ/a]	NO <sub>x</sub> [t/a]	PM10 (Abgas) [t/a]	PM10 (Abrieb, Aufwirbelung) [t/a]
<b>Absolute Werte</b>					
Strassenverkehr	704 436	10 036	1 200	13.7	146.6
Schiene	0	454	0	0.0	0.048
Schifffahrt	7 270	101	49	1.3	0.0
Non-Road	48 388	670	181	6.6	0.0
Stationäre Anlagen	39 780	1 041	83	1.6	0.0
<b>TOTAL</b>	<b>799 874</b>	<b>12 303</b>	<b>1 513</b>	<b>23.2</b>	<b>146.7</b>
<b>% des Totals</b>					
Strassenverkehr	88.1%	81.6%	79.3%	58.9%	100.0%
Schiene	0.0%	3.7%	0.0%	0.0%	0.0%
Schifffahrt	0.9%	0.8%	3.3%	5.5%	0.0%
Non-Road	6.0%	5.4%	11.9%	28.5%	0.0%
Stationäre Anlagen	5.0%	8.5%	5.5%	7.0%	0.0%

Der insgesamt wichtigste Energieträger über alle verkehrlichen Quellkategorien ist Diesel mit rund 52% des gesamten Energieverbrauchs, gefolgt von Benzin mit 31% (Tabelle 13). Biotreibstoffe machen 2022 rund 6% des Energiebedarfs aus. Knapp 5% des Energiebedarfs wird mit Elektrizität gedeckt.

Tabelle 13: Energieverbrauch (TJ/a) nach Energieträger und Quellkategorie im Kanton Luzern im Jahr 2022.

Energieträger	Strassen- verkehr	Schiene	Schifffahrt	Non-Road	Stationäre Anlagen	TOTAL
Benzin	3 780.6	0.0	21.7	40.0	0.0	3 842.3
Bioethanol	88.3	0.0	0.5	0.9	0.0	89.7
Diesel	5 786.3	0.0	47.4	584.4	0.0	6 418.1
Biodiesel	247.8	0.0	2.0	25.0	3.9	278.7
Heizöl Extraleicht	0.0	0.0	29.5	0.0	26.7	56.1
Erdgas	21.8	0.0	0.0	0.0	663.6	685.4
Biogas	6.8	0.0	0.0	0.0	344.3	351.1
Flüssiggas	1.0	0.0	0.0	7.5	2.9	11.4
E85	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Strom	103.3	453.8	0.0	12.2	0.0	569.3
Wasserstoff	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5
<b>TOTAL</b>	<b>10 036.4</b>	<b>453.8</b>	<b>101.1</b>	<b>670.1</b>	<b>1 041.3</b>	<b>12 302.7</b>
<b>% des Totals</b>						
Benzin	37.7%	0.0%	21.5%	6.0%	0.0%	31.2%
Bioethanol	0.9%	0.0%	0.5%	0.1%	0.0%	0.7%
Diesel	57.7%	0.0%	46.9%	87.2%	0.0%	52.2%
Biodiesel	2.5%	0.0%	2.0%	3.7%	0.4%	2.3%
Heizöl Extraleicht	0.0%	0.0%	29.2%	0.0%	2.6%	0.5%
Erdgas	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	63.7%	5.6%
Biogas	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	33.1%	2.9%
Flüssiggas	0.0%	0.0%	0.0%	1.1%	0.3%	0.1%
E85	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Strom	1.0%	100.0%	0.0%	1.8%	0.0%	4.6%
Wasserstoff	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

## 4.2. Strasse

Der Strassenverkehr hat im Jahr 2022 im Kanton Luzern gut 10'000 TJ Endenergie verbraucht und dabei gut 700'000 t fossiles CO<sub>2</sub> emittiert (Tabelle 14). Zudem wurden als wichtigste Luftschadstoffe rund 1200 t Stickoxide (NO<sub>x</sub>) und 160 t Feinstaub (PM10) emittiert; von letzterem stammen nur ca. 9% aus Abgasen, der Rest entsteht durch Reifen-, Brems-, und Strassenabrieb sowie Aufwirbelung.

Von den Fahrzeugkategorien sind die PW die grössten Emittenten. Sie verbrauchen etwa zwei Drittel der Energie und verursachen je nach Schadstoff zwischen 38% und 67% der Emissionen. Gefolgt werden sie von den Schwere Güterfahrzeugen (SGF) mit ca. 20% Energieverbrauchsanteil und 17% - 27% Emissionsanteil und den Lieferwagen mit ca. 7% Energieverbrauchsanteil und 5% - 18% Emissionsanteil. Die restlichen Fahrzeugkategorien steuern geringe Anteile an Verbrauch und Emissionen bei – mit Ausnahme der Motorräder, welche überproportionale Feinstaub-Emissionen verursachen, und der Linienbusse, deren Abriebs- und Aufwirbelungs-Feinstaubemissionen überproportional zum Energieverbrauch ausfallen.

Die Unterschiede erklären sich einerseits durch die Unterschiede in den Verkehrsaktivitäten (Fahrleistungen, s. Kap. 3.1) und andererseits durch die Unterschiede in Gewicht und Leistung der einzelnen Fahrzeuge, aber auch betreffend Verfügbarkeit von Abgastechnologien. So erklären sich etwa die hohen Luftschadstoffemissionen der Motorräder durch die Tatsache, dass die Emissionsgrenzwerte bei dieser Fahrzeugkategorie deutlich weniger strikt sind als bei den grösseren Fahrzeugen; bei den Linienbussen sind die hohen Abriebemissionen zumindest teilweise durch den Fahrdrabtrieb der Trolleybusse zu erklären (wobei die entsprechenden Emissionsfaktoren veraltet und unsicher sind, s. auch Kap. 2.1.1).

**Tabelle 14: Emissionen der wichtigsten Schadstoffe und Energieverbrauch der Strassenfahrzeuge im Kanton Luzern im Jahr 2022.**

FzKat	CO <sub>2</sub> (fossil) [t/a]	Energiever- brauch [TJ/a]	NO <sub>x</sub> [t/a]	PM10 (Abgas) [t/a]	PM10 (Abrieb, Aufwirbelung) [t/a]
<b>Absolute Werte</b>					
PW	471 444	6 665	743	5.2	85.2
Lieferwagen	52 005	743	172	2.5	7.2
Reisebus	10 042	143	27	0.4	3.5
Linienbus	16 593	285	41	0.3	10.0
Motorrad	10 725	149	10	2.7	1.1
SGF	143 629	2 052	206	2.7	39.7
<b>TOTAL</b>	<b>704 436</b>	<b>10 036</b>	<b>1 200</b>	<b>13.7</b>	<b>146.6</b>
<b>% des Totals</b>					
PW	67%	66%	62%	38%	58%
Lieferwagen	7%	7%	14%	18%	5%
Reisebus	1%	1%	2%	3%	2%
Linienbus	2%	3%	3%	2%	7%
Motorrad	2%	1%	1%	20%	1%
SGF	20%	20%	17%	19%	27%

Die implizierten (d.h. durchschnittlichen) Emissionsfaktoren<sup>4</sup> des Strassenverkehrs sind in Tabelle 15 dargestellt. Sie entsprechen ungefähr den Schweizer Durchschnitten gemäss BAFU (Notter et al. [im Druck]; s. auch Kap. 5) und scheinen somit plausibel. Die Energieverbrauchs-faktoren sind v.a. vom durchschnittlichen Gewicht bzw. der Leistung der Fahrzeuge abhängig; die CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren sind ebenfalls davon, aber zusätzlich auch von der Zusammensetzung nach Antriebstechnologie, welche mehr oder weniger CO<sub>2</sub>-intensiv sein kann – so weist z.B. Gas niedrigere CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Energieeinheit auf, und batterieelektrische Fahrzeuge

<sup>4</sup> "Implizierte" Emissionsfaktoren werden durch Rückrechnung, d.h. mittels Division der Emissionen durch die entsprechenden Aktivitäten (Fahrleistungen, Betriebsstunden etc.) auf aggregierter Ebene (z.B. Fahrzeugkategorie) berechnet. Sie stellen daher durchschnittliche Werte für die betrachtete Quelle oder Quellgruppe dar.

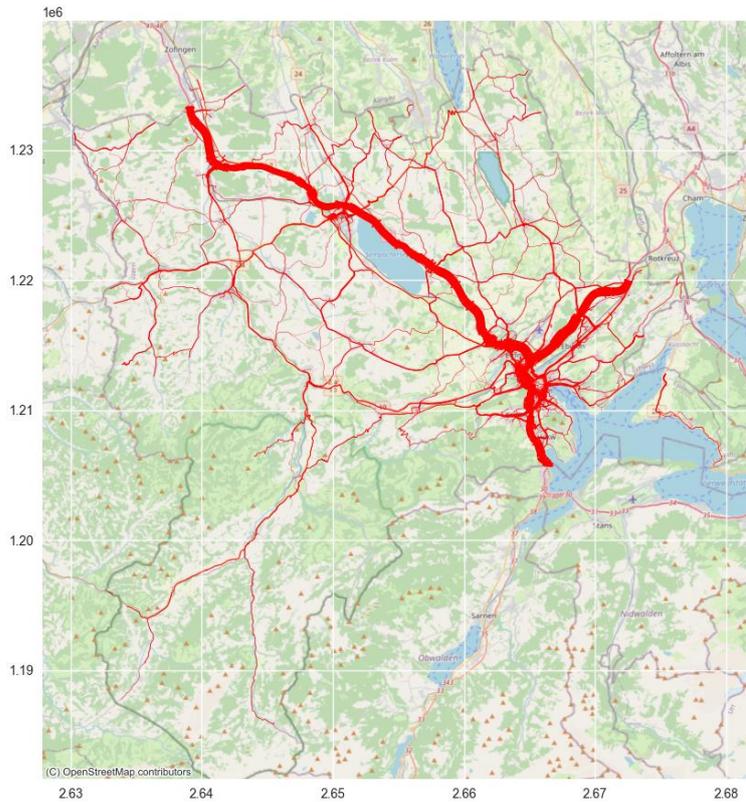
sind im Betrieb vollständig emissionsfrei. Die Luftschadstoff-Emissionsfaktoren schliesslich hängen v.a. von der Art der eingesetzten Abgastechnologien, z.B. Katalysatoren oder Partikelfilter, ab.

**Tabelle 15: Implizierte (durchschnittliche) Emissionsfaktoren der Strassenfahrzeuge im Kanton Luzern im Jahr 2022.**

FzKat	CO <sub>2</sub> (fossil) [g/km]	EC [MJ/km]	NO <sub>x</sub> [g/km]	PM <sub>10</sub> (Abgas) [g/km]	PM <sub>10</sub> (Abrieb, Aufwirbelung) [g/km]
PW	173.4	2.5	0.3	0.002	0.031
Lieferwagen	225.0	3.2	0.7	0.011	0.031
Reisebus	727.4	10.4	2.0	0.026	0.254
Linienbus	859.6	14.8	2.1	0.014	0.518
Motorrad	99.2	1.4	0.1	0.025	0.010
SGF	858.6	12.3	1.2	0.016	0.237
<b>Strassenverkehr</b>	<b>216.2</b>	<b>3.1</b>	<b>0.4</b>	<b>0.004</b>	<b>0.045</b>

Eine räumliche Visualisierung der abschnittswisen NO<sub>x</sub>-Emissionen des Strassenverkehrs ist in Abbildung 4 zu finden.

Abbildung 4: NO<sub>x</sub>-Emissionen des Strassenverkehrs nach Strassenabschnitten 2022 im Kanton Luzern



Grafik INFRAS. Quellen: GVM Kt. LU, HBEFA 42, OpenStreetMap, eigene Auswertungen

### 4.3. Schiene

Der Schienenverkehr hat im Jahr 2022 im Kanton Luzern rund 450 TJ Endenergie verbraucht und etwa 48 t Feinstaub (PM10) aus Abrieb von Schienen und Bremsen emittiert (Tabelle 16). Personenzüge machen ca. 96% der Zugkilometer aus, verbrauchen etwa 95% der Energie und sind für nur etwa 90% der Feinstaubemissionen verantwortlich. Grund dafür ist, dass Personenzüge leicht weniger Energieverbrauch und deutlich weniger Feinstaubemissionen pro Kilometer aufweisen als Güterzüge (Tabelle 17). Der Energieverbrauch pro Gemeinde des Schienenverkehrs ist in Abbildung 5 dargestellt.

**Tabelle 16: Emissionen der wichtigsten Schadstoffe und Energieverbrauch der Schienenfahrzeuge im Kanton Luzern im Jahr 2022.**

Zugstyp	CO <sub>2</sub> (fossil) [t/a]	Energiever- brauch [TJ/a]	NO <sub>x</sub> [t/a]	PM10 (Abgas) [t/a]	PM10 (Abrieb, Aufwirbelung) [t/a]
<b>Absolute Werte</b>					
Güterverkehr	0	22	0	0	0.005
Personenverkehr	0	432	0	0	0.043
<b>TOTAL</b>	<b>0</b>	<b>454</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0.048</b>
<b>% des Totals</b>					
Güterverkehr		5%			10%
Personenverkehr		95%			90%

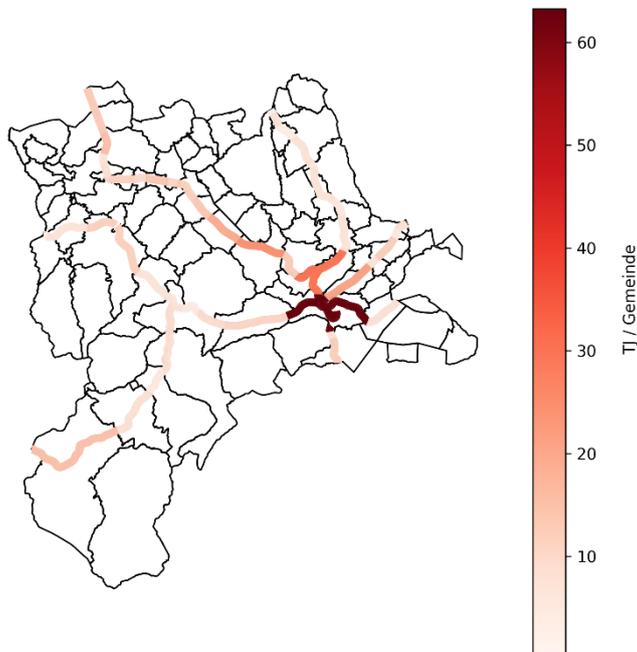
Beachte: Hier ist nur der elektrifizierte Schienenverkehr dargestellt. Dieselbetriebene Schienenunterhaltsfahrzeuge werden zu den Non-Road-Maschinen gezählt, ihre Emissionen sind in Tabelle 18 dargestellt.

**Tabelle 17: Implizierte (durchschnittliche) Emissionsfaktoren der Schienenfahrzeuge im Kanton Luzern im Jahr 2022.**

Zugstyp	CO <sub>2</sub> (fossil) [g/km]	EC [MJ/km]	NO <sub>x</sub> [g/km]	PM10 (Abgas) [g/km]	PM10 (Abrieb, Aufwirbelung) [g/km]
Güterverkehr	0	57	0	0	0.013
Personenverkehr	0	43	0	0	0.004
<b>Schienenverkehr</b>	<b>0</b>	<b>44</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0.005</b>

Beachte: Hier ist nur der elektrifizierte Schienenverkehr dargestellt. Dieselbetriebene Schienenunterhaltsfahrzeuge werden zu den Non-Road-Maschinen gezählt, ihre implizierten Emissionsfaktoren sind in Tabelle 19 dargestellt.

**Abbildung 5: Räumliche Darstellung des Energieverbrauchs der Schienenverkehr pro Gemeinde des Kantons Luzern, 2022**



Grafik INFRAS. Quelle: swisstopo, eigene Auswertungen

#### 4.4. Non-Road

Non-Road-Maschinen haben im Jahr 2022 im Kanton Luzern rund 670 TJ Endenergie verbraucht und dabei knapp 50'000 t fossiles CO<sub>2</sub> emittiert (Tabelle 18). Zudem wurden als wichtigste Luftschadstoffe rund 180 t Stickoxide (NO<sub>x</sub>) und 7 t Feinstaub (PM10) emittiert; letztere stammen vollständig aus Abgasen. Zwar entstehen durch Reifen- und Bremsabrieb, sowie Abrieb des Untergrunds und Aufwirbelung ebenfalls Feinstaub-Emissionen – es liegen jedoch keine entsprechenden aktuellen Emissionsfaktoren vor, und methodische sowie Abgrenzungsfragen bei vorhandenen veralteten Quellen bleiben unklar (s. auch Kap. 2.4).

Von den Non-Road-Maschinengattungen sind die Baumaschinen hinsichtlich Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen die grössten Verursacher mit ca. 46% Anteil, gefolgt von landwirtschaftlichen Maschinen (rund 26%) und mobilen Maschinen in der Industrie (rund 14% - diese Maschinengattung schliesst auch Kommunal- und Pistenfahrzeuge mit ein). Hinsichtlich Luftschadstoffemissionen werden die Baumaschinen aber zumindest beim Feinstaub von den Landmaschinen übertroffen – von letzteren haben viele immer noch keinen Partikelfilter, da die Emissionsgrenzwerte in diesem Bereich erst später gesenkt wurden, und die Landmaschinen (dominiert durch Traktoren) im Durchschnitt auch ein hohes Alter aufweisen. Generell gilt für

die kleinsten (<18 kW) und grössten (>560 kW) Non-Road-Maschinen immer noch keine Partikelfilterpflicht.

Die restlichen Maschinengattungen weisen deutlich niedrigeren Energieverbrauch und Emissionen auf – sei es, weil sie nur kleine Bestände und/oder geringe Betriebsstunden aufweisen (wie Forstwirtschaft, Militär oder Diesel-Schienenfahrzeuge), oder weil sie v.a. aus kleinen, meist handgehaltenen Benzin- oder zunehmend elektrischen Geräten wie Rasenmähern, Motorsägen, Vertikutierern etc. bestehen (Maschinengattung «Gartenpflege/Hobby»).

**Tabelle 18: Energieverbrauch und Emissionen des Non-Road-Verkehrs im Kanton Luzern im Jahr 2022.**

Maschinengattung	CO <sub>2</sub> (fossil) [t/a]	Energiever- brauch [TJ/a]	NO <sub>x</sub> [t/a]	PM10 (Abgas) [t/a]
<b>Absolute Werte</b>				
Baumaschinen	22'874	310.7	57.4	1.32
Industrie	6'180	95.5	17.2	0.47
Landwirtschaft	12'788	173.6	57.2	4.43
Forstwirtschaft	1'619	22.0	3.6	0.11
Gartenpflege/Hobby	1'214	17.8	2.6	0.00
Schiene	3'463	47.0	41.7	0.28
Militär	250	3.4	0.9	0.02
<b>TOTAL Non-Road-Verkehr</b>	<b>48'388</b>	<b>670.1</b>	<b>180.6</b>	<b>6.63</b>
<b>% des Totals</b>				
Baumaschinen	47%	46%	32%	20%
Industrie	13%	14%	10%	7%
Landwirtschaft	26%	26%	32%	67%
Forstwirtschaft	3%	3%	2%	2%
Gartenpflege/Hobby	3%	3%	1%	0%
Schiene	7%	7%	23%	4%
Militär	1%	1%	0%	0%

Die implizierten (d.h. durchschnittlichen) Emissions- und Verbrauchsfaktoren der Non-Road-Maschinen sind in Tabelle 19 dargestellt. Die Energieverbrauchsfaktoren sind v.a. von der durchschnittlichen Leistung der Maschinen abhängig; die CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren sind ebenfalls davon, aber zusätzlich auch von der Zusammensetzung nach Antriebstechnologie, welche mehr oder weniger CO<sub>2</sub>-intensiv sein kann – so weist z.B. das von Gabelstaplern oft verwendete Flüssiggas niedrigere CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Energieeinheit auf, und elektrisch angetriebene Maschinen (bisher nur in den kleinsten Grössenklassen relevant) sind im Betrieb vollständig emissionsfrei. Die Luftschadstoff-Emissionsfaktoren schliesslich hängen v.a. von der Art der eingesetzten Abgastechnologien, z.B. Katalysatoren oder Partikelfilter, ab; besonders Landwirtschaft

und beim Militär weisen diesbezüglich einen niedrigen Durchdringungsgrad (bei gleichzeitig leistungsstarken Maschinen) auf, was die hohen NO<sub>x</sub>- und PM10-Emissionsfaktoren erklärt.

Eine Kartendarstellung der Emissionen der Non-Road-Maschinen und der stationären Anlagen findet sich in Abbildung 7.

**Tabelle 19: Implizierte (durchschnittliche) Emissionsfaktoren von Non-Road-Maschinen im Kanton Luzern im Jahr 2022.**

Maschinengattung	CO <sub>2</sub> (fossil) [kg/h]	Energiever- brauch [MJ/h]	NO <sub>x</sub> [g/h]	PM10 (Abgas) [g/h]
Baumaschinen	18.4	249.4	46.1	1.1
Industrie	2.8	43.9	7.9	0.2
Landwirtschaft	12.2	165.5	54.5	4.2
Forstwirtschaft	13.0	176.1	29.1	0.9
Gartenpflege/Hobby	0.2	2.2	0.3	0.0
Schiene	63.1	856.9	760.1	5.1
Militär	20.8	283.1	74.4	1.9
<b>Non-Road-Verkehr</b>	<b>3.8</b>	<b>53.1</b>	<b>14.3</b>	<b>0.5</b>

## 4.5. Schifffahrt

Schiffe haben im Jahr 2022 im Kanton Luzern rund 102 TJ Endenergie verbraucht und dabei leicht über 7'300 t fossiles CO<sub>2</sub> emittiert (Tabelle 20). Zudem wurden als wichtigste Luftschadstoffe rund 50 t Stickoxide (NO<sub>x</sub>) und etwa 1.3 t Feinstaub (PM10) emittiert. Dabei sind Fahrgastschiffe für etwa 60% der Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>- und Feinstaubemissionen und 51% der NO<sub>x</sub> Emissionen verantwortlich.

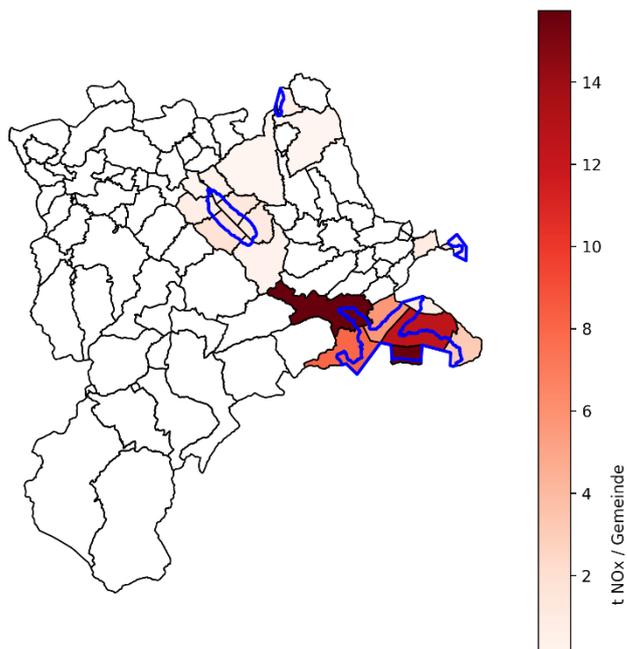
Die implizierten (d.h. durchschnittlichen) Emissions- und Verbrauchsfaktoren der Schiffe sind in Tabelle 21 dargestellt. Da Fahrgastschiffe viel grösser als die übrigen Schiffe sind, weisen sie viel höhere Verbrauchs- und Emissionswerte pro Stunde auf. Die NO<sub>x</sub>-Emissionen pro Gemeinde des Schiffsverkehrs sind in Abbildung 6 dargestellt.

Tabelle 20: Energieverbrauch und Emissionen von Schiffen im Kanton Luzern im Jahr 2022.

Schiffverkehrstyp	CO <sub>2</sub> (fossil) [t/a]	Energieverbrauch [TJ/a]	NO <sub>x</sub> [t/a]	PM10 (Abgas) [t/a]
<b>Absolute Werte</b>				
Fahrgastschiffe	4'378	61	25	0.8
Andere	2'891	40	24	0.5
<b>TOTAL Schiffsverkehr</b>	<b>7'270</b>	<b>101.1</b>	<b>49</b>	<b>1.3</b>
<b>% des Totals</b>				
Fahrgastschiffe	60%	60%	51%	64%
Andere	40%	40%	49%	36%

Tabelle 21: Implizierte (durchschnittliche) Emissionsfaktoren von Schiffen im Kanton Luzern im Jahr 2022.

Schiffverkehrstyp	CO <sub>2</sub> (fossil) [kg/h]	Energieverbrauch [MJ/h]	NO <sub>x</sub> [g/h]	PM10 (Abgas) [g/h]
Fahrgastschiffe	277	3848	1.6	5.2E-02
Andere	22	311	0.2	3.6E-03
<b>Schiffsverkehr</b>	<b>50</b>	<b>696</b>	<b>0.3</b>	<b>8.9E-03</b>

Abbildung 6: Räumliche Darstellung der NO<sub>x</sub>-Emissionen des Schiffsverkehrs pro Gemeinde des Kantons Luzern, 2022.

Grafik INFRAS. Quelle: swisstopo, Geodatenportal RAWI, eigene Auswertungen

## 4.6. Stationäre Motoren und Gasturbinen

Stationäre Motoren und Gasturbinen haben im Jahr 2022 im Kanton Luzern rund 1000 TJ Endenergie verbraucht und dabei knapp 40'000 t fossiles CO<sub>2</sub> emittiert (Tabelle 22). Zudem wurden als wichtigste Luftschadstoffe rund 80 t Stickoxide (NO<sub>x</sub>) und knapp 2 t Feinstaub (PM10) emittiert. Letztere stammen vollständig aus Abgasen – Abrieb- und Aufwirbelungsemissionen treten bei stationären Anlagen nicht auf.

Von den verschiedenen Anlagentypen sind die grossen Anlagen – von denen es im Kanton Luzern mit der Verdichterstation Ruswil der Transitgas AG nur eine gibt – die grössten Verbraucher und Emittenten von Treibhausgasen. Die kleinen WKK-Anlagen liegen punkto Energieverbrauch nicht weit hinter den grossen Anlagen hinterher, stossen aber deutlich weniger fossiles CO<sub>2</sub> aus. Der Grund dafür ist, dass die kleinen WKK-Anlagen ihren Energiebedarf zu einem grossen Teil mit Biogas bzw. Gas aus erneuerbaren Quellen decken – sei dies aus der Landwirtschaft, aus ARAs (Klärgas) oder Deponien (Deponiegas), während grosse Anlagen v.a. Erdgas verwenden.

Hinsichtlich Luftschadstoff-Emissionen übertreffen hingegen die kleinen WKK-Anlagen die grossen Anlagen, da letztere hauptsächlich mit Gasturbinen betrieben werden, welche sehr geringen Schadstoffausstoss aufweisen.

**Tabelle 22: Energieverbrauch und Emissionen stationärer Motoren und Gasturbinen im Kanton Luzern im Jahr 2022.**

Quellkategorie	CO <sub>2</sub> (fossil) [t/a]	Energieverbrauch [TJ/a]	NO <sub>x</sub> [t/a]	PM10 (Abgas) [t/a]
Stationäre Motoren und Gasturbinen	39'780	1'041	83.0	1.63

**Beachte:** Aus Datenschutzgründen (Verdichterstation Ruswil als einzige grosse Anlage) können die Emissionen der stationären Motoren und Gasturbinen nicht nach Anlagentyp desaggregiert dargestellt werden.

Die implizierten (d.h. durchschnittlichen) Emissions- und Verbrauchsfaktoren der stationären Motoren und Gasturbinen sind in Tabelle 23 dargestellt. Die Energieverbrauchsfaktoren sind v.a. von der durchschnittlichen Leistung der Maschinen abhängig – hinsichtlich welcher die Gasturbinen in Ruswil mit je 20 MW elektrischer Leistung die kleineren Anlagen haushoch übertreffen; die CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren sind ebenfalls von der Leistung, aber zusätzlich auch von der Antriebstechnologie bzw. dem eingesetzten Energieträger abhängig, welche mehr oder weniger CO<sub>2</sub>-intensiv sein kann; bei den kleinen WKK-Anlagen führt, wie oben bereits erwähnt, der hohe Biogas-Anteil zu niedrigen fossilen CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren. Die Luftschadstoff-Emissionsfaktoren schliesslich hängen neben der Leistung von der Art der eingesetzten Abgastechno-

logien, z.B. Katalysatoren oder Partikelfilter, ab; die bei grossen Anlagen eingesetzten Gasturbinen sind bereits ohne zusätzliche Abgastechnologie vergleichsweise schadstoffarm, die Aggregate in Ruswil werden zusätzlich mit der DLE-Technologie optimiert.

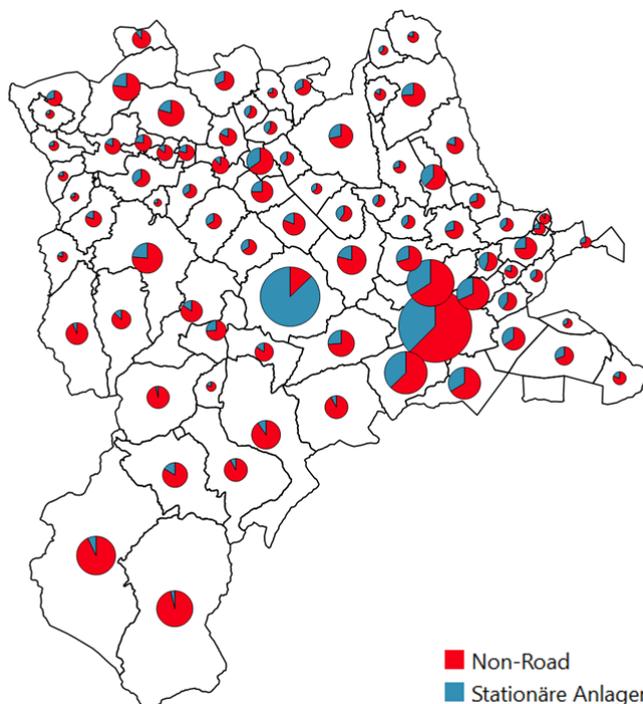
Eine Kartendarstellung der Emissionen der Non-Road-Maschinen und der stationären Anlagen findet sich in Abbildung 7.

**Tabelle 23: Implizierte (durchschnittliche) Emissionsfaktoren stationärer Motoren und Gasturbinen im Kanton Luzern im Jahr 2022.**

Quellkategorie	CO <sub>2</sub> (fossil) [kg/h]	Energie-ver- brauch [MJ/h]	NO <sub>x</sub> [g/h]	PM <sub>10</sub> (Ab- gas) [g/h]
Stationäre Motoren und Gasturbinen	93.3	2'442.2	194.7	3.8

Beachte: Aus Datenschutzgründen (Verdichterstation Ruswil als einzige grosse Anlage) können die Emissionsfaktoren stationärer Motoren und Gasturbinen nicht nach Anlagentyp desaggregiert dargestellt werden.

**Abbildung 7: Räumliche Darstellung der NO<sub>x</sub>-Emissionen der Non-Road-Maschinen sowie stationärer Motoren und Gasturbinen pro Gemeinde des Kantons Luzern, 2022**



Grafik INFRAS. Quelle: swisstopo, BAFU (2015), INFRAS (2022), eigene Auswertungen

## 5. Diskussion und Empfehlungen

### 5.1. Vergleich mit anderen Studien

Die vorliegenden Resultate werden in den folgenden Abschnitten mit anderen Studien verglichen, um ihre Plausibilität und Aussagekraft einzuordnen.

Das Bundesamt für Umwelt (BAFU) veröffentlicht demnächst einen aktualisierten Bericht zu den Emissionen des Strassenverkehrs in der Schweiz (Notter et al. [im Druck]). Die dort veröffentlichten Emissionsfaktoren lassen sich gut mit den aus den vorliegenden Resultaten rückgerechneten implizierten Emissionsfaktoren vergleichen. Tabelle 24 zeigt den Vergleich, für welchen die Angaben aus der BAFU-Studie für 2020 und 2025 interpoliert und ins Verhältnis zu den hier resultierenden implizierten Emissionsfaktoren gesetzt wurden.

Für die meisten Schadstoffe/Verbrauch und Fahrzeugkategorien liegen die Emissionsfaktoren aus der vorliegenden Studie (also Durchschnitt des Kantons Luzern) sehr nahe an den entsprechenden Schweizer Durchschnitten.

Abweichungen lassen sich durch unterschiedliche Fahrleistungsanteile der einzelnen Verkehrssituationen im Kanton Luzern und der gesamten Schweiz erklären. Zum Beispiel findet in Luzern ein vergleichsweise hoher Anteil der Reisebus-Fahrleistungen in der Stadt Luzern statt – und im urbanen Gebiet fallen die Emissionsfaktoren im Allgemeinen aufgrund der niedrigen Durchschnittsgeschwindigkeiten und der vielen Beschleunigungs- und Bremsvorgänge höher aus als auf der Autobahn oder ausserorts. Der im Schweizer Vergleich höhere Anteil der Reisebus-Fahrleistungen in der Stadt mit entsprechend höheren Emissionsfaktoren hebt somit die durchschnittlichen Emissionsfaktoren im Kanton Luzern an.

Die eher niedrigen CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren der Linienbusse wiederum sind durch den hohen Anteil an Trolleys und batterieelektrischen Bussen erklärbar – ihre vergleichsweise hohen Abriebs- und Aufwirbelungs-PM10-Emissionsfaktoren hingegen durch den Fahrdrabtrieb der Trolleybusse.

**Tabelle 24: Implizierte Emissionsfaktoren in der vorliegenden Studie ausgedrückt in Prozent derjenigen in der demnächst publizierten BAFU-Studie (Notter et al. [im Druck]).**

FzKat	CO <sub>2</sub> (fossil) [g/km]	EC [MJ/km]	NO <sub>x</sub> [g/km]	PM10 (Abgas) [g/km]	PM10 (Abrieb, Aufwirbelung) [g/km]
PW	101%	101%	96%	107%	104%
Lieferwagen	98%	98%	91%	107%	103%
Reisebus	112%	111%	119%	120%	132%
Linienbus	88%	102%	74%	87%	152%
Motorrad	97%	97%	90%	182%	98%
SGF	114%	113%	110%	99%	130%

Für die Stadt Luzern hat INFRAS fürs Jahr 2020 eine ähnliche Studie durchgeführt wie aktuell für den Kanton (INFRAS 2020). Die Emissionen auf dem Gemeindegebiet von Luzern wurden im Rahmen der vorliegenden Studie zusätzlich fürs Jahr 2020 mit den aktuellen Inputs neu berechnet<sup>5</sup>, um vergleichbarere Resultate mit der Studie für die Stadt zu erhalten.

Der Vergleich der absoluten Emissionen für den Strassenverkehr ist in Tabelle 25 dargestellt. Im Total fallen Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen fast identisch aus; bei einzelnen Fahrzeugkategorien weichen sie jedoch stärker ab. Dies liegt v.a. an unterschiedlichen Fahrleistungs-Inputs: Zwar sind die GVM-Inputs identisch, aber

- für Reisebusse und Linienbusse liegen aktuellere Inputs vor. Das Verkehrsaufkommen der Reisebusse wird bspw. aktuell doppelt so hoch eingeschätzt wie in der Vorgängerstudie, als erst eine Prognose einer Studie aus dem Jahr (PwC 2014) vorlag; ausserdem wird von einer längeren Carroute durch die Stadt ausgegangen.

Bei den Linienbussen stammen die aktuellen Inputs aus dem GVM, wurden aber mit den auf der VVL-Website veröffentlichten Kurskilometern für 2022 abgeglichen. In der Vorgängerstudie basierten die Fahrleistungen hingegen rein auf vom VVL erhaltenen Inputs.

- Aktuell werden aktualisierte Splitfaktoren, mittels welcher die Fahrleistungen von PW und Motorrädern resp. Lastwagen und Reisebussen gesplittet wurden, verwendet (s. Tabelle 29), die sich von denjenigen in der Vorgängerstudie unterscheiden.

<sup>5</sup> Die aktuelle Neuberechnung stützt sich auf dieselben GVM-Inputs, aber unterscheidet sich in folgenden Punkten von der Studie für die Stadt Luzern (INFRAS 2020):

- Die Verbrauchs- und Emissionsfaktoren sowie die Flottenzusammensetzungen entstammen einer neueren HBEFA-Version (4.2 anstatt 4.1);
- Für Linien- und Reisebusse liegen aktuellere Inputs vor;
- Die Fahrleistungen liegen insgesamt leicht tiefer, da sie zwischen 2020 und 2022 leicht abgenommen haben;
- Die Aufbereitungs-Methodik unterscheidet sich leicht, da in der aktuellen Studie strassenabschnittsweise Outputs für den Luftschadstoff-Emissionskataster produziert wurden; in der Studie für die Stadt fiel diese Anforderung weg, weswegen einige Aufbereitungsschritte vereinfacht werden konnten.

Die Neuberechnung wurde auf Wunsch der Stadt Luzern vorgenommen, um die Vergleichbarkeit der Resultate zu erhöhen. Im Vergleich zu den Hauptresultaten der vorliegenden Studie für 2022 ist zu beachten, dass sich die Flotten zwischen 2020 und 2022 weiterentwickelt haben und neuere emissionsärmere Fahrzeuge 2022 einen höheren Flottenanteil ausmachen. Damit sinken die durchschnittlichen Emissionsfaktoren tendenziell zwischen 2020 und 2022.

Die Emissionen der Luftschadstoffe NO<sub>x</sub> und PM10 weichen schliesslich auch deswegen ab, weil für die Vorgängerstudie für die Stadt Luzern noch die HBEFA-Version 4.1 zur Anwendung kam, während wir aktuell die Version 4.2 (publiziert anfangs 2022) verwenden.

Diese Effekte lassen sich besser in Tabelle 26 sehen, welche die implizierten Emissionsfaktoren vergleicht anstelle der Emissionen, womit die Effekte unterschiedlicher Fahrleistungen wegfallen. Mit HBEFA 4.2 wurden v.a. die durchschnittlichen Emissionsfaktoren der Schwere Güterfahrzeuge (SGF) gesenkt, da die Messungen der neusten, dem Emissionsstandard Euro VI D entsprechenden Fahrzeuge mitberücksichtigt werden; die Bus-Emissionsfaktoren für die Schadstoffe fallen hingegen höher aus, weil für HBEFA 4.1 erst wenige Messungen für neue Busse vorlagen und die zusätzlichen für HBEFA 4.2 mitberücksichtigten Messungen deutlich höher ausfielen (s. auch Update-Dokumentation HBEFA 4.2, Notter, Cox, et al. 2022).

**Tabelle 25: Emissionen im Jahr 2020 in der Gemeinde Luzern aus der vorliegenden Studie, ausgedrückt in Prozent derjenigen aus der Vorgängerstudie für die Stadt Luzern (INFRAS 2020).**

FzKat	CO <sub>2</sub> (fossil)	EC	NO <sub>x</sub>	PM10 exhaust	PM10 non-exhaust
PW	98%	99%	89%	82%	93%
Lieferwagen	93%	95%	91%	77%	92%
Reisebus	263%	272%	277%	216%	378%
Linienbus	159%	85%	208%	120%	110%
Motorrad	143%	148%	121%	89%	121%
SGF	98%	100%	83%	68%	81%
<b>TOTAL</b>	<b>101%</b>	<b>100%</b>	<b>95%</b>	<b>81%</b>	<b>94%</b>

**Tabelle 26: Implizierte Emissionsfaktoren für das Jahr 2020 und nur für die Gemeinde Luzern aus der vorliegenden Studie, ausgedrückt in Prozent derjenigen aus der Vorgängerstudie für die Stadt Luzern (INFRAS 2020).**

FzKat	CO <sub>2</sub> (fossil)	EC	NO <sub>x</sub>	PM10 exhaust	PM10 non-exhaust
PW	104%	104%	94%	87%	98%
Lieferwagen	100%	102%	98%	83%	98%
Reisebus	115%	118%	120%	98%	133%
Linienbus	122%	65%	160%	97%	84%
Motorrad	116%	115%	100%	73%	101%
SGF	107%	109%	91%	74%	88%
<b>Strassenverkehr</b>	<b>103%</b>	<b>100%</b>	<b>130%</b>	<b>112%</b>	<b>89%</b>

Im Auftrag des Amtes für Umwelt und Energie (uwe) des Kantons Luzern führte die Firma Jenni + Gottardi (2016) eine Emissionsmodellierung für den Strassenverkehr auf Basis des HBEFA 3.2 durch. Die Resultate dieser Studie werden im Folgenden ebenfalls mit den aktuellen Resultaten verglichen. Die Emissionsresultate von Jenni + Gottardi (2016) wurden für den Vergleich in Tabelle 27 für das Jahr 2022 basierend auf den präsentierten Resultaten für 2020 und 2025 interpoliert. Die Unterschiede sind bei den meisten Schadstoffen beträchtlich.

Über die Gründe für diese Unterschiede kann zu einem grossen Teil nur gemutmasst werden, da die den Emissionen zugrundeliegenden Fahrleistungen im Bericht von 2016 nicht aufgeführt sind. Das damals als Input verwendet KVM (Kantonales Verkehrsmodell) unterscheidet sich gemäss Auskunft der Dienststelle Verkehr und Infrastruktur (vif) sowohl hinsichtlich Grundlagendaten, Methodik, räumlicher Auflösung, als auch den resultierenden Fahrleistungen stark vom aktuellen GVM. Zusätzlich unterscheidet sich auch die Methodik der Aufbereitung dieser Inputs von der hier angewendeten.

Sicher bestehen relevante Differenzen bei den Emissionsfaktoren: Zwischen der Veröffentlichung der Versionen 3.2 und 3.3 des HBEFA fand der Dieselskandal um VW statt, in dessen Folge speziell die NO<sub>x</sub>-Emissionen von Dieselfahrzeugen stärker im Fokus standen und neue Messungen von den zuständigen Ämtern, v.a. in Deutschland, finanziert wurden. Dies führte unter anderem zur Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit der NO<sub>x</sub>-Emissionen und damit zu höheren NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktoren in HBEFA-Version 3.3 (verglichen mit 3.2). Mit dem umfassenden Update auf HBEFA-Version 4.1 änderten sich die meisten Emissionsfaktoren nochmals in relevantem Ausmass, denn für diese Version konnten erstmals Messungen auf der Strasse mit PEMS (Portable Emission Measurement Systems) verwendet werden, was die Menge der zur Verfügung stehenden Messdaten vervielfachte. Schadstoffe wie CH<sub>4</sub>, NMHC oder Benzol, welche in Tabelle 27 die höchsten Abweichungen zeigen, basierten vor HBEFA 4.1 auf teilweise veralteten Literaturwerten mit unklarem Messhintergrund (z.B. aus den EMEP/EEA Emission Inventory Guidebooks) – erst mit HBEFA 4.1 wurden Messresultate verfügbar, gestützt auf welche diese Emissionsfaktoren auf robustere Basis gestellt werden konnten. Mit HBEFA 4.2 fand wiederum ein «leichtes» Update statt, bei welchem v.a. die Emissionsfaktoren der schweren Nutzfahrzeuge basierend auf neuen Messresultaten aktualisiert wurden, aber auch weitere kleinere Aktualisierungen erfolgten.

**Tabelle 27: Vergleich zwischen den Emissionsresultaten für den Kanton Luzern nach Jenni + Gottardi (2016) und der vorliegenden Studie.**

Schadstoff	Jenni + Gottardi 2016*	Diese Studie	Abweichung
CO <sub>2</sub> (total)	585'320	736'301	26%
NO <sub>x</sub>	758	1'201	59%
PM10 (Abgas)	14	14	-4%
CH <sub>4</sub>	2	37	2008%
NMHC	31	296	857%
N <sub>2</sub> O	15	22	48%
NH <sub>3</sub>	77	43	-44%
Benzol	2	16	594%

\* Werte für 2022 interpoliert aus Resultaten für 2020 und 2025

## 5.2. Vorgehen bei Aktualisierungen

Die vorliegende Studie liefert Emissionsresultate für das Stichjahr 2022. Die Datengrundlagen des Kantons Luzern, insbesondere das LU-KEIS, müssen in Zukunft für darauffolgende Jahre aktualisiert werden. Daher beschreiben wir im Folgenden einen Vorgehensvorschlag für Aktualisierungen mit einem kurzfristigen Zeithorizont (bis ungefähr 5 Jahre, also ca. bis 2027).

Für die Mengengerüste (Fahrleistungen, Bestände, Starts, Stopps, Betriebsstunden) bestehen folgende Optionen:

- Lineare Interpolation zwischen den aktuellen Werten und einer verfügbaren Prognose für einen zukünftigen Zeitpunkt: Z.B. das aktuelle GVM des Kantons Luzern liefert auch einen Prognosezustand der Fahrleistungen auf der Strasse für das Jahr 2040.
- Anwendung von Wachstumsfaktoren aus einer geeigneten Quelle: Die Emissionsinventare des BAFU für Strasse (Notter et al. [im Druck]), Non-Road (BAFU 2015) und stationäre Motoren und Gasturbinen (INFRAS 2022) enthalten Zukunftsprognosen bis 2050 oder 2060. Aus den prognostizierten Mengengerüsten können durch Division des Parameterwertes im Zieljahr durch den Parameterwert 2022 Wachstumsfaktoren ab 2022 ermittelt werden, die mit den entsprechenden Werten aus der aktuellen Studie multipliziert werden können. Die Fahrleistungsprognosen für die Strassen basieren auf den Verkehrsperspektiven des ARE (2022) und können auch von da entnommen werden (allerdings sind die Fahrzeugkategorien dort anders definiert als im HBEFA).

Die Emissionsfaktoren ändern sich aufgrund der sich ständig weiterentwickelnden Flottenzusammensetzung ebenfalls über die Zeit. Daher sollten auch die Emissionsfaktoren nach der für die Mengengerüste beschriebenen Methodik mit Entwicklungsfaktoren skaliert werden, welche

den oben erwähnten Emissionsinventaren entnommen werden können. Für die Strassen können zukünftige Emissionsfaktoren auch der öffentlichen «Public Version» des HBEFA entnommen werden (verfügbar via [www.hbefa.net](http://www.hbefa.net); aggregierte Emissionsfaktoren sind dort gratis unter dem Menu *Software* > *Online Version* verfügbar) und für den Non-Road-Sektor der «Non-Road-Datenbank» des BAFU (<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/zu-stand/non-road-datenbank.html>). Für die stationären Motoren und Gasturbinen besteht bisher keine vergleichbare Online-Quelle, die Unterlagen können aber bei der Sektion Verkehr des BAFU angefragt werden.

Die Emissionen für zukünftige Jahre bis ca. 2027 können somit aus der Multiplikation der nach oben beschriebenen Vorgehen skalierten Mengengerüste und Emissionsfaktoren abgeschätzt werden.

Ein etwas vereinfachter Ansatz zu dem oben beschriebenen könnte darin bestehen, die Anteile aller Luzerner Gemeinden an den gesamtschweizerischen Emissionen gemäss BAFU zu bestimmen und diese Anteile mit den gesamtschweizerischen Emissionen in Folgejahren zu multiplizieren, um die Emissionen der Folgejahre zu schätzen. Der Aufwand wäre somit etwas niedriger als bei dem oben beschriebenen Vorgehen, hätte aber die Nachteile, dass:

- Keine Luzern-spezifischen Entwicklungen der Mengengerüste (z.B. Entwicklung der Verkehrsmengen zwischen GVM-Zuständen 2017 und 2040) berücksichtigt werden könnten;
- sowie dass die so berechneten Emissionsanteile für 2022 nicht ganz den rein mengenbedingten Anteilen entsprechen würden, weil die aktuelle Studie bspw. mit dem kantonalen GVM Mengengerüste aus anderen Quellen als die Bundesinventare verwendet. Bei einem Zeithorizont von 5 Jahren wäre jedoch der somit begangene «Fehler» gering.

Für Aktualisierungen mit einem längeren Zeithorizont – insbesondere, wenn neue Grundlagen hinsichtlich Fahrleistungen (also eine neue GVM-Version) oder Emissionsfaktoren (also eine neue HBEFA-Version, besonders ein umfassendes Update, und/oder aktualisierte Emissionsinventare für Non-Road oder stationäre Anlagen) vorliegen – empfehlen wir, eine Aktualisierung der vorliegenden Studie durchzuführen.

## Annex

### A1. Methodik

**Tabelle 28: Zuordnung HBEFA-Strasstypen und Höchstgeschwindigkeiten zu Streckentypen des GVM des Kantons Luzern**

Strasstyp_GVM	Höchst-geschwindigkeit [km/h]	HBEFA-RoadType
Gesperrte Gegenrichtung	30	Access-residential
Velo	30	Access-residential
Fussgängerzone / Fussweg	30	Access-residential
Autobahn 105-120/2	120	Motorway-Nat.
Autobahn 105-120/3	120	Motorway-Nat.
Autobahn 105-120/4	120	Motorway-Nat.
Autobahn 85-100/1	100	Motorway-Nat.
Autobahn 85-100/2	100	Motorway-Nat.
Autobahn 85-100/3	100	Motorway-Nat.
Autobahn 85-100/4	100	Motorway-Nat.
Autobahn 65-80/2	80	Motorway-Nat.
Autobahn 65-80/3	80	Motorway-Nat.
Autobahn -60/2	60	Motorway-City
Autobahn -60/3	60	Motorway-City
Autobahn-Verbindungsrampen -100/1	80	Primary-nat. non-motorway
Autobahn-Verbindungsrampen -100/2	80	Primary-nat. non-motorway
Autobahnanschluss -100/1	80	Primary-nat. non-motorway
Autobahnanschluss -100/2	80	Primary-nat. non-motorway
Autostrasse 85-100/1	100	Primary-nat. non-motorway
Autostrasse 85-100/2	100	Primary-nat. non-motorway
Autostrasse 65-80/1	80	Primary-nat. non-motorway
Autostrasse 65-80/2	80	Primary-nat. non-motorway
Autostrasse 65-80/3	80	Primary-nat. non-motorway
Autostrasse 60/1	60	Distributor/Secondary
Autostrasse -60/1	60	Distributor/Secondary
Autostrasseanschluss -80/1	80	Distributor/Secondary
Hauptstrasse anbaufrei 55-80/1	80	Distributor/Secondary
Hauptstrasse anbaufrei 55-80/2	80	Distributor/Secondary
Hauptstrasse anbaufrei 55-80/3	80	Distributor/Secondary
Hauptstrasse angebaut -50/1	50	Distributor/Secondary
Hauptstrasse angebaut -50/2	50	Distributor/Secondary
Hauptstrasse angebaut -50/3	50	Distributor/Secondary
Hauptstrasse angebaut -50/4	50	Distributor/Secondary
Verbindungsstrasse anbaufrei 55-80/1	80	Local/Collector
Verbindungsstrasse anbaufrei 55-80/2	80	Local/Collector
Verbindungsstrasse anbaufrei 55-80/3	80	Local/Collector

Strassentyp_GVM	Höchst-geschwindigkeit [km/h]	HBEFA-RoadType
Verbindungsstrasse angebaut -50/1	50	Local/Collector
Verbindungsstrasse angebaut -50/2	50	Local/Collector
Verbindungsstrasse angebaut -50/3	50	Local/Collector
lokale Verbindungsstrasse anbaufrei 55-80/1	80	Local/Collector
lokale Verbindungsstrasse anbaufrei 55-80/2	80	Local/Collector
lokale Verbindungsstrasse angebaut -50/1	50	Local/Collector
lokale Verbindungsstrasse angebaut -50/2	50	Local/Collector
Sammelstrasse anbaufrei 55-80 /1	80	Local/Collector
Sammelstrasse angebaut -50/1	50	Local/Collector
Erschliessungstrasse anbaufrei 55-80/1	80	Access-residential
Erschliessungstrasse angebaut -50/1	50	Access-residential
Erschliessungstrasse angebaut -50/2	50	Access-residential
Erschliessungstrasse angebaut -50/3	50	Access-residential
Zufahrtstrassen geöffnet	30	Access-residential

Grafik INFRAS. Quelle: GVM Kt. Luzern, eigene Auswertungen

**Tabelle 29: Splitfaktoren für die Herleitung der HBEFA aus den GVM-Fahrzeugkategorien**

FzKat GVM	FzKat HBEFA	Strassenkategorie	Anteil HBEFA- an GVM-FzKat
Personenwagen (PW)	Personenwagen	Autobahn	97.4%
		Ausserorts	95.9%
		Innerorts	96.5%
	Motorrad	Autobahn	2.6%
		Ausserorts	4.1%
		Innerorts	3.5%
Lieferwagen (LI)	Lieferwagen	Autobahn	100.0%
		Ausserorts	100.0%
		Innerorts	100.0%
Lastwagen (LW) + Last- und Sattelzug (LZ)	Schweres Nutzfahrzeug	Autobahn	94.4%
		Ausserorts	93.8%
		Innerorts	92.6%
	Reisebus	Autobahn	5.6%
		Ausserorts	6.2%
		Innerorts	7.4%

**Tabelle 30: Fixe LOS-Anteile am DTV auf dem untergeordneten Strassennetz**

Gebietstyp	Strassentyp	Level of Service	Anteil am DTV
Ländlich	Verbindungs- und Sammelstrassen	Freeflow	38.5%
		Heavy	36.3%
		Saturated	19.8%
		Stop+Go	3.6%
		Heavy Stop+Go	1.8%
	Erschliessungs- und Zufahrtsstrassen	Freeflow	31.3%
		Heavy	34.4%
		Saturated	34.4%
		Stop+Go	12.5%
		Heavy Stop+Go	6.3%
Städtisch/Agglo	Verbindungs- und Sammelstrassen	Freeflow	18.0%
		Heavy	26.7%
		Saturated	36.6%
		Stop+Go	12.5%
		Heavy Stop+Go	6.3%
	Erschliessungs- und Zufahrtsstrassen	Freeflow	31.3%
		Heavy	34.4%
		Saturated	34.4%
		Stop+Go	12.5%
		Heavy Stop+Go	6.3%

**Tabelle 31: NFR-Codes der verschiedenen Emissionsquellen.**

Emissionsquelle	NFR-Code
Strasse, warme und Kaltstart-Emissionen, PW	1 A 3 b i
Strasse, warme und Kaltstart-Emissionen, Lieferwagen	1 A 3 b ii
Strasse, warme und Kaltstart-Emissionen, schwere Nutzfahrzeuge (SGF, Busse, Reise cars)	1 A 3 b iii
Strasse, warme und Kaltstart-Emissionen, Motorräder	1 A 3 b iv
Strasse, Verdampfungsemissionen	1 A 3 b v
Schifffahrt	1 A 3 d ii
Schiene (inkl. unter Non-Road geführte Diesel-Unterhaltsfahrzeuge)	1 A 3 c
Non-Road, Baumaschinen + Industrie	1 A 2 g vii
Non-Road, Land- und Forstwirtschaft	1 A 4 c ii
Non-Road, Gartenpflege/Hobby	1 A 4 b ii
Non-Road, Militär	1 A 5 b
Stationäre Anlagen, "public heat and power generation"	1 A 1 a
Stationäre Anlagen, "commercial/institutional stationary combustion"	1 A 4 a i
Stationäre Anlagen, "residential stationary combustion"	1 A 4 b i
Stationäre Anlagen, "agriculture/forestry/fishing stationary combustion"	1 A 4 c i

## A2. Emissionsresultate

### A2.1. Strasse

Tabelle 32: Emissionen [t/a] aller verfügbaren Schadstoffe, Energieverbrauch [TJ/a] und Treibstoffverbrauch [t/a] des Strassenverkehrs im Kanton Luzern, 2022

FzKat	Energiever- brauch	Treibstoff- verbrauch	CO2 (fossil)	CO2 (total)	CH4	N2O	CO2e	NOx	PM10 ex- haust	PM10 non- exhaust	HC
PW	6 664.9	156 225	471 444	491 559	25.18	11.60	475 223	743.21	5.18	85.23	251.76
Lieferwagen	742.6	17 303	52 005	54 507	1.96	1.94	52 574	172.24	2.48	7.18	9.37
Reisebus	142.9	3 340	10 042	10 528	0.01	0.46	10 164	27.14	0.36	3.50	0.55
Linienbus	285.4	5 556	16 593	17 452	0.14	0.60	16 756	41.19	0.27	10.00	0.60
Motorrad	148.8	3 528	10 725	11 092	9.00	0.19	11 027	9.71	2.75	1.06	63.54
SGF	2 051.7	47 863	143 629	150 711	0.29	7.62	145 656	206.35	2.65	39.65	6.38
<b>TOTAL</b>	<b>10 036.4</b>	<b>233 816</b>	<b>704 436</b>	<b>735 849</b>	<b>36.59</b>	<b>22.41</b>	<b>711 399</b>	<b>1 199.84</b>	<b>13.69</b>	<b>146.61</b>	<b>332.20</b>

FzKat	NMHC	CO	NH <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	Benzol	PM2.5 ex- haust	PM2.5 non- exhaust	BC exhaust	BC non-ex- haust
PW	226.6	2 171.39	38.54	149.44	1.73	11.61	5.18	33.36	1.83	3.34
Lieferwagen	7.4	151.88	1.49	40.13	0.22	0.43	2.48	3.81	1.35	0.38
Reisebus	0.5	14.75	0.16	3.48	0.04	0.01	0.36	0.80	0.20	0.08
Linienbus	0.5	8.92	0.24	8.09	0.07	0.01	0.27	1.87	0.06	0.12
Motorrad	54.5	231.34	0.19	0.49	0.03	3.50	2.75	0.58	0.56	0.07
SGF	6.1	86.96	2.12	35.87	0.63	0.12	2.65	9.58	0.99	0.96
<b>TOTAL</b>	<b>295.6</b>	<b>2 665.23</b>	<b>42.75</b>	<b>237.50</b>	<b>2.73</b>	<b>15.68</b>	<b>13.69</b>	<b>49.98</b>	<b>4.99</b>	<b>4.95</b>

## A2.2. Schiene

**Tabelle 33: Emissionen [t/a] aller verfügbaren Schadstoffe und Energieverbrauch [TJ/a] des Schienenverkehrs im Kanton Luzern, 2022.**

<b>Zugstyp</b>	<b>Energieverbrauch</b>	<b>PM10 non-exhaust</b>
Güterverkehr	21.54	0.0049
Personenverkehr	432.29	0.0432
<b>TOTAL</b>	<b>453.83</b>	<b>0.0481</b>

**Beachte:** Hier ist nur der elektrifizierte Schienenverkehr dargestellt. Dieselbetriebene Schienenunterhaltsfahrzeuge werden zu den Non-Road-Maschinen gezählt, ihre Emissionen sind in Tabelle 34 aufgelistet.

## A2.3. Non-Road

Tabelle 34: Emissionen [t/a] aller verfügbaren Schadstoffe, Energieverbrauch [TJ/a] und Treibstoffverbrauch [t/a] des Non-Road-Verkehrs im Kanton Luzern, 2022

Maschinengattung	Energiever- brauch	Treibstoff- verbrauch	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub> e	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub> ex- haust	PM <sub>2.5</sub> ex- haust	HC
Baumaschinen	310.70	7'261.60	22'873.58	0.38	1.03	23'157	57.44	1.32	1.32	10.25
Industrie	95.49	1'969.24	6'179.99	0.07	0.25	6'247	17.23	0.47	0.47	2.46
Landwirtschaft	173.61	4'060.67	12'788.21	1.10	0.48	12'947	57.16	4.43	4.43	25.06
Forstwirtschaft	21.99	514.20	1'619.06	0.70	0.06	1'655	3.63	0.11	0.11	10.14
Garten- pflege/Hobby	17.83	386.62	1'214.27	1.06	0.02	1'250	2.56	0.00	0.00	19.13
Schiene	47.04	1'099.25	3'462.72	0.06	0.17	3'509	41.73	0.28	0.28	4.94
Militär	3.39	79.32	249.81	0.01	0.01	253	0.89	0.02	0.02	0.23
<b>TOTAL</b>	<b>670.06</b>	<b>15'370.90</b>	<b>48'387.66</b>	<b>3.37</b>	<b>2.02</b>	<b>49'018</b>	<b>180.65</b>	<b>6.63</b>	<b>6.63</b>	<b>72.21</b>

Maschinengattung	NMHC	CO	NH <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	Benzol	BC exhaust
Baumaschinen	9.87	147.35	0.05	12.71	0.10	0.04	0.70
Industrie	2.39	49.75	0.01	1.90	0.02	0.01	0.28
Landwirtschaft	23.95	387.77	0.03	5.83	0.05	0.16	2.92
Forstwirtschaft	9.45	94.09	0.00	0.37	0.01	0.08	0.08
Garten- pflege/Hobby	18.07	427.21	0.00	0.13	0.00	0.15	0.00
Schiene	4.88	23.84	0.01	5.91	0.02	0.01	0.08
Militär	0.22	5.43	0.00	0.12	0.00	0.00	0.01
<b>TOTAL</b>	<b>68.84</b>	<b>1'135.44</b>	<b>0.11</b>	<b>26.98</b>	<b>0.21</b>	<b>0.45</b>	<b>4.06</b>

## A2.4. Schifffahrt

Tabelle 35: Emissionen [t/a] aller verfügbaren Schadstoffe, Energieverbrauch [TJ/a] und Treibstoffverbrauch [t/a] des Schiffsverkehrs im Kanton Luzern, 2022

Schiffstyp	Energiever- brauch	Treibstoff- verbrauch	CO2 (fossil)	CO2 (total)	CH4	N2O	CO2e	NOx	PM10 ex- haust
Fahrgastschiffe	60.8	1420.0	4378.4	4473.2	0.050	0.134	4415.5	25.4	0.819
Andere	40.3	948.2	2891.5	2981.9	0.522	0.102	2933.0	24.0	0.470
<b>TOTAL</b>	<b>101.1</b>	<b>2368.2</b>	<b>7269.9</b>	<b>7455.1</b>	<b>0.6</b>	<b>0.2</b>	<b>7348.5</b>	<b>49.3</b>	<b>1.3</b>

Schiffstyp	HC	NMHC	CO	NH <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	Benzol	PM2.5 ex- haust	BC exhaust
Fahrgastschiffe	7.498	7.4	16.4	0.006	3.375	0.148	0.012	0.819	0.392
Andere	12.984	12.5	203.3	0.005	2.007	0.012	0.083	0.470	0.270
<b>TOTAL</b>	<b>20.5</b>	<b>19.9</b>	<b>219.7</b>	<b>0.0</b>	<b>5.4</b>	<b>0.2</b>	<b>0.1</b>	<b>1.3</b>	<b>0.7</b>

## A2.5. Stationäre Motoren und Gasturbinen

**Tabelle 36: Emissionen [t/a] aller verfügbaren Schadstoffe sowie Energieverbrauch [TJ/a] stationärer Motoren und Gasturbinen im Kanton Luzern, 2022**

Quellkategorie	Energiever- brauch	CO2 (fossil)	CH4	N2O	CO2e	NOx	PM10 ex- haust	HC
Stationäre Motoren und Gasturbinen	1'041.33	39'780	5.31	0.79	40'137	83.04	1.63	44.01
Quellkategorie	NMHC	CO	NH3	NO2	SO2	Benzol	BC exhaust	
Stationäre Motoren und Gasturbinen	40.67	58.99	1.33	18.79	1.85	0.0021	0.074	

## Glossar

<b>BC</b>	Black Carbon
<b>C<sub>6</sub>H<sub>6</sub></b>	Benzol
<b>CH<sub>4</sub></b>	Methan
<b>CO</b>	Kohlenmonoxid
<b>CO<sub>2</sub></b>	Kohlendioxid
<b>DTV</b>	Durchschnittlicher Täglicher Verkehr
<b>GVM</b>	Gesamtverkehrsmodell
<b>HBEFA</b>	Handbuch Emissionsfaktoren für den Strassenverkehr
<b>HC</b>	Kohlenwasserstoffe
<b>HEL</b>	Heizöl Extraleicht
<b>LBUS</b>	Linienbus (ÖV-Bus)
<b>LNF</b>	Leichte Nutzfahrzeuge (<3.5 t); Lieferwagen, Kleinbusse, Wohnmobile, etc.
<b>LOS</b>	Levels of Service
<b>MR</b>	Motorräder
<b>NH<sub>3</sub></b>	Ammoniak
<b>NMHC</b>	Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe
<b>N<sub>2</sub>O</b>	Lachgas
<b>NO<sub>x</sub></b>	Stickoxide
<b>NO<sub>2</sub></b>	Stickstoffdioxid
<b>PW</b>	Personenkraftwagen
<b>PM<sub>2.5</sub></b>	Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner als 2.5 Mikrometer
<b>PM<sub>10</sub></b>	Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner als 10 Mikrometer
<b>RBUS</b>	Reisebus (Car)
<b>SGV</b>	Schiffahrtsgesellschaft des Vierwaldstättersees
<b>SGF</b>	Schwere Güterfahrzeuge (Lastwagen, Sattelschlepper, etc.)
<b>SNG</b>	St. Niklausen Schiffgesellschaft Genossenschaft
<b>SO<sub>2</sub></b>	Schwefeldioxid
<b>VVL</b>	Verkehrsverbund Luzern

## Literatur

**ARE 2022:** Schweizerische Verkehrsperspektiven 2050. Schlussbericht. Bundesamt für Raumentwicklung (ARE). [<https://www.are.admin.ch/dam/are/de/dokumente/verkehr/publikationen/verkehrsperspektiven-schlussbericht.pdf.download.pdf/verkehrsperspektiven-schlussbericht.pdf>].

**ASTRA 2023:** Schweizerische automatische Strassenverkehrszählung (SASVZ). Bundesamt für Strassen (ASTRA), Bern.

**BAFU 2010a:** Kupfer. Verbrauch, Umwelteinträge und Vorkommen. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Ittigen. [<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/chemikalien/publikationen-studien/publikationen/kupfer.html>].

**BAFU 2010b:** Luftschadstoff-Emissionen des Strassenverkehrs 1990-2035. Aktualisierung 2010. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern. [<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/publikationen-studien/publikationen/luftschadstoff-emissionen-des-strassenverkehrs-1990-2035.html>].

**BAFU 2015:** Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des Non-Road-Sektors. Studie für die Jahre 1980-2050. Umwelt-Wissen Nr. 1519. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern. [<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/publikationen-studien/publikationen/energieverbrauch-und-schadstoffemissionen-des-non-road-sektors.html>].

**BAFU 2019:** Lärmbelastungskataster für Eisenbahnanlagen. [<https://www.bav.admin.ch/bav/de/home/verkehrsmittel/eisenbahn/bahninfrastruktur/ausbauprogramme/weitere-ausbauprogramme/laermsanierung/laermbelastungskataster/emissionen.html>].

**BAFU 2023:** Klimawirkung von Treibhausgasen und weiteren Substanzen. Faktenblatt April 2023. Bundesamt für Umwelt (BAFU). [[https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/klima/fachinfo-daten/Faktenblatt\\_Klimawirkung.pdf.download.pdf/Faktenblatt\\_Klimawirkung%20von%20Treibhausgasen%20und%20weiteren%20Substanzen\\_2023-04\\_DE.pdf](https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/klima/fachinfo-daten/Faktenblatt_Klimawirkung.pdf.download.pdf/Faktenblatt_Klimawirkung%20von%20Treibhausgasen%20und%20weiteren%20Substanzen_2023-04_DE.pdf)].

**BFE 2022:** Ex-Post-Analyse des Energieverbrauchs der schweizerischen Haushalte 2000 bis 2021 nach Verwendungszwecken und Ursachen der Veränderungen. Bundesamt für Energie (BFE), Ittigen. [<https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/statistik-und-geodaten/energiestatistiken/energieverbrauch-nach-verwendungszweck.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wdWJKYi5iZmUuYWRTaW4uY2gvZGVvchVibGljYX/Rpb24vZG93bmxvYWQvMTEwNDQ=.html>].

**BFS 2019:** Arealstatistik Schweiz. Erhebung der Bodennutzung und der Bodenbedeckung (Ausgabe 2019 / 2020). Bundesamt für Statistik (BFS). [<https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/raum-umwelt/erhebungen/area/geschichte/area-2013-18.assetdetail.9406112.html>].

**BFS 2021:** Regionalporträts 2021: Kennzahlen aller Gemeinden. Bundesamt für Statistik (BFS). [<https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/regionalstatistik/regionale-portraets-kennzahlen/gemeinden.assetdetail.15864450.html>].

**BFS 2022:** Verkehrsverhalten der Bevölkerung. Ergebnisse des Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2021. Bundesamt für Statistik (BFS), Neuchâtel. [<https://dam-api.bfs.admin.ch/hub/api/dam/assets/24165261/master>].

**BFS 2023:** Öffentlicher Verkehr (inkl. Schienengüterverkehr) - Übersicht. [<https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/mobilitaet-verkehr/gueterverkehr/schiene.assetdetail.28425333.html>].

**Hausberger, S., Rexeis, M. 2018:** PHEM. Passenger car and Heavy duty Emission Model. Institute for internal combustion engines and thermodynamics, Technical University of Graz, Graz, Austria. [[https://www.ivt.tugraz.at/assets/files/download/PHEM\\_en.pdf](https://www.ivt.tugraz.at/assets/files/download/PHEM_en.pdf)].

**INFRAS 2006:** Verkehrsemissionen Stadt Luzern 2005/2010. Schlussbericht. Stadt Luzern, Umweltschutz.

**INFRAS 2007:** PM10-Emissionen Verkehr. Teil Schienenverkehr.

**INFRAS 2013:** Verkehrsemissionen Stadt Luzern 2010/2015/2020. Schlussbericht. Stadt Luzern, Umweltschutz.

**INFRAS 2020:** Verkehrsemissionen Stadt Luzern 2020/2025/2030. Schlussbericht. Stadt Luzern, Umweltschutz.

**INFRAS 2022:** Emissionsinventar stationäre Motoren und Gasturbinen. Basisjahr 2019 und Zeitreihe 1990-2060. Bundesamt für Umwelt (BAFU). [[https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/luft/fachinfo-daten/Emissionsinventar-stationaere-motoren.pdf.download.pdf/Emissionsinventar\\_Station%C3%A4re\\_Motoren\\_und\\_Gasturbinen\\_-\\_Zusammenfassung.pdf](https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/luft/fachinfo-daten/Emissionsinventar-stationaere-motoren.pdf.download.pdf/Emissionsinventar_Station%C3%A4re_Motoren_und_Gasturbinen_-_Zusammenfassung.pdf)].

**INFRAS, TUG, ifeu, HSDAC, WSP 2022:** HBEFA. Handbook of emission factors for road transport 4.2. INFRAS, Technical University of Graz (TUG), Institute for Energy and Environment Heidelberg (ifeu), Heinz Steven Data Analysis and Consulting (HSDAC) and WSP Sweden, commissioned by the Swiss Federal Office for the Environment (BAFU), the German Federal Office for the Environment (UBA-DE), the Austrian Federal Office for the Environment (UBA-AT), the French Agency for Ecological Transition (ADEME), the Swedish Transport Administration (Trafikverket) and the Norwegian Environment Agency (Miljødirektoratet), Bern. [<https://www.hbefa.net>].

**Kanton Luzern 2016:** Abschätzung der verkehrlichen Emissionen mittels KVM LU und HBEFA Version 3.2 unter Berücksichtigung leichter Nutzfahrzeuge. Umwelt und Energie (UWE) Kanton Luzern. [[https://uwe.lu.ch/-/media/UWE/Dokumente/publikationen/publikationen\\_01\\_A\\_bis\\_F/Abschaetzung\\_verkehrliche\\_Emissionen.pdf](https://uwe.lu.ch/-/media/UWE/Dokumente/publikationen/publikationen_01_A_bis_F/Abschaetzung_verkehrliche_Emissionen.pdf)].

**Kanton Luzern 2021:** Klima- und Energiepolitik 2021 des Kantons Luzern. Kanton Luzern. [[https://newsletter.lu.ch/files/SK/Mitteilungen%202021/10\\_Okt/20211018\\_B87.pdf](https://newsletter.lu.ch/files/SK/Mitteilungen%202021/10_Okt/20211018_B87.pdf)].

**Kanton Luzern 2023:** Massnahmen- und Umsetzungsplanung Klima und Energie 2022–2026. Bau-, Umwelt und Wirtschaftsdepartement des Kantons Luzern (BUWD). [[https://klima.lu.ch/-/media/Klima/Dokumente/Umsetzung\\_und\\_Massnahmenplanung\\_Klima\\_und\\_Energie\\_2022\\_2026.pdf](https://klima.lu.ch/-/media/Klima/Dokumente/Umsetzung_und_Massnahmenplanung_Klima_und_Energie_2022_2026.pdf)].

**Kanton Luzern, TransSol, Strittmatter Partner AG, plan:team 2020:** Gesamtverkehrsmodell Kanton Luzern (GVM-LU). Ist-Zustand 2017 und Prognose 2040. Verkehr und Infrastruktur (vif) Kanton Luzern. [[https://vif.lu.ch/-/media/VIF/Dokumente/mobilitaet/strategische\\_planung/gesamtverkehrsmodell/gesamtverkehrsmodell\\_kanton\\_luzern.pdf](https://vif.lu.ch/-/media/VIF/Dokumente/mobilitaet/strategische_planung/gesamtverkehrsmodell/gesamtverkehrsmodell_kanton_luzern.pdf)].

**Kaufmann, U. 2023:** Thermische Stromproduktion inklusive Wärmekraftkopplung (WKK) in der Schweiz (Ausgabe 2022). Bundesamt für Energie (BFE), Bern. [<https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/10186>].

**Notter, B., Cox, B., Graf, C., Tapia-Dean, V. [im Druck]:** Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs in der Schweiz 1990–2060. Schlussbericht. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Ittigen.

**Notter, B., Cox, B., Hausberger, S., Matzer, C., Weller, K., Dippold, M., Politschnig, N., Lipp, S., Knörr, W., Allekotte, M., André, M., Gagnepain, M., Hult, C., Jerksjö, M. 2022:** HBEFA 4.2. Documentation of updates. Bundesamt für Umwelt BAFU (CH), Umweltbundesamt UBA (DE), Umweltbundesamt UBA (AT), Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie ADEME (FR), Trafikverket (SE), Miljødirektoratet (NO). [[https://www.hbefa.net/e/documents/HBEFA42\\_Update\\_Documentation.pdf](https://www.hbefa.net/e/documents/HBEFA42_Update_Documentation.pdf)].

**Notter, B., Keller, M., Cox, B. 2022:** HBEFA. Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs 4.2. Kurzanleitung. INFRAS, Bern. [[https://hbefa.net/d/help/HBEFA42\\_help\\_dt.pdf](https://hbefa.net/d/help/HBEFA42_help_dt.pdf)].

**OpenTransportData 2022:** OpenTransportData Timetable 2022 (status 2022-07-04). [<https://opentransportdata.swiss/en/dataset/timetable-2022-gtfs2020>].

**Prognos, INFRAS, TEP, Ecoplan 2021:** Energieperspektiven der Schweiz 2050+. Bundesamt für Energie (BFE). [<https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energieperspektiven-2050-plus.html>].

**Prognos, TEP Energy, INFRAS 2022:** Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000–2021 nach Verwendungszwecken. BFE. [[https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/11144#:~:text=Der%20inl%C3%A4ndische%20Gesamtverbrauch%20wurde%20im,Antriebe%20und%20Prozesse%20\(9.0%20%25\).](https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/11144#:~:text=Der%20inl%C3%A4ndische%20Gesamtverbrauch%20wurde%20im,Antriebe%20und%20Prozesse%20(9.0%20%25).)].

**PwC 2014:** Studie zum Carverkehr in der Luzerner Innenstadt. Luzern Tourismus.

**SGV 2022:** Statistikdaten 2022. Schifffahrtsgesellschaft Vierwaldstättersee AG. [[https://www.lakelucerne.ch/fileadmin/user\\_upload/Statistikdaten\\_2022\\_SGV\\_AG.pdf](https://www.lakelucerne.ch/fileadmin/user_upload/Statistikdaten_2022_SGV_AG.pdf)].

**Stadt Luzern 2023:** Stadtpassage als künftiges Carregime: Prüfung Projektidee. Technischer Bericht. Tiefbauamt Stadt Luzern.

**swisstopo 2020:** Produktinformation swissNAMES3D. Bundesamt für Landestopographie (swisstopo), Wabern. [[https://www.swisstopo.admin.ch/content/swisstopo-internet/de/geodata/landscape/names3d/\\_jcr\\_content/contentPar/tabs\\_copy/items/dokumente/tabPar/downloadlist/downloadItems/271\\_1589956328896.download/20200520\\_swissNAMES3D\\_ProdInfo\\_de\\_bf.pdf](https://www.swisstopo.admin.ch/content/swisstopo-internet/de/geodata/landscape/names3d/_jcr_content/contentPar/tabs_copy/items/dokumente/tabPar/downloadlist/downloadItems/271_1589956328896.download/20200520_swissNAMES3D_ProdInfo_de_bf.pdf)].

**swisstopo 2023a:** swissTLMRegio. Das kleinmasstäbliche digitale Landschaftsmodell der Schweiz. [<https://www.swisstopo.admin.ch/de/geodata/landscape/tlmregio.html>].

**swisstopo 2023b:** swissBOUNDARIES3D. Produktinformation. swisstopo. [[https://www.swisstopo.admin.ch/content/swisstopo-internet/de/geodata/landscape/boundaries3d/\\_jcr\\_content/contentPar/tabs\\_copy/items/dokumente/tabPar/downloadlist/downloadItems/86\\_1671614911843.download/swissBOUNDARIES3D-ProdInfo-DE.pdf](https://www.swisstopo.admin.ch/content/swisstopo-internet/de/geodata/landscape/boundaries3d/_jcr_content/contentPar/tabs_copy/items/dokumente/tabPar/downloadlist/downloadItems/86_1671614911843.download/swissBOUNDARIES3D-ProdInfo-DE.pdf)].

**VSS 2001:** Norm SN 640 005a. Ganglinientypen und durchschnittlicher täglicher Verkehr (DTV), Ausgabe 2001. Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS).