



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

**Bundesamt für Energie BFE**  
Abteilung Energiewirtschaft

Oktober 2022  
Technischer Bericht

---

# **Sekundäreffekte der Energieperspektiven 2050+ im Bereich externe Kosten**

Herleitung spezifischer Kostensätze für die  
externen Kosten für die Strom- und Wär-  
meproduktion und den Verkehrsbereich

---

Im Auftrag des Bundesamtes für Energie

**Datum:** 20. Oktober 2022

**Ort:** Bern

**Auftraggeberin:**

Bundesamt für Energie BFE CH-3003 Bern  
www.bfe.admin.ch

**Auftragnehmer/in:**

Ecoplan AG

**Autoren/-innen:**

Christoph Lieb (Projektleitung und Hauptsachbearbeitung)  
André Müller  
Roman Elbel

**Begleitgruppe:**

Anne-Kathrin-Faust, Bundesamt für Energie BFE  
Giulia Lechthaler, Bundesamt für Energie BFE  
Christina Hürzeler, Bundesamt für Raumentwicklung ARE  
Roger Ramer, Bundesamt für Umwelt, BAFU

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

---

**Bundesamt für Energie BFE**

Pulverstrasse 13, CH-3063 Ittigen; Postadresse: Bundesamt für Energie BFE, CH-3003 Bern  
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · [contact@bfe.admin.ch](mailto:contact@bfe.admin.ch) · [www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>3</b>
1.1	Ziel und Fragestellungen.....	6
1.2	Aktualisierung der bisherigen Arbeiten .....	7
1.3	Überblick über die Bereiche der externen Kosten der Energie.....	9
<b>2</b>	<b>Grundlegende Methodik und berücksichtigte Kostenbereiche .....</b>	<b>10</b>
2.1	Grundlegende Methodik.....	10
2.2	Für die Sekundäreffekte berücksichtigte Kostenbereiche der externen Kosten .....	15
<b>3</b>	<b>Herleitung von Kostensätzen für die Luftbelastung durch die Strom- und Wärmeproduktion .....</b>	<b>24</b>
3.1	Vorgehen.....	24
3.2	Luftschadstoff-Emissionen .....	25
3.3	Externe Kosten pro Tonne PM <sub>10</sub> -Äquivalent .....	28
3.4	Externe Kosten Luftbelastung in der Stromerzeugung .....	36
3.5	Externe Kosten Luftbelastung in der Wärmeerzeugung .....	49
3.6	Externe Kosten Luftbelastung von Sektorkopplungstechnologien.....	58
<b>4</b>	<b>Herleitung von Kostensätzen für die Luftbelastung in der Produktion.....</b>	<b>60</b>
<b>5</b>	<b>Herleitung von Kostensätzen für die externen Kosten des Verkehrs .....</b>	<b>63</b>
5.1	Überblick .....	63
5.2	Strassenverkehr .....	67
5.3	Schienenverkehr .....	74
5.4	Luftverkehr .....	77
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung Kostensätze .....</b>	<b>80</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>86</b>



# 1 Einleitung

## Energieperspektiven 2050+

In den Energieperspektiven 2050+ wird im Szenario ZERO eine weitgehende Reduktion der energie- und prozessbedingten Treibhausgasemissionen<sup>1</sup> in der Schweiz untersucht. Der Rückgang der energie- und prozessbedingten Treibhausgasemissionen wird u.a. mit einer starken Minderung des fossilen Brenn- und Treibstoffverbrauchs erreicht, was auch zu einer Verbesserung der Luftqualität führt. Weiter werden im Verkehrsbereich die Verbrennungsmotoren durch Elektromotoren ersetzt, was eine geringer Lärmbelastung zur Folge hat.

## Die volkswirtschaftlichen Auswirkungen des Szenarios ZERO

Die volkswirtschaftlichen Auswirkungen des Szenarios ZERO im Vergleich zur Referenzentwicklung «Weiter wie bisher» (Szenario WWB) werden mit einem Gleichgewichtsmodell untersucht. In diesem Gleichgewichtsmodell werden die externen Kosten (siehe folgender Exkurs) nicht explizit erfasst, sondern nachträglich berechnet. In diesem **technischen Bericht** werden die Grundlagen zur Berechnung der Abnahme der externen Kosten bzw. der Sekundäreffekte des Szenarios KLIMA im Vergleich zum Szenario WWB erarbeitet. Konkret werden entsprechende **spezifische Kostensätze** ermittelt (Wertgerüst), welche die Grundlage sind für die Berechnung der Sekundäreffekte in Ecoplan (2022).

### Exkurs: Was sind externe Kosten?

Sowohl beim Verbrauch von Energie als auch bei der Produktion von Elektrizität und Wärme fallen Kosten an, die nicht von den Verbrauchern bzw. den Produzenten getragen werden, sondern von der Allgemeinheit, z.B. in Form von Erkrankungen aufgrund der Luftverschmutzung. Werden Kosten nicht von den Verursachern getragen (Verbraucher oder Produzenten), sondern von Dritten, spricht man von externen Kosten. Diese externen Kosten können wiederum in primäre (Treibhausgasemissionen) und sekundäre Effekte (andere Schadstoffe, Lärm usw.) unterteilt werden.

## Die Sekundäreffekte des Szenarios ZERO der Energieperspektiven 2050+

Das Szenario ZERO zielt auf eine weitgehende Reduktion der Treibhausgasemissionen aus den fossilen Brenn- und Treibstoffen, der Stromproduktion und die Erhöhung der Energieeffizienz in der Schweiz. Neben diesen hauptsächlichen Wirkungen bringt das Szenario ZERO jedoch weitere, sogenannte sekundäre Effekte (Sekundäreffekte): Im Vergleich zum Referenzszenario WWB nehmen im Szenario ZERO neben den Treibhausgasemissionen auch die externen Kosten ab, wie z.B. die Kosten der Luftbelastung. Damit diese Sekundäreffekte der Energieperspektiven 2050+ berechnet werden können, wird die Reduktion der externen Kosten in den Bereichen Stromproduktion, Wärmeerzeugung, industrielle Produktion, Strassen-, Schienen- und Luftverkehr abgeschätzt (vgl. Abbildung 1-1).

---

<sup>1</sup> Inklusive Treibhausgase von Lösungsmitteln.

Abbildung 1-1: Die Sekundäreffekte eines Szenarios ZERO



Die berücksichtigten Kosten werden alle durch die Reduktion der Treibhausgase beeinflusst. Die nicht beeinflussten externen Kosten könnten 2060 wie dargestellt höher (oder tiefer) liegen als 2015.

### In dieser Studie berücksichtigte Kostenbereiche

Abbildung 1-2 zeigt auf, welche Kostenbereiche im Folgenden untersucht werden. Dies betrifft praktisch alle Bereiche der externen Kosten im Verkehr (Unfälle, Lärm etc.).<sup>2</sup> Im Bereich der Produktion von Strom und Wärme (sowie Power to Hydrogen PtH<sub>2</sub>) konzentrieren wir uns hingegen auf die Folgeschäden der Luftbelastung, da die weiteren Kostenbereiche entweder unbedeutend oder schwer quantifizierbar sind, so dass dazu – im Gegensatz zum Verkehr – keine Datengrundlagen verfügbar sind (vgl. Kapitel 2.2).

Daneben werden im Folgenden auch die nichtenergetischen externen Kosten der Luftbelastung in der Produktion (Industrie und Landwirtschaft) grob ermittelt. Führt das Szenario ZERO zu einer Veränderung der Produktionsmengen verschiedener Sektoren, können die daraus resultierenden externen Effekte der Luftbelastung somit ebenfalls in die Berechnung der Sekundäreffekte einfließen.

<sup>2</sup> Natur und Landschaft wird nicht berücksichtigt, weil es sich dabei um Fixkosten der Infrastruktur handelt. Da sich die Verkehrsinfrastruktur in den beiden Szenarien «WWB» und ZERO nicht massgeblich ändert, ergeben sich auch keine Unterschiede im Bereich Natur und Landschaft.

Abbildung 1-2: In der vorliegenden Studie berücksichtigte Kostenbereiche

	Strom- produktion	Wärme- produktion	Sektorkopplungs- technologie (PtH2)	Produktion (Industrie, Landwirtschaft)	Strassen-, Schienen- und Luftverkehr
Gesundheit Luft	✓	✓	✓	✓	✓
Gebäude Luft	✓	✓	✓	✓	✓
Ernteausfälle Luft	✓	✓	✓	✓	✓
Waldschäden Luft	✓	✓	✓	✓	✓
Biodiversitätsverluste Luft	✓	✓	✓	✓	✓
Lärm	✗	✗	✗	✗	✓
Klima	✗ <i>(Primäreffekt)</i>	✗ <i>(Primäreffekt)</i>	✗ <i>(Primäreffekt)</i>	✗ <i>(Primäreffekt)</i>	✗ <i>(Primäreffekt)</i>
Natur und Landschaft	✗	✗	✗	✗	✗ <i>(Fixkosten)</i>
Bodenschäden	✗	✗	✗	✗	✓
Vor- und nachgelagerte Prozesse					
- Klima	✗ <i>(Primäreffekt)</i>	✗ <i>(Primäreffekt)</i>	✗ <i>(Primäreffekt)</i>	✗ <i>(Primäreffekt)</i>	✗ <i>(Primäreffekt)</i>
- Luftbelastung	✓	✓	✓	✗	✗ <i>(vernachlässigbar)</i>
Unfälle	✗	✗	✗	✗	✓
Städtische Räume	✗	✗	✗	✗	✓
Staukosten	✗	✗	✗	✗	✓ <i>(nur Strasse)</i>
<b>Berücksichtigung der Effekte im</b>					
- Betrieb in der Schweiz	✓	✓	✓	✓	✓
- Nicht-Betrieb in der Schweiz	✓	✓	✓	✗	✗
- Betrieb im Ausland	✓	✓	✓	✗	✗
- Nicht-Betrieb im Ausland	✓	✓	✓	✗	✗
Hauptquelle Emissionsfaktoren	Ecoinvent- Datenbank (UVEK 2019)	Ecoinvent- Datenbank (UVEK 2019)	Ecoinvent- Datenbank (UVEK 2019)	Emissionen von BAFU	HBEFA 4.1
Hauptquelle Kostensätze	Infras, Ecoplan (2019)	Infras, Ecoplan (2019)	Infras, Ecoplan (2019)	Infras, Ecoplan (2019)	Infras, Ecoplan (2019)

✓ = berücksichtigt als Sekundärnutzen, ✗ = nicht berücksichtigt als Sekundärnutzen

Wie die Datenquellen zeigen geht es im vorliegenden Projekt um das Zusammentragen und gezieltes Auswerten bestehender Daten, nicht um die Neuerhebung originärer Daten.

Anmerkung: Der vorliegende Bericht beschränkt sich auf die Sekundäreffekte der Energieerzeugung bzw. des Energieverbrauchs. Die Abschätzung zu den Primärnutzen eines eingedämmten Klimawandels ist nicht Teil der Energieperspektiven 2050+.

Klimakosten (auch durch vor- und nachgelagerte Prozesse) sind primäre Effekte, die hier nicht einbezogen werden. Die vor- und nachgelagerten Effekte durch die Luftbelastung werden bei der Strom- und Wärmeproduktion (sowie PtH<sub>2</sub>) miteinbezogen (da die ecoinvent-Datenbank dies einfach erlaubt). Bei der Produktion in Industrie und Landwirtschaft erlaubt dies die Datengrundlage jedoch nicht. Im Verkehr sind diese Effekte so gering, dass sie vernachlässigt

werden können (vgl. Kapitel 2.2). Entsprechend der Berücksichtigung der vor- und nachgelagerten Effekte können die Nicht-Betriebsemissionen (vor- und nachgelagerten Prozesse bei Herstellung, Unterhalt und Entsorgung von strom- und wärmeerzeugenden Technologien oder Fahrzeugen) nur bei der Strom- und Wärmeerzeugung (und PtH<sub>2</sub>) berücksichtigt werden. Auch die Emissionen im Ausland können nur in diesen Bereichen miteinbezogen werden. In den Energieperspektiven 2050+ wird als Systemgrenze die Schweiz verwendet. Deshalb werden bei den volkswirtschaftlichen Auswirkungen auch nur die Effekte in der Schweiz miteinbezogen. Ergänzend werden hier jedoch auch die Effekte im Ausland ausgewiesen.

### Prognose zur Entwicklung der externen Kostensätze

Für die Abschätzung der Sekundäreffekte einer ambitionierten Reduktion der Treibhausgasemissionen sind grobe Einschätzungen notwendig, wie sich die externen Kosten bzw. die Kostensätze und die Emissionsfaktoren pro Leistungseinheit in Zukunft verändern werden. Für die Abschätzung der Entwicklung der externen Kosten gehen wir von einfachen Prognoseannahmen aus und berechnen dann die Sekundäreffekte einer ambitionierten Reduktion der Treibhausgasemissionen einer ambitionierten Klima- und Energiepolitik als Differenz der externen Kosten in der Schweiz zwischen den Szenarien WWB und ZERO (vgl. dazu Abbildung 1-1).

## 1.1 Ziel und Fragestellungen

Das **Ziel** des vorliegenden Anhangs ist die Bereitstellung von möglichst aktuellen Daten zu den externen Kosten im Energiebereich in der Schweiz, um die Sekundäreffekte verschiedener Szenarien im Rahmen der Energieperspektiven 2050+ in ihrer Höhe abzuschätzen. Folgende **Fragestellungen** stehen im Vordergrund:

- Wie hoch sind die (für die Sekundäreffekte der Energieperspektiven relevanten) externen Kosten in der Schweiz im Verkehr bzw. in der Strom- und Wärmeproduktion für ein aktuelles Jahr (2015)?
- Welche *spezifischen* externen Kosten – also externe Kosten pro Fahrzeugkilometer oder pro kWh erzeugtem Strom – ergeben sich im Bereich Luftbelastung für die einzelnen Wärme- und Stromerzeugungstechnologien und den Verkehr in der Schweiz (bzw. im Ausland)?
- Wie hoch sind die nichtenergetischen externen Kosten im Bereich Luftbelastung in der Produktion?
- Wie dürften sich die Kostensätze für die Sekundäreffekte bis 2060 entwickeln?

Die Resultate der Berechnungen werden in Ecoplan (2022) präsentiert. In Ecoplan (2022) werden aus den in der vorliegenden Studie hergeleiteten spezifischen externen Kosten die externen Kosten im Szenario ZERO (bzw. KLIMA) im Vergleich zum Referenzszenario berechnet, d.h. es wird gezeigt, wie hoch der Sekundärnutzen bei der Erreichung des Netto-Null-Ziels ist?

## 1.2 Aktualisierung der bisherigen Arbeiten

Die vorliegende Aktualisierung baut auf den Arbeiten für die Energiestrategie 2050 auf.<sup>3</sup> Dabei werden vorhandene, aktuelle Grundlagen verwendet, insbesondere die Arbeiten des Bundesamts für Raumentwicklung (ARE) zu den externen Kosten des Verkehrs<sup>4</sup> sowie verfügbare Daten des Bundesamts für Umwelt (BAFU) und der ecoinvent-Datenbank. Neue originäre Erhebungen werden nicht durchgeführt. Die externen Kosten der Strom- und Wärmeproduktion sowie der nichtenergetischen Produktion werden aus verschiedenen Quellen im vorliegenden Bericht neu berechnet. Dabei wird auf Konsistenz mit den Berechnungen zu den externen Kosten im Verkehr geachtet. Die Ergebnisse für die externen Effekte des Verkehrs werden aus den Studien für das ARE übernommen. Gegenüber den bisherigen Arbeiten für die Energiestrategie 2050 werden insbesondere folgende Anpassungen vorgenommen:

- Neu werden die **Biodiversitätsverluste** durch Luftverschmutzung miteinbezogen.
- Die Zahl der untersuchten **Technologien bei der Wärmeerzeugung** wurde **deutlich erhöht**. Bisher wurden nur Heizöl und Erdgas untersucht. Neu werden auch Wärmepumpen (Luft / Wasser und Sole / Wasser), Holz, Fernwärme, Geothermie, Solarthermie und Biogas miteinbezogen. Zudem werden neu auch die **vor- und nachgelagerten Effekte** aller Wärmeerzeugungstechnologien miteinbezogen, d.h. die **Emissionen im Nicht-Betrieb und im Ausland**. Für die Hauptarbeiten zu den volkswirtschaftlichen Auswirkungen der Energieperspektiven gilt jedoch die Schweiz als Systemgrenze. Somit wird auch der Anteil der Kosten in der Schweiz bestimmt. Ergänzend werden aber auch die Kosten im Ausland ermittelt.
- Ergänzend zu den bisherigen Arbeiten in Ecoplan (2012) wird neu auch eine **Prognose** der Entwicklung der spezifischen Kostensätze **bis 2060** erstellt. Die Prognose des Mengengerüsts (Entwicklung verschiedener Produktionstechnologien für Strom und Wärme) wird im Rahmen der übrigen Arbeiten zu den Energieperspektiven entwickelt, es geht hier also insbesondere um die Prognose der entsprechenden Kostensätze und Emissionsfaktoren pro Leistungseinheit (z.B. pro kWh). Dabei muss aufgrund des Projektumfangs ein einfaches pragmatisches Vorgehen gewählt werden. Dabei sollen vorhandene Prognosen verwendet werden und dort, wo keine Prognosen vorliegen, pragmatisch – und in Absprache mit den Bundesämtern – Annahmen bezüglich der zu erwartenden Entwicklung getroffen werden. Sollten für gewisse Datengrundlagen keine verlässliche Einschätzung zur künftigen Entwicklung im Rahmen des beschränkten Budgets möglich sein, so wird von konstanten Werten ausgegangen.
- Neu wird zudem auch die Sektorkopplungstechnologie «Power to Hydrogen» (PtH<sub>2</sub>) analysiert. Auch für Kühlungsanlagen werden grobe Werte angegeben.
- Zudem werden neu Batterien für Photovoltaikanlagen untersucht.
- Neu sind im zu untersuchenden Szenario ZERO bis 2060 starke Reduktionen der Luftschadstoffemissionen aus der Strom- und Wärmeproduktion zu erwarten. Damit stellt sich

---

<sup>3</sup> Ecoplan (2012), Energiestrategie 2050 – volkswirtschaftliche Auswirkungen, Anhang C.

<sup>4</sup> Infrac, Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten und Ecoplan, Infrac (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten.

insbesondere die Frage nach den sogenannten **Schwellenwerten**, d.h. Luftschadstoffkonzentrationen, unterhalb denen keine Schäden mehr auftreten und somit eine weitere Reduktion der Luftschadstoffbelastung keinen Nutzen mehr bringt.

- **Alle Datengrundlagen werden umfassend aktualisiert.** Eine wichtige Grundlage der Berechnungen im Jahr 2012 waren die Arbeiten für das Bundesamt für Raumentwicklung (ARE) zu den externen Kosten des Verkehrs. Damals lagen die Ergebnisse für das Jahr 2009 vor. Mittlerweile wurden diese Arbeiten zweimal überarbeitet – einmal sehr umfassend für das Berichtsjahr 2010<sup>5</sup> und einmal weniger umfassend für das Berichtsjahr 2015.<sup>6</sup> Bei der letzten Anpassung wurde insbesondere der **VOSL** (value of statistical life) in etwa verdoppelt (auf 6.5 Mio. CHF),<sup>7</sup> wodurch sich auch die Gesundheitskosten der Luftbelastung in etwa verdoppeln.<sup>8</sup> Zudem wurden viele andere Datengrundlagen aufdatiert, wie z.B. die Belastungs-Wirkungs-Beziehungen, diverse Kostensätze, die Lärmschwellen, über denen Lärm berücksichtigt wird, etc. Auch die übrigen Datengrundlagen (z.B. ecoinvent-Datenbank, Emissionsinformationssystem EMIS) werden aktualisiert. Damit haben alle im Folgenden ausgewiesenen CHF-Werte den **Preisstand 2015** (auch die Prognosen bis 2060).
- Zudem werden die betrachteten **Verkehrsträger** ergänzt: Bisher wurde der **Strassen- und Schienenverkehr** berücksichtigt. Neu erlauben die Grundlagestudien des ARE, auch den Luft-, Schiffs- und Langsamverkehr (Fuss- und Veloverkehr) zu berücksichtigen. Der Schiffs- und Langsamverkehr werden jedoch in den Energieperspektiven 2050+ nicht modelliert und können damit auch hier weggelassen werden. Der **Luftverkehr** wird jedoch **neu** miteinbezogen, wird aber bei den Berechnungen in Ecoplan (2022) nicht berücksichtigt.

Der hier vorliegende Anhang ersetzt die bisherigen Arbeiten in Anhang C von Ecoplan (2012)<sup>9</sup>, d.h. der vorliegende Anhang ist so geschrieben, dass er ohne Querbezüge zu Ecoplan (2012) für sich selbst lesbar und verständlich ist. Dies bedeutet auch, dass gewisse Textpassagen, die unverändert gültig sind, aus Ecoplan (2012) übernommen werden.

In Ecoplan (2012) wurden die Resultate auch mit Ergebnissen aus dem Ausland verglichen, insbesondere mit den Ergebnissen der beiden EU-Projekte NEEDS und CASES, die in den Jahren 2008 bzw. 2009 abgeschlossen wurden.<sup>10</sup> Seither ist auf EU-Ebene im Bereich der externen Kosten der Energie wenig gelaufen.<sup>11</sup> Auf einen Vergleich mit den mittlerweile älteren

---

<sup>5</sup> Ecoplan, Infrac (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten.

<sup>6</sup> Infrac, Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten.

<sup>7</sup> Basierend auf Ecoplan (2016), Empfehlungen zur Festlegung der Zahlungsbereitschaft für die Verminderung des Unfall- und Gesundheitsrisikos (value of statistical life) – der Wert für 2015 stammt aus Infrac, Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten, S. 31-32.

<sup>8</sup> Damit wird der neue deutlich höhere Wert des VOSL verwendet, der im gesamten UVEK benutzt wird.

<sup>9</sup> Ecoplan (2012), Energiestrategie 2050 – volkswirtschaftliche Auswirkungen, Anhang C.

<sup>10</sup> NEEDS = New Energy Externalities Developments for Sustainability und CASES = Cost Assessment of Sustainable Energy Systems.

<sup>11</sup> Siehe [http://www.externe.info/externe\\_d7/?q=node/56](http://www.externe.info/externe_d7/?q=node/56) (10.7.2019). Dies bestätigten uns auch das BFE und einige angefragte Forscher.

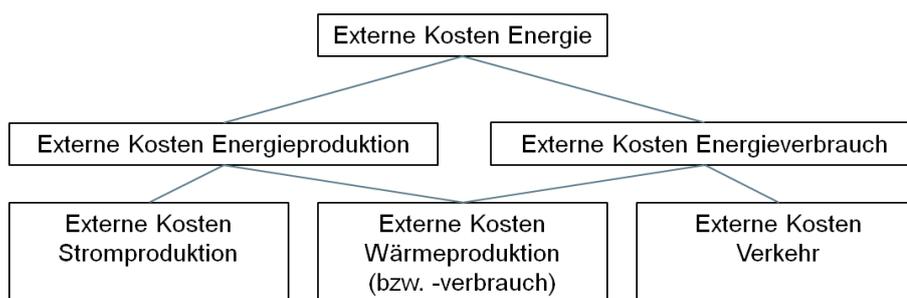
Projekten NEEDS und CASES wird verzichtet.<sup>12</sup> Stattdessen wird neu mit der deutschen Methodenkonvention 3.0<sup>13</sup> verglichen. Teilweise kann auch das aktuelle EU-Handbuch zu den externen Kosten des Verkehrs<sup>14</sup> herangezogen werden, auch wenn dieses keine Aussagen zu den externen Kosten der Strom- und Wärmeerzeugung enthält.

### 1.3 Überblick über die Bereiche der externen Kosten der Energie

#### Externe Kosten fallen bei Strom- und Wärmeproduktion sowie im Verkehr an

Externe Kosten fallen im Energiebereich einerseits bei der Energieproduktion<sup>15</sup> (Strom- und Wärmeproduktion mit unterschiedlichen Technologien inkl. Transport der Elektrizität und Fernwärme) und andererseits beim Energieverbrauch an (Verkehr, Wärmeverbrauch – vgl. folgende Abbildung). Daneben werden aber auch die nichtenergetischen externen Kosten in der Produktion (Industrie und Landwirtschaft) grob ermittelt. Ein Schwerpunkt wird bei den externen Kosten der Stromproduktion mit verschiedenen Technologien gesetzt.

Abbildung 1-3: Überblick über die Bereiche der externen Kosten der Energie



#### Struktur des technischen Berichts

Der vorliegende Anhang ist wie folgt gegliedert: In Kapitel 2 wird kurz die grundsätzliche Methodik zur Bestimmung der externen Kosten erläutert und es wird festgelegt, welche Bereiche der externen Kosten berücksichtigt werden. In Kapitel 3 werden die externen Kosten der Strom- und Wärmeproduktion sowie der Sektorkopplungstechnologie PtH<sub>2</sub> basierend auf verschiedenen Grundlagen neu berechnet und bis 2060 prognostiziert. Die nichtenergetischen externen Kosten in der Produktion (Industrie und Landwirtschaft) folgen in Kapitel 4. In Kapitel 5 werden die externen Kosten des Verkehrs dargestellt und ebenfalls bis 2060 prognostiziert. Kapitel 6 fasst die wesentlichen Ergebnisse zu den Kostensätzen zusammen.

<sup>12</sup> Interessierte an einem Vergleich mit NEEDS und CASES können sich den bisherigen Bericht anschauen (Ecoplan 2012, Energiestrategie 2050 – volkswirtschaftliche Auswirkungen, Anhang C).

<sup>13</sup> UBA (2019), Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten: Kostensätze.

<sup>14</sup> European Commission (2019), Handbook on the external costs of transport. Version 2019.

<sup>15</sup> Streng genommen kann Energie nicht produziert werden, sondern nur aus einer Form (z.B. Erdgas oder Kohle) in eine andere (z.B. Elektrizität oder Wärme) umgewandelt werden.

## 2 Grundlegende Methodik und berücksichtigte Kostenbereiche

### 2.1 Grundlegende Methodik

#### Die Verletzung des Verursacherprinzips führt zu externen Kosten

Bei der Produktion von Energie (oder beim Energieverbrauch) entstehen beträchtliche externe Kosten. Als extern wird jener Teil der Kosten bezeichnet, der nicht von den Verursachenden, sondern von Dritten getragen wird, ohne dass dies in einem Marktverhältnis erfasst wird.<sup>16</sup> Die Luftverschmutzung gilt als typisches Beispiel für externe Kosten: Die Luftverschmutzung wird durch den Energieproduzenten verursacht, belastet aber die gesamte Gesellschaft. Somit werden die Kosten der Luftverschmutzung nicht vom Energieproduzenten, sondern von der Allgemeinheit bezahlt.<sup>17</sup>

#### Externe Nutzen nicht berücksichtigt

Neben den externen Kosten gibt es auch externe Nutzen der Energieversorgung (und des motorisierten Verkehrs). Externe Nutzen könnten z.B. durch den Hochwasserschutz von Speicherseen, durch Erschliessungsstrassen von Kraftwerken und durch Speicherseen als Ausflugsziel entstehen.<sup>18</sup> Für die Bestimmung der externen Nutzen liegen kaum verlässliche Daten vor. Im Rahmen dieser Arbeiten werden die externen Nutzen daher nicht berücksichtigt.

#### Methodik zur Berechnung der externen Kosten

Für die Ermittlung der Kosten wird von einer Ursachen–Wirkungskette ausgegangen (Impact-Pathway Approach). Abbildung 2-1 stellt diesen Bottom-up-Ansatz exemplarisch anhand der Gesundheitskosten der Luftverschmutzung dar. Grundlage für die Ermittlung der Gesundheitskosten ist die Kenntnis über die aktuelle Schadstoffbelastung der Bevölkerung, die sogenannte Bevölkerungsexposition. Die Bevölkerungsexposition ergibt sich aus der Überlagerung der lokalisierten Schadstoffkonzentrationen (Immissions- oder Luftverschmutzungskataster) mit der jeweiligen Bevölkerungsdichte vor Ort (Bevölkerungskataster). Die Schadstoffkonzentrationen werden unter Beachtung verschiedener chemischer Transformations- und physischer Verfrachtungsprozesse aus den Schadstoffemissionen der einzelnen Emittenten (Verkehr, Industrie und Gewerbe, Haushalte, Landwirtschaft) gewonnen.

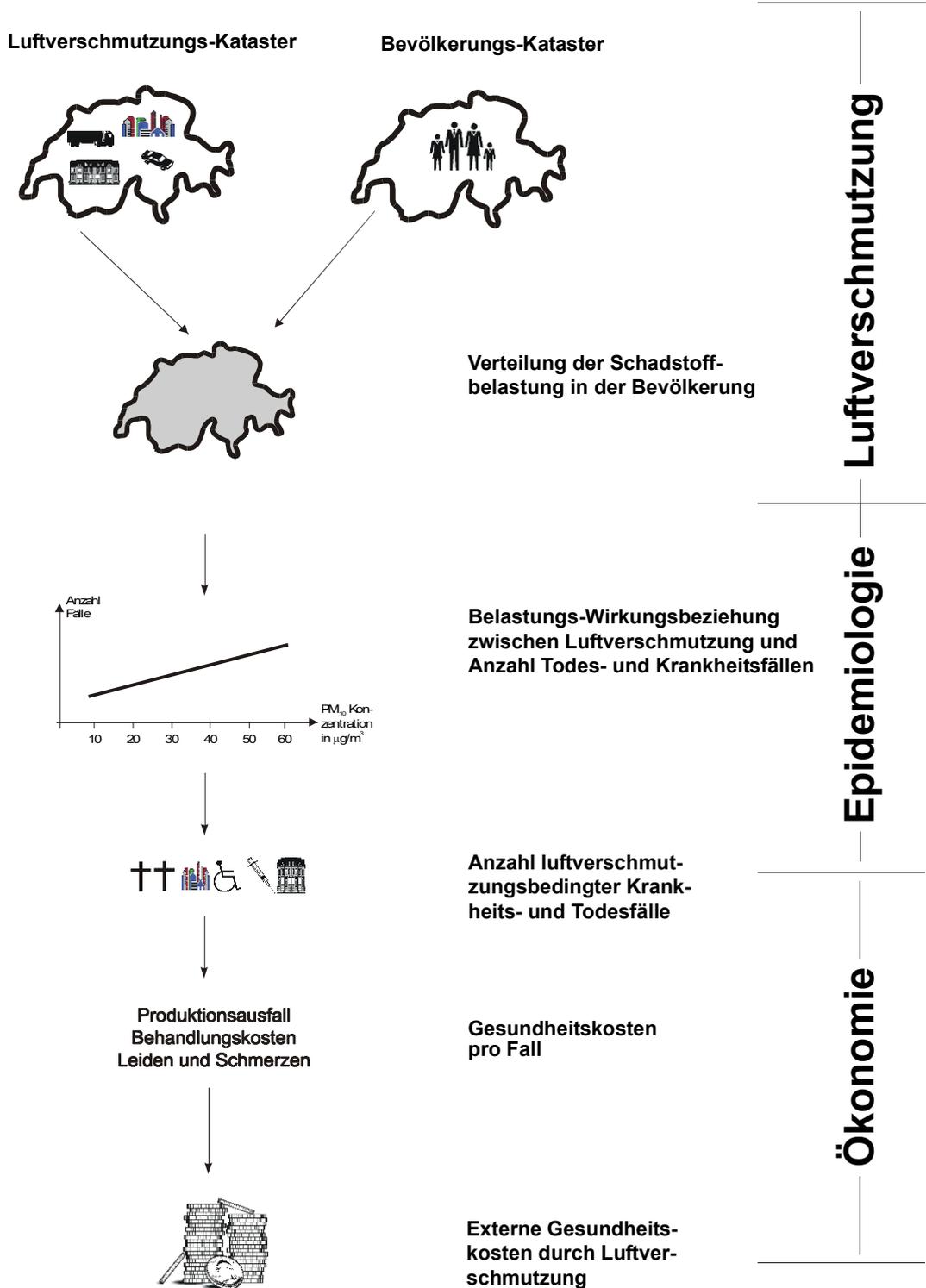
---

<sup>16</sup> Im Gegensatz zu den externen Kosten werden die internen Kosten vom Energieproduzenten selbst bezahlt (z.B. Personalkosten, Kapitalkosten etc.).

<sup>17</sup> Erst ansatzweise werden die externen Kosten der Luftverschmutzung internalisiert, wie z.B. die Lenkungsabgabe auf VOC (volatile organic compounds).

<sup>18</sup> Econcept, Infras (2005), Konsequente Umsetzung des Verursacherprinzips, S. 98. Im Verkehrsbereich gibt es zudem die Gesundheitsnutzen des Langsamverkehrs. Der Langsamverkehr wird hier aber nicht betrachtet (vgl. Kapitel 1.2).

Abbildung 2-1: Ursachen-Wirkungskette am Beispiel der Gesundheitskosten der Luftverschmutzung



Quelle: Ecoplan et al. (2004), Externe Gesundheitskosten durch verkehrsbedingte Luftverschmutzung in der Schweiz, S. 4.

Die Schadstoffbelastung bewirkt bei der betroffenen Bevölkerung eine Beeinträchtigung des Gesundheitszustandes. Diese Beeinträchtigung kann sich in zusätzlichen Krankheitsfällen äussern und / oder die Lebenserwartung der betroffenen Personen schmälern. Aus dem Zusammenhang zwischen Schadstoffbelastung und der Auftretenshäufigkeit von Morbidität und Mortalität (sogenannte Belastungs-Wirkungsbeziehung oder dose response function) lässt sich die Zahl der luftverschmutzungsbedingten Krankheits- und Todesfälle bestimmen.

Um daraus die Gesundheitskosten zu berechnen, wird in einem letzten Arbeitsschritt bestimmt, welche Aufwendungen und (Nutzen-)Verluste für die Betroffenen und die Allgemeinheit durch diese zusätzlichen Krankheits- und Todesfälle entstehen. Mit Kostensätzen pro Krankheitsfall oder verlorenes Lebensjahr lassen sich dann die gesamten Gesundheitskosten der Luftverschmutzung berechnen.

Auch in anderen Kostenbereichen werden die externen Kosten nach derselben Methode berechnet, d.h. ausgehend von der Emission von Schadstoffen oder Lärm wird die Wirkungskette nachverfolgt und die Schäden werden monetarisiert.

### **Externe Kosten können nur unter Unsicherheit geschätzt werden**

Es gilt zu betonen, dass die Berechnung mit der Ursachen-Wirkungskette mit einigen Unsicherheiten belastet ist:<sup>19</sup>

- Unsichere Datengrundlagen (z.B. genaue Form der Belastungs-Wirkungs-Beziehung, Kosten eines verlorenen Lebensjahres)
- Modell-Unsicherheiten (z.B. Ausbreitungsmodell der Schadstoffe in der Atmosphäre, Annahmen zur Belastungs-Wirkungsbeziehung)
- Unsicherheiten über politische und ethische Entscheide (z.B. Diskontrate, Kostensatz pro Tonne CO<sub>2</sub>)
- Unsicherheiten über die Zukunft (z.B. Reduktion der Ernteaufträge durch Entwicklung resistenterer Pflanzensorten, Entwicklung des Klimas bei gegebenem CO<sub>2</sub>-Ausstoss)

### **Externe Kosten werden unterschätzt – die tatsächlichen externen Kosten sind höher**

Im Verkehr liegen umfangreiche Berechnungen der externen Kosten vor. Dabei wurde eine bestmögliche Schätzung («best guess») erstellt. Bei Unsicherheit wurde jedoch der sogenannte «At-least-Ansatz» verwendet, d.h. die Kosten wurden so realistisch wie möglich, im Zweifelsfalle jedoch konservativ bestimmt. Dies führt zu einer Unterschätzung der wahren externen Kosten. Dies gilt somit auch für die im Folgenden durchgeführten Berechnungen.

### **Externe Kosten trotz Unsicherheit berücksichtigen: „Lieber ungefähr richtig als exakt falsch“**

Die Ergebnisse zu den externen Kosten sind also nicht als exakte Werte zu betrachten, sondern als Grössenordnungen. Die Resultate zu den externen Kosten im Verkehr schwanken je

---

<sup>19</sup> European Commission (2003), External Costs, p. 16.

nach Kostenbereich um  $-6\%$  /  $+6\%$  bis  $-50\%$  /  $+144\%$ .<sup>20</sup> Die Ergebnisse im EU-Projekt ExternE könnten gar um einen Faktor 2 bis 4 tiefer oder höher ausfallen.<sup>21</sup> Trotz diesen Unsicherheiten sind bei Entscheidungen die externen Kosten zu berücksichtigen. Zudem zeigen die Berechnungen, welche externen Effekte besonders hohe Kosten verursachen und damit in welchen Bereichen Massnahmen besonders viel bringen.

Es zeigt sich, dass trotz den grossen Unsicherheiten in der Berechnung der externen Kosten im EU-Projekt ExternE die Reihenfolge (bezüglich der Höhe der externen Kosten) der verschiedenen Technologien zur Stromproduktion unverändert bleibt, wenn «unsichere» Annahmen in der Berechnung geändert werden.<sup>22</sup>

### Territorial- und Halbstreckenprinzip

Im Verkehrsbereich erfolgen die Berechnungen im **Strassen- und Schienenverkehr** grundsätzlich nach dem **Territorialprinzip**.<sup>23</sup> Es werden diejenigen Kosten ermittelt, welche durch den Verkehr in der Schweiz verursacht werden. Die Abgrenzung bezieht sich also auf den Ort der Verursachung: Es wird untersucht, wie stark der Verkehr in der Schweiz die Lebensqualität beeinträchtigt, losgelöst davon, ob von dieser Beeinträchtigung Bewohner und Bewohnerinnen innerhalb oder ausserhalb der Schweiz betroffen sind.

Im **Luftverkehr** erfolgt die Berechnung hingegen nach dem **Halbstreckenprinzip**, das den Eigenschaften des Luftverkehrs eher gerecht wird:<sup>24</sup> Das Halbstreckenprinzip erfasst verkehrsseitig alle Flüge ab der Schweiz bis in die Hälfte der Strecke zum ausländischen Zielflughafen und ab der Hälfte der Strecke vom ausländischen Ausgangsflughafen bis in die Schweiz sowie die gesamte Strecke aller Inlandflüge.<sup>25, 26</sup> Das bedeutet, dass alle Starts und Landungen in

---

<sup>20</sup> Infras, Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten, S. 152-153.

<sup>21</sup> ExternE-Homepage: <http://www.externe.info/>

<sup>22</sup> ExternE-Homepage: <http://www.externe.info/>

<sup>23</sup> Ecoplan, Infras (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten, S. 103ff.

<sup>24</sup> Da die meisten Flüge ab der Schweiz internationale Flüge mit teilweise grossem Emissionsanteil über internationalen Gewässern sind, würden damit zusammenhängende externe Kosten beim Territorialprinzip keinem Land zugeordnet. Deshalb wird beim Luftverkehr vom Territorialprinzip abgewichen.

<sup>25</sup> Das Halbstreckenprinzip wird für Flugzeuge verwendet, nicht für Individuen: Fliegt ein Schweizer von Zürich nach Frankfurt und von dort nach Indien, wird die halbe Flugstrecke bis Frankfurt miteinbezogen, nicht jedoch ein Anteil des Weiterflugs nach Indien. Fliegt ein Italiener von Rom nach Zürich und dann nach Brasilien, so wird aufgrund des Zwischenhalts in Zürich jeweils von beiden Flugstrecken die Hälfte miteinbezogen.

<sup>26</sup> Die Berechnung des Totals der CO<sub>2</sub>- und Schadstoffemissionen führt mit dieser Methode in etwa zum gleichen Ergebnis wie die Zählung der gesamten Strecke aller Flüge von der Schweiz bis zur Destination im Ausland und aller Flüge innerhalb der Schweiz (Absatzprinzip).

Für das Emissionsinventar der Zivilluftfahrt, welches auch für die Erstellung des Treibhausgasinventars der Schweiz zuhanden des United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) dient, wird das „Absatzprinzip“ – in Englisch Sales Principle – verwendet. Als international anerkannter Standard wird es häufig auch für weitere Statistiken angewendet. Eine Berechnung des Treibstoffverbrauchs nach dem Absatzprinzip stimmt mit der gesamten in der Schweiz getankten Treibstoffmenge überein. Fast 100% der Emissionen werden durch Punkt zu Punkt Verbindungen generiert, für die es einen Hin- und einen Rückflug gibt. Eine Zählung der

der Schweiz berücksichtigt werden. Es werden alle für diese Flugstrecken relevanten Infrastrukturen berücksichtigt. Das sind namentlich alle schweizerischen Flugplätze (nicht berücksichtigt wird jedoch – in Absprache mit dem BFE und kohärent mit den Systemgrenzen der Energieperspektiven 2050+ – der Landesflughafen Basel, da dieser in Frankreich liegt) sowie alle Flugsicherungsdienstleistungen, die für die erfassten Flugstrecken relevant sind. Würden alle Länder eine Transportrechnung Luftverkehr gemäss dem so definierten Halbstreckenprinzip erstellen, wären alle Flüge vollständig abgedeckt.

Zu diesen Grundsätzen (Territorialprinzip im Strassen- und Schienenverkehr, Halbstreckenprinzip im Luftverkehr) gibt es aufgrund fehlender Datengrundlagen in den Berechnungen für das ARE<sup>27</sup> zwei Ausnahmen:

- Bei der Abgrenzung der **Unfälle im Strassenverkehr** (aber nicht im Schienen- und Luftverkehr<sup>28</sup>) wird aufgrund der vorhandenen Datengrundlagen das **Inländerprinzip** verwendet (Daten zum Territorialprinzip sind – ausser für Todesfälle – nicht verfügbar): Berücksichtigt werden alle Unfälle von in der Schweiz wohnhaften Personen unabhängig davon, ob die Unfälle im In- oder Ausland stattfinden. Die Ausnahme bilden die Todesfälle, die nur nach dem Territorialprinzip vollständig dargestellt werden können.
- Bei der **Luftverschmutzung** wird angenommen, dass der Import und Export von Luftschadstoffen sich die Waage halten.<sup>29</sup> Es werden also die Schäden quantifiziert, die sich bei der Schweizer Bevölkerung ergeben (Immissionen in der Schweiz).

---

halben Flugstrecke von der Schweiz ins Ausland und der halben Strecke eines Rückflugs vom Ausland in die Schweiz (Halbstreckenprinzip) ist modelltechnisch für die Treibstoff- und Schadstoffberechnung identisch mit der Berechnung eines entsprechenden ganzen Flugs von der Schweiz bis zur Destination (Absatzprinzip). Kleine Unterschiede können z.B. durch strategisches Tanken entstehen oder durch private Flüge von meist kleinen Flugzeugen, deren Abflugort beim Flug in die Schweiz nicht mit der Destination des Weiterflugs übereinstimmen.

Das Halbstreckenprinzip hat jedoch den Vorteil, dass neben allen Starts auch alle Landungen in der Schweiz (und nicht im Ausland) berücksichtigt werden und damit auch die lokalen Umweltauswirkungen in der Schweiz wie mit dem Territorialprinzip voll erfasst werden.

<sup>27</sup> Ecoplan, Infrac (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten, S. 105.

<sup>28</sup> Im Schienenverkehr wird das Territorialprinzip verwendet, im Luftverkehr das Halbstreckenprinzip.

<sup>29</sup> Wird von dieser Annahme abgewichen, könnte nicht mehr das Schweizer Schadstoffausbreitungsmodell verwendet werden, sondern es müsste ein europaweites Modell zur Anwendung kommen. Zudem müssten die Gesundheitseffekte im Ausland bestimmt werden, die durch den Verkehr in der Schweiz verursacht werden. Hingegen müssten die Gesundheitsschäden in der Schweiz, die von ausländischen Emissionen verursacht werden, abgezogen werden. Dadurch würden die Datenanforderungen massiv zunehmen.

## 2.2 Für die Sekundäreffekte berücksichtigte Kostenbereiche der externen Kosten

Im Folgenden werden die Kostenbereiche, in denen externe Kosten entstehen, kurz vorgestellt. Zudem wird diskutiert, welche Kostenbereiche in der vorliegenden Untersuchung als Sekundäreffekte der Energieperspektiven 2050+ berücksichtigt werden.

Externe Kosten im Verkehrsbereich bzw. im Bereich Strom- und Wärmeproduktion können in folgenden Bereichen auftreten und werden wie folgt berücksichtigt (vgl. Abbildung 1-2 vorne):<sup>30</sup>

- **Gesundheitskosten durch Luftverschmutzung:** Die Luftverschmutzung führt zu Atemwegs- und Herz- / Kreislaufkrankungen. Dies führt zu verlorenen Lebensjahren, Spitalaufenthalten, Bronchitis, Asthma und Tagen mit eingeschränkter Aktivität. Dies wiederum führt zu medizinischen Behandlungskosten, Produktionsausfall (weil Personen vorübergehend oder dauerhaft nicht als Arbeitskräfte zur Verfügung stehen), Wiederbesetzungskosten (Neubesetzung von Stellen Verstorbener) und immateriellen Kosten (Verlust an Wohlbefinden, Schmerz und Leid). Die Kosten wurden im Verkehrsbereich mit Hilfe des Leitschadstoffes PM<sub>10</sub> ermittelt.

Die Gesundheitskosten der Luftbelastung werden in allen Bereichen (Strom- und Wärmeproduktion, PtH<sub>2</sub>, Produktion und Verkehr) als Sekundäreffekte der Energieperspektiven 2050+ berücksichtigt (vgl. Abbildung 1-2).

- **Gebäudeschäden durch Luftverschmutzung:** Die Luftverschmutzung führt bei Gebäuden zu einer Verkürzung der Renovationszyklen, einer Verkürzung der Lebensdauer der Gebäudehülle und zu höheren Reinigungskosten. Wiederum wird im Verkehrsbereich von PM<sub>10</sub> als Leitschadstoff ausgegangen.

Die Gebäudeschäden der Luftbelastung werden in allen Bereichen berücksichtigt.

- **Ernteaufälle durch Luftverschmutzung:** Die Ernteaufälle werden getrennt für verschiedene Pflanzenarten aufgrund der Ozonbelastung ermittelt und mit deren Marktpreisen bewertet.

Die Ernteaufälle werden in allen Bereichen berücksichtigt.

- **Waldschäden durch Luftverschmutzung:** Die Waldschäden entstehen aufgrund von erhöhtem Windwurfisiko und Holzminderertrag. Die Bodenversauerung führt dazu, dass bei starken Winden die Schäden grösser sind. Ausserdem lassen die Ozonbelastung und die Bodenversauerung die Bäume langsamer wachsen, womit der Holzernteertrag sinkt.<sup>31</sup>

Die Waldschäden werden in allen Bereichen berücksichtigt.

- **Biodiversitätsverluste durch Luftverschmutzung:** Der Eintrag von Luftschadstoffen in die Umwelt kann zu Eutrophierung (Überdüngung) und Versauerung natürlicher Ökosysteme (Böden, Gewässer etc.) führen. Eutrophierung und Versauerung wiederum führen zu

---

<sup>30</sup> Infrac, Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten und Ecoplan, Infrac (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten.

<sup>31</sup> Zur Monetarisierung werden der Holzpreis sowie die Häufigkeit und die Kosten des Sturmes Lothar verwendet.

Biodiversitätsverlusten in diesen Ökosystemen. Die Monetarisierung erfolgt über Ersatzkosten.<sup>32</sup> Diese Kosten wurden erstmals in Ecoplan, Infrac (2014)<sup>33</sup> bestimmt und fehlten damit in Ecoplan (2012).<sup>34</sup>

Die Biodiversitätsverluste werden in allen Bereichen berücksichtigt.

- **Lärm:** Der Lärm führt einerseits zu einer Reduktion der Wohnungspreise. Andererseits ist er Verursacher von Krankheits- und Todesfällen aufgrund von Bluthochdruck, ischämischen Herzkrankheiten (mangelnde Versorgung mit Blut) und Schlaganfällen, die mit derselben Methodik wie die Gesundheitskosten der Luftverschmutzung monetarisiert werden (vgl. Abbildung 2-1). Die Kostenschätzung basiert im Verkehrsbereich auf einer detaillierten Untersuchung der Lärmbelastung. Bei der Stromproduktion ist der Lärm meist irrelevant, kann aber bei der Windenergie eine Rolle spielen (bei Windkraftwerken liegen uns jedoch keine Datengrundlagen vor, die einen Einbezug erlauben würden).

Entsprechend kann der Lärm nur im Verkehrsbereich (Strassen-, Schienen- und Luftverkehr) berücksichtigt werden.

- **Klima:** Der Ausstoss von Treibhausgasen führt weltweit zu einer Klimaerwärmung. Es werden gravierende Folgen (Überschwemmungen, Wirbelstürme, Gletscherabbrüche etc.) befürchtet. Der (Primär-)Nutzen der Klimapolitik und der Umsetzung des Netto-Null Ziels besteht somit in erster Linie darin, diese Auswirkungen und die damit verbundenen Folgekosten zu reduzieren. Die Berechnung des Primärnutzen der Umsetzung des Netto-Null Ziels ist nicht Teil der Energieperspektiven 2050+. Die Gründe werden im technischen Bericht zu den volkswirtschaftlichen Auswirkungen im Rahmen der EP2050+<sup>35</sup> in einem Exkurs zusammengefasst. Zudem wird dort in der Diskussion der Sekundäreffekte (Kapitel 5.2) kurz auf den Primärnutzen eingegangen.

#### Exkurs zu den Klimakosten im Rahmen der Studie zu den externen Kosten des Verkehrs<sup>36</sup>

Das ARE berechnet die externe Kosten und Nutzen des Verkehrs für die Schweiz und verwendet in diesem Rahmen ein Kostensatz von 121.5 CHF/t CO<sub>2</sub> für 2015. Diese sind Vermeidungsgrenzkosten, basierend auf dem Ziel, den Temperaturanstieg auf 2-Grad zu begrenzen, und einer Diskontrate von 3% (was eher konservative Annahmen darstellt, die mit dem vom ARE angewandten Prinzip der "at least"-Berechnung übereinstimmen). Damit der Konnex zu den Arbeiten zu den externen Kosten des Verkehrs

<sup>32</sup> Ausserdem wurden Biodiversitätsverluste infolge von Landnutzungsänderungen mithilfe eines Wiederherstellungskostenansatzes monetarisiert. Im Rahmen der Biodiversitätsstrategie werden auch sogenannte Ökosystemleistungen (z.B. Reinigung Regenwasser durch Boden, CO<sub>2</sub>-Speicherung durch Wälder, Erholungsnutzen intakter Landschaften etc.) betrachtet. Die Quantifizierung dieser Ökosystemleistungen ist jedoch zu wenig weit fortgeschritten als dass sie hier berücksichtigt werden könnten (Econcept, BAFU 2011, Indikatoren für Ökosystemleistungen).

<sup>33</sup> Ecoplan, Infrac (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten.

<sup>34</sup> Ecoplan (2012), Energiestrategie 2050 – volkswirtschaftliche Auswirkungen.

<sup>35</sup> Ecoplan (2022), Energieperspektiven 2050+ Volkswirtschaftliche Auswirkungen : Analyse mit einem Gleichgewichtsmodell für die Schweiz – Annahmen, Szenarien, Politikinstrumente

<sup>36</sup> Infrac, Ecoplan, (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015, Aktualisierung der Berechnungen von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten des Strassen-, Schienen-, Luft- und Schiffsverkehrs 2010 bis 2015.

ersichtlich wird sowie der Vollständigkeit halber werden im Verkehrsbereich die spezifischen externen Klimakosten nachrichtlich ausgewiesen.

Auch die Studie von Ecoplan (2022)<sup>37</sup> berechnet Vermeidungskosten. Es handelt sich allerdings um Schweizer Vermeidungskosten für die Reduktion der Treibhausgase zur Erreichung der Ziele des Bundesrates (Beschluss vom 28.8.2019) im Szenario ZERO mit einem Gleichgewichtsmodell (im Vergleich zum Referenzszenario WWB). Daher sind diese Kosten nicht mit jenem in der Studie zu den externen Kosten des Verkehrs vergleichbar, da sich sowohl die Ziele als auch die Abgrenzung unterscheiden.

Schadenskosten werden weder in der Studie zu den externen Kosten noch jener zu den VWL Auswirkungen bestimmt.

- **Natur und Landschaft:** Verkehrsinfrastrukturen führen zu Habitatsverlusten (Bodenversiegelung) und Habitatfragmentierungen (Zerschneidung). Für die Quantifizierung wird ein Ersatzkostenansatz gewählt, d.h. es werden die Kosten berechnet, die anfallen, wenn die Habitatverluste andernorts ersetzt werden und die Fragmentierungen aufgehoben werden (Wildtierbrücken etc.).

Auch die Strom- und Wärmeproduktion kann zu Habitatsverlusten insbesondere bei der Wasserkraft (Stauseen) führen. Wind und Wasserkraft können zudem eine Veränderung des Landschaftsbildes und eine Beeinträchtigung von aquatischen oder terrestrischen Habitaten (Auswirkungen von Windturbinen auf Vögel und Fledermäuse) zur Folge haben. Im Strom- und Wärmebereich müssten die Auswirkungen auf das Landschaftsbild (z.B. Windenergie) und Habitatverluste detaillierter sowie technologie- und standortbezogen erarbeitet werden, was den Rahmen der vorliegenden Aktualisierung sprengen würde.

Natur und Landschaft wird in allen Bereichen **nicht** berücksichtigt: Die Kosten für Natur und Landschaft des Verkehrs werden nicht berücksichtigt, da sie durch die Verkehrsinfrastruktur und nicht durch deren Benützung hervorgerufen werden, und somit durch die Energieperspektiven 2050+ nicht massgeblich beeinflusst werden.<sup>38</sup>

- **Bodenschäden durch toxische Stoffe:** Der Verkehr führt auch zur Emission von Schwermetallen (Zink, Cadmium, Blei, Kupfer) und PAK (polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen), die sich im Boden ansammeln. Dies führt nach einigen Jahren zu Sanierungskosten (Entsorgung des belasteten Materials und Ersatz mit unverschmutztem Material). Die Kosten werden mit einem Reparaturkostenansatz<sup>39</sup> ermittelt. Die Bodenqualität ist bei der Strom- und Wärmeproduktion kaum relevant (ausser möglicherweise beim Abbau von Rohstoffen im Ausland).

Entsprechend werden die Bodenschäden nur im Verkehrsbereich berücksichtigt.

---

<sup>37</sup> Ecoplan (2022), Energieperspektiven 2050+ Volkswirtschaftliche Auswirkungen. Analyse mit einem Mehrländer-Gleichgewichtsmodell – Annahmen, Szenarien, Ergebnisse.

<sup>38</sup> Es ist nicht auszuschliessen, dass Strassen weniger schnell ausgebaut werden, wenn die Energieperspektiven 2050+ zu einer stärkeren Verlagerung auf den öffentlichen Verkehr führt. Für eine adäquate Berücksichtigung der Veränderung der externen Kosten im Bereich Natur und Landschaft aufgrund der Energieperspektiven 2050+ müssten umfassendere Abklärungen vorgenommen werden.

<sup>39</sup> Dabei werden die Kosten bestimmt, die bei der Reparatur des entstandenen Schadens entstehen.

- **Vor- und nachgelagerte Prozesse:** Bei den vor- und nachgelagerten Prozessen geht es im Verkehrsbereich um den Ausstoss von Klimagasen und Luftschadstoffen bei Herstellung, Unterhalt und Entsorgung von Fahrzeugen und Verkehrsinfrastrukturen sowie um Herstellung, Transport und Bereitstellung von Treibstoffen bzw. der Traktionsenergie. In den Arbeiten für das ARE werden nur die Auswirkungen von Klimagasen und Luftschadstoffen der vor- und nachgelagerten Prozesse betrachtet. Weitere externe Effekte, wie z.B. Boden- und Gewässerverschmutzung, konnten nicht quantifiziert werden.<sup>40</sup> Die Kosten der Luftbelastung wurden erstmals in Ecoplan, Infrac (2014)<sup>41</sup> miteinbezogen.<sup>42</sup>

Im Verkehrsbereich werden die vor- und nachgelagerten Effekte nicht berücksichtigt: Die vor- und nachgelagerten Effekte auf das Klima, die 95% der Kosten der vor- und nachgelagerten Effekte ausmachen, werden nicht miteinbezogen (es handelt sich nicht um Sekundäreffekte, vgl. oben). Daneben wären die Auswirkungen auf die Luftbelastung zu berücksichtigen. Wie erläutert handelt es sich um die Effekte von Verkehrsmitteln, Infrastruktur und Energiebereitstellung. Die Kosten der Infrastruktur sind nicht zu berücksichtigen (so wie auch Natur und Landschaft ausgeschlossen wird). Bei den Verkehrsmitteln entstehen im Strassenverkehr Kosten von 22 Mio. CHF durch die Luftbelastung der vor- und nachgelagerten Prozesse (Schienen- und Luftverkehr zusammen unter 1 Mio. CHF). Durch die Energieperspektiven verändert sich die Zahl der Fahrzeuge nicht, es wird aber einen Umbau des Fahrzeugparks geben (mehr Elektrofahrzeuge und damit mehr Batterien). Dadurch verändern sich die vor- und nachgelagerten Luftbelastungskosten der Verkehrsmittel nur geringfügig. Dies ist vernachlässigbar klein (im Vergleich zu den berücksichtigten externen Kosten des Strassenverkehrs von knapp 10 Mrd. CHF, vgl. Abbildung 5-2). Die Luftbelastungskosten der vor- und nachgelagerten Prozesse der Energiebereitstellung betragen 23 Mio. CHF im Strassenverkehr (Luftverkehr 9 Mio. CHF, Schienenverkehr 0.1 Mio. CHF). Diese Kosten werden sich verändern, doch liegt in den Studien für das ARE eine Differenzierung nach Benzin-, Diesel- oder Elektrofahrzeugen nicht vor, so dass eine Abschätzung komplex wäre. Zudem ist zu beachten, dass in den übrigen Berechnungen die Emissionen der Industrie in der Schweiz (z.B. in der Raffinerie Cressier) und die vorgelagerten Kosten der Stromproduktion ebenfalls berücksichtigt werden. Eine einfache Berücksichtigung der luftbelastungsbedingten Kosten der vor- und nachgelagerten Prozesse würde also zu einer Doppelzählung der Effekte in der Schweiz bzw. der Stromproduktion führen. Da der Anteil der Emissionen im Ausland nicht bekannt ist und da die Effekte nur eine vernachlässigbar kleine Grössenordnung erreichen, werden sie nicht weiter untersucht.

Bei der Strom- und Wärmeproduktion (und PtH<sub>2</sub>) werden die vor- und nachgelagerten Prozesse hingegen berücksichtigt (nur Luftbelastung, nicht Klima), weil die Datengrundlagen

---

<sup>40</sup> Da die Umweltgesetzgebung (oder deren Einhaltung) im Ausland teilweise deutlich schlechter ist als in der Schweiz, können die externen Kosten im Ausland deutlich höher sein als sie in der Schweiz unter Einhaltung der Gesetze wären.

<sup>41</sup> Ecoplan, Infrac (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten.

<sup>42</sup> Zudem können auch durch die Ölpreisvolatilität oder Mengeneinbrüche bei Kohle- oder Gasversorgung externe Kosten entstehen, die jedoch klein sind und hier vernachlässigt werden (Markandya und Hunt 2004, ExternE-Pol Externalities of Energy: The Externalities of Energy Insecurity S. 31).

(ecoinvent-Datenbank) direkt die gesamten Emissionen inkl. vor- und nachgelagerte Prozesse enthalten. Bei der industriellen und landwirtschaftlichen Produktion sind die vor- und nachgelagerten Effekte enthalten, solange sie in der Schweiz erfolgen, vor- und nachgelagerten Effekte im Ausland hingegen nicht.

- **Unfallkosten:** Die Unfallkosten setzen sich zusammen aus Personenschäden (medizinische Heilungskosten, Produktionsausfall, Wiederbesetzungskosten, immateriellen Kosten), Administrativkosten, sowie Polizei- und Rechtsfolgekosten. Dabei ist zu beachten, dass Teile dieser Kostenbereiche interne Kosten darstellen und deshalb nicht berücksichtigt werden. Entsprechend werden im Verkehrsbereich die Sachschäden vernachlässigt, weil sie vom Unfallverursacher bzw. dessen Haftpflichtversicherung getragen werden und damit interne Kosten darstellen. Im Verkehrsbereich basieren die externen Unfallkosten auf einer detaillierten Untersuchung der Unfälle nach dem Verursacherprinzip.

Nur im Verkehrsbereich werden die Unfallkosten miteinbezogen. Bei der Stromproduktion sind vor allem Nuklearunfälle sowie die Risiken der nuklearen Strahlung von Bedeutung. Die Kernkraftrisiken werden im Folgenden aber nicht berücksichtigt, weil sowohl im Referenzszenario WWB wie auch im Szenario ZERO von einem Phase-out der Atomkraft ausgegangen wird, sich die beiden Szenarien also bzgl. Kernkraftrisiken kaum unterscheiden und weil die Monetarisierung der Kernkraftrisiken umstritten ist und die Akzeptanz der Kernkraftrisiken eher in einem demokratischen Prozess bestimmt werden sollte (vgl. folgender Exkurs). Auch bei Stauseen könnten Erdbeben zu grossen Schäden führen, die hier aber ebenfalls nicht ermittelt werden (vgl. folgender Exkurs). Selbst bei der Windenergie sind externe Kosten möglich.<sup>43</sup>

#### **Exkurs: Risiken der Kernkraft und der Wasserkraft<sup>44</sup>**

##### **Kernkraftrisiko ist ein Damokles-Risiko: Risikoaversion spielt eine zentrale Rolle**

Beim Kernkraft-Risiko handelt es sich um ein sogenanntes Damokles-Risiko – ein Risiko mit sehr hohen Kosten aber sehr kleiner Wahrscheinlichkeit. Solche Risiken sind problematisch (selbst wenn der Erwartungswert gleich ist, wie bei einem Risiko mit kleinen Folgen, aber grosser Wahrscheinlichkeit). Für Damokles-Risiken besteht in der Bevölkerung eine Risikoaversion. Das Ausmass der Risikoaversion ist jedoch unklar. Es kann aber beträchtlich sein. So wird z.B. in der Schweiz<sup>45</sup> der Kostensatz bei Risikoneutralität um einen Faktor 100 vergrössert, um Risiken zu bewerten, die zu nationalen Katastrophen führen können. Dieser Risikoaversionsfaktor geht auf eine umfangreiche Diskussion mit Beteiligung der relevanten Entscheidungsträger zurück. Die Methode kann jedoch nicht als international akzeptiert gelten. So kam die Europäische Kommission 2005 zum Schluss, dass eine Methode, um

<sup>43</sup> Beispielsweise würde auf dem Mt. Racine (NE) die vielbegangene Langlauf-Loipe unbenutzbar wegen Eisschlaggefahr (Auskunft BAFU). Solche Effekte wie auch andere Verluste von Standortqualität (z.B. Verlust an Eignung für den sanften Tourismus) können jedoch im vorliegenden Bericht nicht quantifiziert werden, da sie sehr standortabhängig sind und dazu keine Datengrundlagen vorliegen.

<sup>44</sup> Im Folgenden werden die Erläuterungen aus EcoPlan (2012, Energiestrategie 2050 – volkswirtschaftliche Auswirkungen, S. 104ff) teilweise unverändert übernommen.

<sup>45</sup> KATARISK (2002), KATARISK - Katastrophen und Notlagen in der Schweiz. Erläuterung der Methode, S. 6 und KATARISK (2002), KATARISK - Katastrophen und Notlagen in der Schweiz. Ergebnisse der Risikobewertung, S. 1.

diese Risiken zu bewerten, noch entwickelt werden muss.<sup>46</sup> Zudem gab es in den 1990er- und 2000er-Jahren im Rahmen der EU-Forschung keine neuen Studien zu den externen Kosten der Kernkrafttrisiken.<sup>47</sup>

### **Kernkraftunfälle – Grosse Unterschiede in der Bewertung der Schadens- und Eintretenswahrscheinlichkeit**

Bei einem Kernkraftunfall kommt neben der schwierigen Bestimmung der externen Kosten aufgrund der Risikoaversion noch dazu, dass die Schätzungen des Schadens und der Eintretenswahrscheinlichkeit sehr unterschiedlich sind. Zur Illustration mögen folgende Zahlen dienen: Die Schätzung der Schäden eines Kernschmelzunfalls in Deutschland variierten in den 90-er Jahren von 500 Mrd. € bis 5 Bill. €, die geschätzten Eintrittswahrscheinlichkeiten lagen zwischen 1:33'000 bis zu 1: 10'000'000.<sup>48</sup> Deshalb gehen auch die Schätzungen der externen Kosten der Nuklearenergie weit auseinander und liegen zwischen 0.0001 Rp / kWh und 321 Rp / kWh – Schätzungen für die Schweiz schwanken zwischen 0.2 und 35.7 Rp / kWh).<sup>49</sup> Der Höchstwert von 321 Rp / kWh beruht auf versicherungsmathematischen Überlegungen zur Absicherung seltener, grosser Schäden.<sup>50</sup>

### **Kernenergie: Verzicht auf eine ökonomische Bewertung über externe Kosten – demokratischer Entscheid als Alternative**

Die Bewertung der Kernenergie hängt wesentlich von der Risikobereitschaft bzw. Risikoaversion ab. Die Bewertung der Kernenergie hat letztlich in einem politischen Diskurs zu erfolgen. Zu einer ähnlichen Schlussfolgerung kommt auch das deutsche Umweltbundesamt:<sup>51</sup> Zahlen zu den externen Kosten spielen bei der gesellschaftlichen Bewertung und resultierenden politischen Entscheidung kaum eine Rolle. Vielmehr hat der Vorfall im Atomkraftwerk Fukushima der Bevölkerung 25 Jahre nach Tschernobyl erneut vor Augen geführt, dass das Risiko einer Atomkatastrophe real ist und wie die entsprechenden Folgen aussehen können. Dies hat letztlich zu der entsprechenden Bewertung – und zum Atomausstieg – geführt.

Das Ergebnis des politischen Diskurses kann in unterschiedlichen Ländern sehr unterschiedlich ausfallen:<sup>52</sup> So ist Italien schon 1986 nach Tschernobyl aus dem Atomstrom ausgestiegen, in Deutschland wurde ein stufenweiser Ausstieg bis 2022 beschlossen (nachdem der Ausstieg zuerst beschlossen und dann wieder rückgängig gemacht wurde). In Frankreich hat Präsident Macron im Februar 2022 der Atomkraft eine tragende Rolle in der französischen Klimapolitik zugesprochen. Dagegen ist in der Schweiz der Ausstieg bereits beschlossen, wobei die bestehenden Anlagen nach Ende ihrer „sicherheitstechnischen“ Laufzeit abgeschaltet werden sollen. Der Ausstieg aus der Atomenergie gilt sowohl für das Referenzszenario WWB also auch für das Szenario ZERO. Die Kernkrafttrisiken unterscheiden sich somit zwischen diesen beiden Szenarien nicht.

<sup>46</sup> European Commission (2005), ExternE Externalities of Energy Methodology 2005 Update, S. 1.

<sup>47</sup> NEEDS (2009), External costs from emerging electricity generation technologies, Anhang S. 6.

<sup>48</sup> UBA (2018), Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten: Methodische Grundlagen, S. 26.

<sup>49</sup> Ecoplan (2007), Die Energieperspektiven 2035 – Band 3: Volkswirtschaftliche Auswirkungen, S. 119 und 148.

<sup>50</sup> B,S,S. (2009), Literaturübersicht Kernenergie, S. 60.

<sup>51</sup> UBA (2018), Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten: Methodische Grundlagen, S. 26.

<sup>52</sup> Wikipedia (2019), Atomausstieg.

### Risiken der Wasserkraft

Damokles-Risiken treten in weniger extremem Ausmass auch in der Wasserkraft auf, da ein sehr unwahrscheinlicher Dambruch ebenfalls zu hohen Kosten führen kann. In diesem Fall handelt es sich jedoch meist nur um lokale oder regionale Katastrophen, nicht um nationale. Zudem handelt es sich um eine einmalige Wirkung, während bei einem Nuklearunfall noch über Jahrzehnte der Boden verseucht bleibt. Nach einem Dambruch kann also das betroffene Gebiet im Prinzip sofort wieder bewohnt werden, bei einem grösseren Kernkraftunfall hingegen nicht. Deshalb dürfte die Risikoaversion bei der Wasserkraft kleiner sein als bei der Kernkraft. Solche Risiken der Wasserkraft werden im Folgenden vernachlässigt.

- **Zusatzkosten in städtischen Räumen:** Dabei handelt es sich einerseits um räumliche Trennungseffekte, die Fussgängern beim Überqueren von Verkehrsinfrastrukturen entstehen (Zeitverluste). Andererseits wird die Beeinträchtigung des Ortsbildes und der Aufenthaltsqualität von Verkehrsachsen thematisiert.

Im Verkehrsbereich werden die Zusatzkosten in städtischen Räumen berücksichtigt. Die Zusatzkosten sind bei der Strom- und Wärmeproduktion nicht relevant, ausser allenfalls die Beeinträchtigung des Ortsbildes durch Kraftwerke, was aber vernachlässigt wird.

- **Gesundheitsnutzen im Langsamverkehr:** Die körperliche Betätigung im Langsamverkehr (insbesondere Fuss- und Veloverkehr) wirkt sich positiv auf die Gesundheit aus und führt zu zusätzlichen Lebensjahren sowie vermiedenen Krankheitsfällen. Damit können medizinische Behandlungskosten, Produktionsausfälle und immaterielle Kosten eingespart werden. Es handelt sich prinzipiell um ähnliche Auswirkungen wie bei der Luftbelastung, aber hier sind es Gesundheitsnutzen, bei der Luftbelastung hingegen Gesundheitskosten.

Da der Langsamverkehr in den Energieperspektiven 2050+ nicht berücksichtigt wird, entfallen auch die Gesundheitsnutzen im Langsamverkehr.

- **Stau:** Im Strassenverkehr kann ein grosses Verkehrsvolumen zu stockendem Verkehr oder Stau führen und damit zu Zeitverlusten.<sup>53</sup> Im Schienen- und Luftverkehr wurden bisher keine Stauereffekte (oder Verspätungseffekte) berechnet. Stau ist bei der Strom- und Wärmeproduktion nicht relevant.

Staukosten können damit nur im Strassenverkehr miteinbezogen werden.

**Fazit:** Für die Berechnung der externen Kosten im Bereich **Strom- und Wärmeproduktion** (inkl. PtH<sub>2</sub> und industrielle und landwirtschaftliche Produktion) beschränken wir uns für die vorliegende Aufgabenstellung auftragsgemäss (da auf kohärente, vorhandene Datenquellen abgestellt wird) auf die externen Kosten der **Luftbelastung (Gesundheitskosten, Gebäudeschäden, Ernteaufschläge, Waldschäden und neu Biodiversitätsverluste)** – inkl. der Luftbelastungseffekte in vor- und nachgelagerten Prozessen (ausser in der Produktion). Die luftbelastungsbedingten externen Kostensätze der Strom- und Wärmeproduktion mit verschiedenen Produktionstechnologien (inkl. PtH<sub>2</sub>) werden im Folgenden neu erarbeitet (vgl. Kapitel 3), die Kostensätze für Industrie und Landwirtschaft in Kapitel 4. Im **Verkehr** werden aufgrund der

<sup>53</sup> Die Staukosten wurden in Keller (2019, Staukosten Schweiz 2015) ermittelt.

guten Datenlage neben der Luftbelastung **weitere Kostenbereiche** miteinbezogen (Lärm, Bodenschäden, Unfälle, Effekte in städtischen Räumen und Stau).

Im Vergleich zu Ecoplan (2012<sup>54</sup>) werden damit neu die Biodiversitätsverluste durch die Luftbelastung miteinbezogen. Neu wird auch PtH<sub>2</sub> untersucht. Zudem wird wie erläutert neu auch eine Prognose bis 2060 erstellt.

### Externe Kosten im Verkehrsbereich aus Sicht Verkehrsteilnehmende

Für die Schweiz hat das ARE im Verkehrsbereich aktuelle und dem neuesten Stand des Wissens entsprechende Schätzungen zu den externen Kosten erarbeiten lassen. Die Ergebnisse werden im Kapitel 5 dargestellt. Dabei ist zu betonen, dass die externen Kosten im Verkehrsbereich aus zwei Sichtweisen berechnet werden können:<sup>55</sup>

- **Sicht Verkehrsteilnehmende:** Bei dieser Sicht wird für die Abgrenzung von internen und externen Kosten vom einzelnen Verkehrsteilnehmenden ausgegangen. Alle Kosten, die der Verursacher nicht selbst trägt, werden als extern betrachtet.

Bei der Sicht Verkehrsteilnehmende steht die volkswirtschaftlich **effiziente** Nutzung der Strassen im Zentrum. Bei entsprechender **Internalisierung** der so ermittelten externen Kosten (Anlastung der externen Kosten auf die Verursachenden – Verursacherprinzip) kann das Ziel einer effizienten Nutzung der Verkehrswege erreicht werden. Aus verkehrswirtschaftlicher Sicht ist die Sicht Verkehrsteilnehmende zu favorisieren.

- **Sicht Verkehrsträger:** Im Gegensatz zur Sicht Verkehrsteilnehmende werden aus Sicht Verkehrsträger Kosten, die der eine Verkehrsteilnehmende dem anderen Verkehrsteilnehmenden verursacht, als intern angesehen. Externe Kosten ergeben sich bei dieser Sicht nur dann, wenn die Kosten ausserhalb des Verkehrsträgers anfallen, z.B. bei der Bevölkerung, bei den Steuerzahlenden oder bei einem Unternehmen.

Bei der Sicht Verkehrsträger geht es um die **Verteilung** der Kosten. Sie beantwortet die Frage, wie die Kosten zwischen Verkehrsteilnehmenden und Nicht-Verkehrsteilnehmenden aufgeteilt werden. Die Sicht zeigt auf, mit welchen Kosten die Nicht-Verkehrsteilnehmenden belastet werden. Für eine optimale Steuerung des Verkehrssystems ist sie nicht geeignet, da die externen Kosten zwischen den einzelnen Verkehrsteilnehmenden vernachlässigt werden.

Diese Unterscheidung ist nur bei den Unfallkosten, bei den Staukosten und bei den Trennungseffekten (Teil der Zusatzkosten in städtischen Räumen) relevant, weil in den anderen Kosten-

---

<sup>54</sup> Ecoplan (2012), Energiestrategie 2050 – volkswirtschaftliche Auswirkungen.

<sup>55</sup> Um die externen Kosten des Schwerverkehrs zu ermitteln, wird auch eine dritte Sichtweise – nämlich die Sicht Verkehrsart – verwendet. Dabei gelten alle Kosten als extern, die nicht bei der eigenen Verkehrsart anfallen. Im Unterschied zur Sicht Verkehrsträger werden also Kosten, die ein Lastwagen einem Personenwagen verursacht, als extern betrachtet, nicht so aber Kosten die innerhalb der gleichen Verkehrsart anfallen wie dies zwischen Lastwagen und Sattelschlepper bei einem Unfall stattfinden kann.

bereichen keine Kosten bei den anderen Verkehrsteilnehmern anfallen (bzw. berechnet werden). Im vorliegenden Bericht steht die (rechnerische) Internalisierung aller externen Kosten im Zentrum und damit die **Sicht Verkehrsteilnehmende**.<sup>56</sup>

---

<sup>56</sup> Im Rahmen der Berechnungen des ARE und in der Transportrechnung des BfS wird hingegen die Sicht Verkehrsträger eingenommen bzw. im Zusammenhang mit der LSVA (leistungsabhängige Schwerverkehrsabgabe) die Sicht Verkehrsart.

## 3 Herleitung von Kostensätzen für die Luftbelastung durch die Strom- und Wärmeproduktion

### 3.1 Vorgehen

Für die Abschätzung der externen Kostensätze pro Leistungseinheit der Stromerzeugungs- und Wärmeerzeugungstechnologien werden im Folgenden Kostensätze hergeleitet, die auf den im Verkehrsbereich vorgelegten Berechnungen zu den externen Kosten basieren. Damit erfolgt eine Aktualisierung der Berechnungen in EcoPlan (2012<sup>57</sup>). Es muss hier klar festgehalten werden, dass die nachfolgend präsentierten Berechnungen keine originäre Herleitung der externen Kosten der Luftbelastung im Energiebereich sind.

Die nachfolgende Aktualisierung für die luftverschmutzungsbedingten externen Kostensätze wird in drei Schritten vorgenommen:<sup>58</sup>

1. Herleitung der Emissionen von Luftschadstoffen (Kapitel 3.2): Es werden die Grundlagen für die Berechnung der externen Kosten pro Tonne Schadstoff zusammengestellt.
2. Herleitung der Kosten pro Tonne Schadstoff (Kapitel 3.3): In diesem Schritt werden die gesamten externen Kosten (vom ARE berechnet) auf die Emissionen der Luftschadstoffe angewandt und externe Kosten pro Tonne Schadstoff ermittelt. Dabei wird wo erforderlich auf Schwellenwerte eingegangen.
3. Herleitung von Emissionsfaktoren pro Leistungseinheit (z.B. pro kWh Strom oder pro TJ Wärme) und Berechnung der externen Kosten für verschiedene Stromerzeugungstechnologien (Kapitel 3.4), Wärmeproduktionstechnologien (Kapitel 3.5) und in der Produktion von Gütern (Kapitel 4), indem der Kostensatz aus Schritt 2 mit den entsprechenden Emissionsfaktoren multipliziert wird.

In allen Kapiteln wird zudem ein kurzer Vergleich mit den bisherigen Ergebnissen aus EcoPlan (2012)<sup>59</sup> gezeigt.

Zudem wird jeweils am Ende der Teilkapitel auf die Prognose bis 2060 eingegangen.

---

<sup>57</sup> EcoPlan (2012), Energiestrategie 2050 – volkswirtschaftliche Auswirkungen, Anhang C.

<sup>58</sup> Ein ähnliches Vorgehen wurde auch von Krewitt und Schlomann (2006) zur Berechnung der externen Kosten der Stromerzeugung gewählt.

<sup>59</sup> EcoPlan (2012), Energiestrategie 2050 – volkswirtschaftliche Auswirkungen, Anhang C.

## 3.2 Luftschadstoff-Emissionen

### PM<sub>10</sub>-Äquivalente als Leitschadstoff

Die externen Kosten im Bereich Luftbelastung sind direkt abhängig von den Schadstoffemissionen. Als Leitschadstoff gilt gemäss den aktuellsten epidemiologischen Erkenntnissen PM<sub>10</sub> (lungengängige Partikel mit einem Durchmesser von weniger als 10 µm).<sup>60</sup> Es interessieren also die primären PM<sub>10</sub>-Emissionen und die Vorläufersubstanzen für sekundäres PM<sub>10</sub>. Dies sind in erster Linie NO<sub>x</sub> (Stickoxide), SO<sub>2</sub> (Schwefeldioxid) und NH<sub>3</sub> (Ammoniak). Auch NMVOC (flüchtige Kohlenwasserstoffe ohne Methan) ist eine Vorläufersubstanz von PM<sub>10</sub>. In den im Folgenden verwendeten aktualisierten Datengrundlagen (basierend auf der ecoinvent-Datenbank) zu den Emissionen von Technologien der Stromproduktion (vgl. Kapitel 3.4) wird NMVOC jedoch vernachlässigt, so dass auch wir für unsere Berechnungen NMVOC vernachlässigen (fehlende Datengrundlagen). Die Ecoinvent-Datengrundlagen weisen PM<sub>10</sub>-Äquivalente aus, eine Aggregation der vier Schadstoffe PM<sub>10</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> und NH<sub>3</sub> (vgl. unten).<sup>61</sup> Deshalb verwenden auch wir PM<sub>10</sub>-Äquivalente als Leitschadstoff. In der folgenden Abbildung sind die Emissionen für die betrachteten vier Luftschadstoffe nach Territorialprinzip<sup>62</sup> im Jahr 2015 zusammengestellt.

### Geschätzte Emissionen

Insgesamt wurden im Jahr 2015 knapp 71'000 t NO<sub>x</sub> und gut 55'000 t NH<sub>3</sub> emittiert (vgl. Abbildung 3-1). Beim PM<sub>10</sub> sind die Emissionen mit rund 15'000 t deutlich tiefer. SO<sub>2</sub> wurden nur gut 6'200 t ausgestossen. Werden die vier Emittentengruppen Verkehr, Haushalte, Industrie und Gewerbe sowie Land- und Forstwirtschaft betrachtet, so zeigt sich, dass Industrie und Gewerbe beim SO<sub>2</sub> mit 69% die Hauptemittenten sind. Beim NO<sub>x</sub> ist der Verkehr mit 61% am bedeutendsten. Beim PM<sub>10</sub> sind die Verhältnisse ausgeglichener (Industrie und Gewerbe 36%, Verkehr 31%, Haushalte 19% und Land- und Forstwirtschaft 15%). Die Landwirtschaft ist vor allem beim NH<sub>3</sub> Hauptemittent mit 93%.

### Zusammenfassung der Schadstoffe zu PM<sub>10</sub>-Äquivalenten

Die Emissionen der betrachteten vier Schadstoffe können in sogenannte PM<sub>10</sub>-Äquivalente zusammengefasst werden. Die dazu verwendeten Umrechnungsfaktoren werden unten in Abbildung 3-1 angegeben. Dabei bedeutet z.B. der Wert beim NO<sub>x</sub>, dass eine Tonne NO<sub>x</sub> zu 0.22 Tonnen (sekundärem) PM<sub>10</sub> führt. Mit Hilfe dieser Umrechnungsfaktoren kann man berechnen, dass im Jahr 2015 insgesamt knapp 50'000 Tonnen PM<sub>10</sub>-Äquivalent ausgestossen wurden (vgl. zweitletzte Spalte in Abbildung 3-1). Hauptemittent ist mit 41% die Land- und Forstwirtschaft. Weiter werden 30% der PM<sub>10</sub>-Äquivalente durch den Verkehr ausgestossen, 20% durch

---

<sup>60</sup> Bei der Berechnung der Gesundheitskosten der Luftverschmutzung wird das Ozon vernachlässigt (bei Ernteausfällen und Waldschäden nicht), was zu einer Unterschätzung der Gesundheitskosten in der Grössenordnung von weniger als 0.6% führen dürfte (Ecoplan, Infrast 2014, Externe Effekte des Verkehrs 2010, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten, S. 133).

<sup>61</sup> Für eine Verwendung der PM<sub>10</sub>-Äquivalente siehe z.B. auch ESU-services und PSI (2012), Umweltauswirkungen der Stromerzeugung in der Schweiz.

<sup>62</sup> Gemäss Territorialprinzip werden alle Emissionen auf Schweizer Territorium berücksichtigt.

Industrie und Gewerbe und 9% durch Haushalte. Die Elektrizitätsproduktion verursacht insgesamt 40 Tonnen PM<sub>10</sub>-Äquivalente (0.1% des Totals), die Wärmeproduktion (alle Feuerungen und Fernwärme) 4'924 Tonnen (10%). Vom Total von knapp 50'000 t PM<sub>10</sub>-Äquivalenten stammen 36% von NH<sub>3</sub>, 31% von NO<sub>x</sub>, 30% von PM<sub>10</sub> und 3% von SO<sub>2</sub>.

Gegenüber den bisherigen Berechnungen haben die Emissionen der vier Schadstoffe zwischen 2009 und 2015 teilweise deutlich abgenommen (PM<sub>10</sub> um 26%, NO<sub>x</sub> um 17%, SO<sub>2</sub> um 51% und NH<sub>3</sub> um 12%). Dies Abnahmen sind aber nicht nur auf Veränderungen über die Zeit zurückzuführen, sondern auch auf methodische Anpassungen bei der Erhebung der Emissionen (bei PM<sub>10</sub> sind ca. 76% der Abnahme auf methodische Anpassungen zurückzuführen, bei NO<sub>x</sub> ca. 23%, bei SO<sub>2</sub> ca. 33% und bei NH<sub>3</sub> ca. 72%).<sup>63</sup>

---

<sup>63</sup> Damit verbleibt insbesondere beim Schwefel eine deutliche Reduktion über die Zeit, welche auf die Einführung eines tieferen Schwefel-Gehalt-Grenzwert 2008 bei Heizöl und Senkung der Grenzwerte für Treibstoffe 2009 / 2010 zurückzuführen sein dürfte (Auskunft des BAFU).

Abbildung 3-1: Emissionen von primärem PM<sub>10</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> und PM<sub>10</sub>-Äquivalente in der Schweiz (Territorialprinzip) im Jahr 2015 (in Tonnen)

	PM10	NOx	SO2	NH3	PM10-Äquivalente	
<b>Verkehr</b>	<b>4'626</b>	<b>43'088</b>	<b>681</b>	<b>1'508</b>	<b>14'724</b>	<b>29.7%</b>
Strassenverkehr	3'284	34'611	85	1'507	11'398	23.0%
Schienenverkehr	1'260	392	0	0	1'346	2.7%
Flugverkehr	37	6'556	554	0	1'590	3.2%
Schifffahrt	45	1'528	42	1	390	0.8%
						0.0%
<b>Haushalte</b>	<b>2'854</b>	<b>5'415</b>	<b>1'179</b>	<b>1'105</b>	<b>4'634</b>	<b>9.3%</b>
Feuerungen Öl und Gas	21	3'587	897	0	990	2.0%
Feuerungen Holz und Kohle	1'340	1'641	248	58	1'769	3.6%
Rest	1'493	187	34	1'047	1'876	3.8%
						0.0%
<b>Industrie und Gewerbe</b>	<b>5'359</b>	<b>15'488</b>	<b>4'326</b>	<b>1'157</b>	<b>10'002</b>	<b>20.2%</b>
Industrie Steine Erden	368	3'686	1'290	211	1'504	3.0%
Abfallindustrie	46	1'750	248	712	708	1.4%
Baugewerbe	2'251	2'288	3	1	2'755	5.6%
Industrielle Maschinen	51	922	1	0	254	0.5%
Raffinerien	32	489	755	0	291	0.6%
Prozesse weitere	1'470	1'327	1'052	173	2'027	4.1%
Elektrizität	10	115	14	5	40	0.1%
Fernwärme	23	391	32	10	119	0.2%
Feuerungen Industrie	337	1'613	434	23	786	1.6%
Feuerungen GD	513	2'689	495	22	1'211	2.4%
Industrie Gewerbe andere	259	218	2	0	307	0.6%
						0.0%
<b>Land- und Forstwirtschaft</b>	<b>2'234</b>	<b>6'599</b>	<b>45</b>	<b>51'673</b>	<b>20'230</b>	<b>40.8%</b>
Nutztierhaltung	662	981	0	26'197	9'261	18.7%
Feuerungen	32	74	9	2	51	0.1%
Maschinen Geräte	306	2'662	2	1	892	1.8%
Rest (Felder, Hof- und Handelsdünger)	1'234	2'882	33	25'473	10'026	20.2%
<b>Gesamttotal</b>	<b>15'073</b>	<b>70'590</b>	<b>6'231</b>	<b>55'443</b>	<b>49'590</b>	<b>100.0%</b>
1t Emissionen ergeben x t PM10-Äquivalente	1.00	0.22	0.20	0.32		

Quelle: Datenlieferung des BAFU (Submission 2019 für 2015) bzw. ecoinvent (ESU-Services) für Umrechnungsfaktoren in PM<sub>10</sub>-Äquivalente. Die Daten basieren auf Erhebungen, Annahmen und komplexen Modellrechnungen. Diese sind mit zum Teil mit grossen Unsicherheiten verbunden.

### 3.3 Externe Kosten pro Tonne PM<sub>10</sub>-Äquivalent

#### a) Methodik

Die spezifischen externen Kosten pro Tonne PM<sub>10</sub>-Äquivalent wurde wie folgt bestimmt:

$$\text{Spezifische externe Kosten [CHF / Tonne]} = \frac{\text{externe Kosten Luftbelastung Schweiz [CHF]}}{\text{Gesamtemissionen Schweiz [Tonnen]}}$$

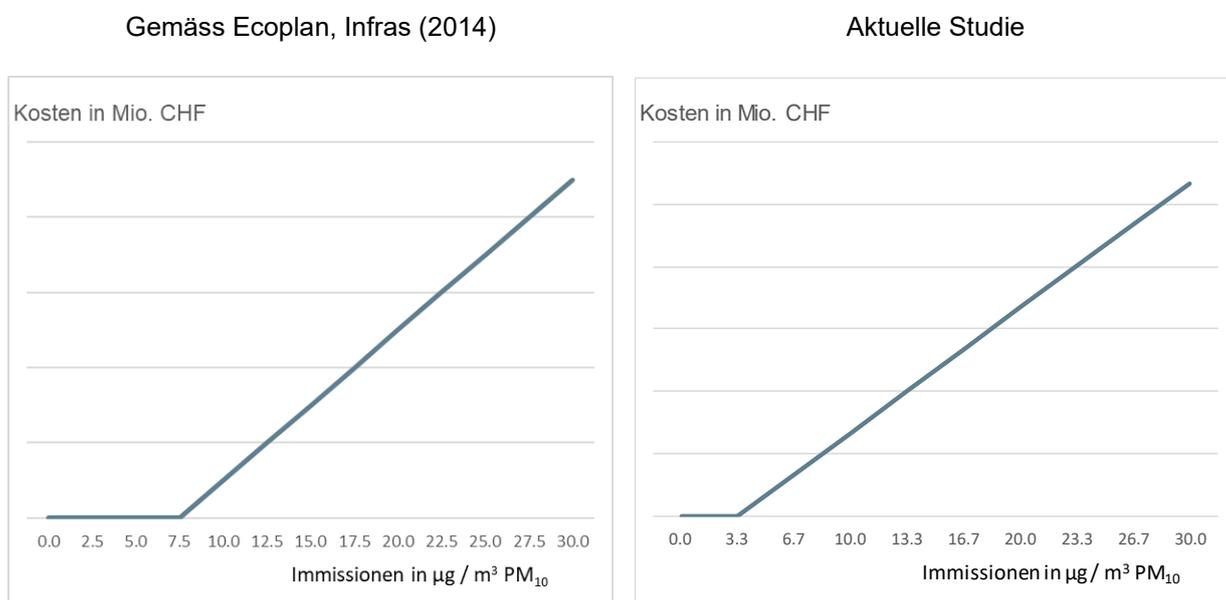
Dabei ist zuerst zu überlegen, wie mit Schwellenwerten in der Berechnung der externen Kosten umzugehen ist.

#### b) Schwellenwerte

##### Gesundheitskosten der Luftbelastung

Bei der Berechnung der Gesundheitskosten durch Luftverschmutzung wurden in bisherigen Studien negative Auswirkungen auf die Gesundheit erst ab einem Schwellenwert von 7.5 µg PM<sub>10</sub> / m<sup>3</sup> berücksichtigt (vgl. folgende Abbildung).<sup>64</sup> Belastungen unterhalb dieser Schwelle wurden somit nicht quantifiziert.

Abbildung 3-2: Zusammenhang zwischen Gesundheitskosten und PM<sub>10</sub>-Immissionen



Für die Berechnung der Gesundheitskosten des Verkehrs ging man davon aus, dass man sich über dem Schwellenwert von 7.5 µg PM<sub>10</sub> / m<sup>3</sup> befindet, so dass die vollen Grenzkosten aus-

<sup>64</sup> Ecoplan, Infrac (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten, S. 134.

gewiesen wurden (nur steigende Funktion über  $7.5 \mu\text{g PM}_{10} / \text{m}^3$ ). Der Schwellenwert war deshalb in den Berechnungen für das ARE<sup>65</sup> nur beim Ausweis der gesamten Kosten der Luftbelastung (inkl. Industrie, Haushalte etc.) von Bedeutung.

Es gibt bisher keine Anzeichen, dass die Luftverschmutzung unterhalb dieses Schwellenwertes unbedenklich ist.<sup>66</sup> Trotzdem werden in Ecoplan, Infrac (2014)<sup>67</sup> und damit auch in Infrac, Ecoplan (2019)<sup>68</sup> bei der Abschätzung der Auswirkungen für die gesamte Luftbelastung gemäss dem At-least-Ansatz nur Gesundheitsschäden ab einer Schwellenwert von  $7.5 \mu\text{g} / \text{m}^3$  quantifiziert, da für tiefere Konzentrationen bisher noch keine epidemiologischen Untersuchungen vorlagen.<sup>69</sup>

Da dieser Schwellenwert bei potentiell tiefen Luftbelastungen im ZERO-Szenario von grosser Bedeutung sein könnte, wurde die Höhe des Schwellenwertes mit den existierende Literatur geprüft und aktualisiert. So konnte mit Hilfe des «Swiss Tropical and Public Health Institute» der Universität Basel neuere epidemiologische Literatur zu den Schwellenwerten gefunden werden: In der renommierten «Global Burden of Disease»-Studie wurde für  $\text{PM}_{2.5}$  ein Schwellenwert von  $2.4 \mu\text{g} / \text{m}^3$  gewählt.<sup>70</sup> Dies entspricht der tiefsten Konzentration, für die Studien einen Zusammenhang belegen konnten.<sup>71</sup> Rechnet man diesen Schwellenwert für  $\text{PM}_{2.5}$  mit dem Schweizer Verhältnis von  $\text{PM}_{2.5} / \text{PM}_{10}$  um, ergibt sich ein Schwellenwert für  $\text{PM}_{10}$  von  $3.3 \mu\text{g} / \text{m}^3$ .<sup>72</sup> **Wie verwenden deshalb neu den Schwellenwert von  $3.3 \mu\text{g} / \text{m}^3$ .**

Wie erläutert gibt es keine Studien, die zeigen, dass unterhalb des Schwellenwertes keine Schäden auftreten. Der Schwellenwert ist vielmehr eine vorsichtige Annahme bei der Ermittlung der externen Kosten. Es ist aber unwahrscheinlich, dass ab einer Konzentration von  $3.3 \mu\text{g} / \text{m}^3$  die Gesundheitskosten linear zunehmen und unter dem Schwellenwert der Zusammenhang nicht existiert. Es scheint plausibler zu sein, dass auch unterhalb dieser Schwelle ein Zusammenhang zwischen Schadstoffbelastung und Gesundheitsschäden besteht. Dazu gibt

---

<sup>65</sup> Infrac, Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015, Aktualisierung der Berechnungen von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten des Strassen-, Schienen-, Luft- und Schiffsverkehrs 2010 bis 2015

<sup>66</sup> Deshalb könnte man auch von Bezugswert oder Referenzwert statt Schwellenwert sprechen, da es keine Hinweise auf eine Schwelle gibt – wir bleiben hier aber beim gebräuchlichen Term «Schwellenwert».

<sup>67</sup> Ecoplan, Infrac (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten.

<sup>68</sup> Infrac, Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015, Aktualisierung der Berechnungen von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten des Strassen-, Schienen-, Luft- und Schiffsverkehrs 2010 bis 2015..

<sup>69</sup> Ecoplan, Infrac (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten, S. 162 und Ecoplan, et al. (2004), Externe Gesundheitskosten durch verkehrsbedingte Luftverschmutzung in der Schweiz, S. 39.

<sup>70</sup> Burnett et al. (2018), Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter, S. 9594.

<sup>71</sup> So z.B. Beelen et al. (2014), Effects of long-term exposure to air pollution on natural-cause mortality und Liu et al. (2019), Ambient Particulate Air Pollution and Daily Mortality in 652 Cities.

<sup>72</sup> Mit diesem Schwellenwert wird in einer aktuellen Studie für die Schweiz gerechnet (mit Mitarbeitern des BAFU als Coautoren: Castro et al. 2020, Comparing the lung cancer burden of ambient particulate matter using scenarios of air quality standards versus acceptable risk levels), wobei auch der bisherige Schwellenwert von  $7.5 \mu\text{g} / \text{m}^3$  erwähnt wird und bewusst davon abgewichen wird.

es aber keine wissenschaftlichen Grundlagen. Entsprechend wird kein Zusammenhang unterhalb von  $3.3 \mu\text{g} / \text{m}^3$  unterstellt, obwohl der Zusammenhang bei tiefen Belastungsniveaus eher steiler (nicht flacher) ist.<sup>73</sup>

Da die Herleitung der Kosten im Jahr 2015 auf einer mittleren bevölkerungsgewichteten Konzentration von  $15.738 \mu\text{g} / \text{m}^3$  ausgeht, bedeutet dies, dass bei einer Reduktion der gesamten Immissionen um  $12.438 \mu\text{g} / \text{m}^3 \text{PM}_{10}$  in der Schweiz – was einer Verminderung um 79.03% entspricht – der Schwellenwert von  $3.3 \mu\text{g} / \text{m}^3$  erreicht wird, und unterhalb dieses Schwellenwerts keine (externen) Kosteneinsparung mehr berechnet werden darf. Mit anderen Worten: Fällt die Reduktion der Emissionen von  $\text{PM}_{10}$  höher als 79.03% der heutigen Emissionen aus, so werden keine zusätzlichen Sekundärnutzen mehr berechnet für eine weitere Reduktion der Luftbelastung.

In der praktischen Umsetzung ist mit diesem Schwellenwert wie folgt umzugehen: Es wird gerechnet als gäbe es keinen Schwellenwert. Am Ende wird die Veränderung der Emissionen untersucht. Sollte diese höher als 79.03% ausfallen, so müssen die Gesundheitsnutzen entsprechend reduziert werden.

Es ist zudem kritisch anzumerken, dass die Berechnung der Kosten der Luftbelastung auf der Annahme beruht, dass der Import und der Export von Luftschadstoffen sich die Waage halten (vgl. Kapitel 2.1): Die Schweizer Emissionen werden durch Winde in unsere Nachbarländer (und weiter) transportiert, während die Schäden der Luftbelastung in der Schweiz teilweise auf Emissionen aus dem Ausland beruhen. Würden die Emissionen in der Schweiz deutlich reduziert, im Ausland aber nicht (oder weniger deutlich), so wäre die Abnahme der Gesundheitskosten der Luftbelastung in der Schweiz geringer als hier berechnet. Für die Berechnungen unterstellen wir also implizit, dass das Ausland sich gleich verhält wie die Schweiz, so dass die Annahme eines ausgeglichenen Imports und Exports von Luftschadstoffen weiterhin Gültigkeit hat. Je nach betrachtetem Szenario in den Energieperspektiven 2050+ unterstellen wir also implizit ein dem Szenario entsprechendes Verhalten im Ausland.<sup>74</sup>

### **Gebäudeschäden und übrige Kosten der Luftbelastung**

Die Gebäudeschäden setzen sich aus drei Kostenbestandteilen zusammen, aus erhöhten Renovations- bzw. Reinigungskosten an verkehrsexponierten Standorten sowie kürzeren Lebensdauern an nicht verkehrsexponierten Standorten. Bei den kürzeren Lebensdauern gibt es

---

<sup>73</sup> Burnett et al. (2018), Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter, S. 9594.

<sup>74</sup> Beim ZERO -Szenario ist dies eine sinnvolle Annahme: Denn in der Klimapolitik entspricht die langfristige Zielsetzung von ZERO bis 2050 den Anforderungen des Übereinkommens von Paris. Diesen Anforderungen müssen auch die übrigen Vertragsparteien nachkommen. Einige Staaten und auch EU (vgl. European Green Deal) haben sich bereits vergleichbare Ziele gesetzt und diese teilweise bereits im Rahmen von langfristigen Klimastrategien konkretisiert. Jene, die dies noch nicht getan haben, werden in den nächsten Jahren nachziehen müssen, wenn sie die Vorgaben des Übereinkommens von Paris einhalten wollen. Insofern kann davon ausgegangen werden, dass längerfristig alle Vertragsparteien ähnliche Anstrengungen unternehmen wie die Schweiz.

ebenfalls einen Schwellenwert, da unter ca.  $15.5 \mu\text{g} / \text{m}^3$  keine Schäden mehr berechnet werden.<sup>75</sup> Die Kosten der verkürzten Lebensdauer betragen im Verkehr allerdings lediglich 8.6 Mio. CHF oder 3.4% der gesamten Kosten der Gebäudeschäden. Wir verzichten deshalb vereinfachend darauf, diesen Schwellenwert miteinzubeziehen, da sich dadurch die Kosten kaum verändern, der Aufwand für die Berechnung jedoch deutlich steigen würde.

Bei den Ernteaussfällen, Waldschäden und Biodiversitätsverlusten werden in den Studien für das ARE keine Schwellenwerte berücksichtigt.<sup>76</sup> Entsprechend werden auch für die eingesparten Kosten bei einer Verminderung der Luftverschmutzung keine Schwellenwerte verwendet.

### c) Kosten der Luftbelastung im Jahr 2015

Im Folgenden werden die gesamten externen Kosten durch die Luftbelastung im Jahr 2015 ermittelt (vgl. oberer Teil der Abbildung 3-3 – diese und alle folgenden CHF-Werte immer zu Preisstand 2015):

- **Gesundheitskosten:** In den Berechnungen der externen Effekte für das ARE<sup>77</sup> werden auch die gesamten Gesundheitskosten durch die Luftbelastung in der Schweiz ermittelt (inkl. von Haushalten, Industrie und Landwirtschaft verursachten Schäden). Bei der Berechnung wurde eine Belastungs-Wirkungs-Beziehung verwendet, die aufzeigt, wie stark die Krankheitsfälle bzw. Todesfälle zunehmen, wenn die Belastung um 10 Mikrogramm  $\text{PM}_{10} / \text{m}^3$  zunimmt. Damit wird die lineare Steigung in Abbildung 3-2 bestimmt. Bei der Berechnung der gesamten Gesundheitskosten wurde aber wie oben erläutert angenommen, dass die Schadensgrenze bei  $7.5 \mu\text{g} \text{PM}_{10} / \text{m}^3$  liegt, d.h. dass eine  $\text{PM}_{10}$ -Schadstoffkonzentration unterhalb dieser Grenze keine Gesundheitsschäden anrichtet (vgl. Abbildung 3-2). Hier sollen nicht die durchschnittlichen Kosten pro Tonne  $\text{PM}_{10}$  berechnet werden, sondern die zusätzlichen Kosten für eine zusätzliche Tonne  $\text{PM}_{10}$ , d.h. die sogenannten Grenzkosten. (Der neue Schwellenwert von  $3.3 \mu\text{g} \text{PM}_{10} / \text{m}^3$  spielt hier noch keine Rolle – dessen Verwendung wird unten in Abschnitt d) erläutert.) Die berechneten Gesundheitskosten von 6.5 Mrd. CHF im Jahr 2015 beruhen auf Immissionen von  $8.24 \mu\text{g} \text{PM}_{10} / \text{m}^3$  (nämlich der Immission im Berechnungsmodell von  $15.74 \mu\text{g} \text{PM}_{10} / \text{m}^3$  abzüglich der Schadensgrenze von  $7.5 \mu\text{g} \text{PM}_{10} / \text{m}^3$ ). Für die Berechnung der Grenzkosten ist es am einfachsten die externen Gesundheitskosten ohne Schadensuntergrenze (bzw. mit einer Schadensuntergrenze von  $0 \mu\text{g} \text{PM}_{10} / \text{m}^3$ ) zu berechnen. Diese betragen knapp 12.5 Mrd. CHF (=  $6.5 \text{ Mrd. CHF} / 8.24 \mu\text{g} \text{PM}_{10} / \text{m}^3 * 15.74 \mu\text{g} \text{PM}_{10} / \text{m}^3$ ).
- **Gebäudeschäden:** Durch den Verkehr entstanden im Jahr 2015 insgesamt Gebäudeschäden von 250 Mio. CHF.<sup>78</sup> Durch die Luftbelastung ausserhalb des Verkehrs kommen noch

<sup>75</sup> Ecoplan, Infrac (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten.

<sup>76</sup> Allerdings werden in diesen Bereichen nur die Kosten des Verkehrs bestimmt, nicht der gesamten Luftbelastung – und beim Verkehr allein gibt es auch bei den Gesundheitskosten keinen Schwellenwert (vgl. oben).

<sup>77</sup> Infrac, Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten, S. 37.

<sup>78</sup> Infrac, Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten, S. 42.

weitere Kosten für die Verkürzung der Lebensdauer der Fassaden dazu, so dass die Gebäudeschäden durch die gesamte Luftbelastung sich insgesamt auf 316 Mio. CHF belaufen.<sup>79</sup>

**Abbildung 3-3: Berechnung der externen Grenzkosten für Luftbelastung im Jahr 2015**

<b>Externe Kosten in Mio. CHF</b>			
Gesundheitskosten, Jahr 2015 (Schadensgrenze 7.5 µg/m <sup>3</sup> )	6'534	Mio. CHF	
Gesundheitskosten, Jahr 2015 (Schadensgrenze 0 µg/m <sup>3</sup> )	12'482	Mio. CHF	
Gebäudeschäden, Jahr 2015	316	Mio. CHF	
Ernteaufälle, Jahr 2015	115	Mio. CHF	
Waldschäden, Jahr 2015	217	Mio. CHF	
Biodiversitätsverluste, Jahr 2015	1'075	Mio. CHF	
<b>Total externe Kosten Luftbelastung mit Schadensgrenze 7.5 µg/m<sup>3</sup></b>	<b>8'256</b>	<b>Mio. CHF</b>	
<b>Total externe Kosten Luftbelastung mit Schadensgrenze 0 µg/m<sup>3</sup></b>	<b>14'204</b>	<b>Mio. CHF</b>	
<b>Berechnung externe Kosten pro Tonne PM10-Äquivalente</b>			
Schadensgrenze Basisrechnung ARE	7.50	µg/m <sup>3</sup>	
Schadensgrenze für Berechnung Grenzkosten	0.00	µg/m <sup>3</sup>	
Konzentrationswert Immissionen, Jahr 2015	15.74	µg/m <sup>3</sup>	
Total PM10-Äquivalente, Jahr 2015	52'300	Tonnen	
Externe Grenzkosten für PM10-Äquivalente	<b>272'000</b>	CHF/Tonne	
Dies bedeutet: Kosten pro Tonne		Umrechnungsfaktor	
PM10	1.00	272'000	CHF/Tonne
NOX	0.22	59'840	CHF/Tonne
SO2	0.20	54'400	CHF/Tonne
NH3	0.32	87'040	CHF/Tonne

- **Ernteaufälle:** Die externen Kosten im Bereich Ernteaufälle wurden für den Verkehr detailliert ermittelt (vgl. Abbildung 5-2 unten). Die Ergebnisse zeigen, dass im Strassen-, Schienen-, Luft- und Schiffsverkehr im Jahr 2015 insgesamt Kosten von 64 Mio. CHF angefallen sind. Die Ernteaufälle werden durch Ozon verursacht, welches aus den Vorläufersubstanzen NO<sub>x</sub> und VOC (flüchtige organische Kohlenwasserstoffverbindungen) entsteht. Untersuchungen haben ergeben, dass in ländlichen Gebieten die Ozonbildung NO<sub>x</sub> -

<sup>79</sup> Eigene Berechnung basierend auf Infrac, EcoPlan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015, Aktualisierung der Berechnungen von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten des Strassen-, Schienen-, Luft- und Schiffsverkehrs 2010 bis 2015.

limitiert ist, d.h. in der Luft ist so viel VOC, dass  $\text{NO}_x$  der limitierende Faktor bei der Ozonbildung ist. Deshalb gehen wir wie Infrac<sup>80</sup> davon aus, dass  $\text{NO}_x$  die entscheidende Vorläufersubstanz ist. Folglich werden die Ernteauffälle durch den Nicht-Verkehr (Haushalte, Industrie und Gewerbe sowie Land- und Forstwirtschaft) über die  $\text{NO}_x$ -Emissionen berechnet: Die Kosten im Verkehr werden durch die in den Berechnungen unterstellten Emissionen dividiert und mit den Emissionen im Nicht-Verkehr<sup>81</sup> multipliziert. Daraus ergeben sich Kosten im Nicht-Verkehr von 51 Mio. CHF bzw. insgesamt Kosten von 115 Mio. CHF.

- **Waldschäden:** Im Verkehrsbereich wurden die Waldschäden detailliert berechnet und betragen 59 Mio. CHF.<sup>82</sup> Im Rahmen der Berechnungen wurden zuerst die gesamten Waldschäden quantifiziert und daraus dann der Anteil des Verkehrs abgeleitet. Die gesamten Waldschäden der Luftbelastung können damit aus den Berechnungen abgelesen werden und betragen 217 Mio. CHF.<sup>83</sup>
- **Biodiversitätsverluste:** Die Biodiversitätsverluste durch den Verkehr betragen 127 Mio. CHF.<sup>84</sup> Sie wurden über Kostensätze pro Tonne Schadstoff für drei Schadstoffe ermittelt: 2'818 CHF / t  $\text{NO}_x$ , 908 CHF / t  $\text{SO}_2$  und 14'622 CHF / t  $\text{NH}_3$ . Diese Kostensätze könne auch für die Kosten des Nicht-Verkehrs verwendet werden, was – unter Verwendung der Emissionen aus Infrac, Ecoplan (2019) – zu Kosten von 948 Mio. CHF führt, so dass gesamthaft Biodiversitätsverluste von 1'075 Mio. CHF entstehen. Die Kosten im Nicht-Verkehr sind vergleichsweise hoch, weil insbesondere in der Land- und Forstwirtschaft sehr hohe  $\text{NH}_3$ -Emissionen entstehen.

#### d) Externe Kosten pro Tonne $\text{PM}_{10}$ -Äquivalent

Die Summe der externen Kosten dieser fünf Bereiche der Luftbelastung (Gesundheitskosten mit Schadensgrenze  $0 \mu\text{g PM}_{10} / \text{m}^3$ ) kann nun durch die Emissionen von  $\text{PM}_{10}$ -Äquivalenten dividiert werden, um die Grenzkosten pro Tonne  $\text{PM}_{10}$ -Äquivalent zu bestimmen. Dabei werden nicht die in Abbildung 3-1 hergeleiteten knapp 50'000 Tonnen  $\text{PM}_{10}$ -Äquivalente verwendet, sondern die in den Berechnungen der externen Kosten verwendeten Emissionen von  $\text{PM}_{10}$ -Äquivalenten, da diese den berechneten Kosten zugrunde liegen. Diese liegen mit 52'300 Tonnen etwas höher als in Abbildung 3-1, was darauf zurückzuführen ist, dass ältere Datengrundlagen für 2015 verwendet wurden (vgl. Abbildung 3-3). Es ergeben sich 272'000 CHF pro

---

<sup>80</sup> Infrac (2006), Externe Kosten des Strassen- und Schienenverkehrs 2000. Klima und nicht erfasste Umweltbereiche sowie vor- und nachgelagerte Prozesse, S. 64-65 und Ecoplan, Infrac (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten, S. 190.

<sup>81</sup> Gemäss den Berechnungen in Infrac, Ecoplan (2019, Externe Effekte des Verkehrs 2015, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten). Es müssen diese Emissionen verwendet werden, da anschliessend bei der Berechnung des Kostensatzes durch die Emissionen aus Ecoplan (2019) dividiert wird.

<sup>82</sup> Infrac, Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015, Aktualisierung der Berechnungen von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten des Strassen-, Schienen-, Luft- und Schiffsverkehrs 2010 bis 2015.

<sup>83</sup> Infrac, Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015, Aktualisierung der Berechnungen von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten des Strassen-, Schienen-, Luft- und Schiffsverkehrs 2010 bis 2015.

<sup>84</sup> Infrac, Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015, Aktualisierung der Berechnungen von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten des Strassen-, Schienen-, Luft- und Schiffsverkehrs 2010 bis 2015.

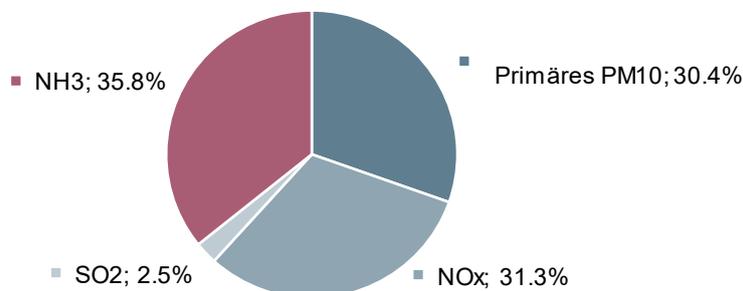
Tonne PM<sub>10</sub>-Äquivalent (vgl. mittlerer Teil der Abbildung 3-3). Aufgrund der Umrechnungsfaktoren in PM<sub>10</sub>-Äquivalente lassen sich daraus die Kosten pro Tonne Schadstoff berechnen: Diese betragen für PM<sub>10</sub> 272'000 CHF, für NO<sub>x</sub> 60'000 CHF, für SO<sub>2</sub> 54'000 CHF und für NH<sub>3</sub> 87'000 CHF (vgl. unterer Teil der Abbildung 3-3).

Fallen im Szenario ZERO die Luftschadstoffemissionen unter den PM<sub>10</sub>-Schwellenwert von 3.3 µg / m<sup>3</sup> (entspricht einer Abnahme der PM<sub>10</sub>-Emissionen um 79.03%), so ist wie folgt vorzugehen: Nehmen wir an, die Abnahme betrage 85%.<sup>85</sup> Damit wäre die Abnahme um 5.97 Prozentpunkte (= 85% – 79.03%) bzw. um 7.55% (= 85% / 79.03% – 1) höher als der Schwellenwert. Da der Kostensatz von 272'000 CHF pro Tonne PM<sub>10</sub>-Äquivalent zu 87.9% auf Gesundheitskosten beruht, müssen die berechneten Sekundäreffekte durch die Abnahme der Luftbelastung um 6.64% (= 7.55% \* 87.9%) reduziert werden. Der Schwellenwert wird also erst ganz am Schluss berücksichtigt.

### Externe Kosten Luftbelastung – hauptverantwortlich sind NH<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub> und primäres PM<sub>10</sub>

Verbindet man diese Kostensätze mit den Emissionen in Abbildung 3-1, so zeigt sich (vgl. folgende Abbildung), dass NH<sub>3</sub> mit 36% den höchsten Anteil an den Schäden verursacht. NO<sub>x</sub> und primäres PM<sub>10</sub> folgen dicht dahinter mit je ca. 31%. SO<sub>2</sub> ist hingegen aufgrund der vergleichsweise tiefen Emissionen nur für 2.5% der Schäden verantwortlich.

Abbildung 3-4: Anteil der Luftschadstoffe an den externen Kosten der Luftbelastung



### Vergleich mit dem Ausland

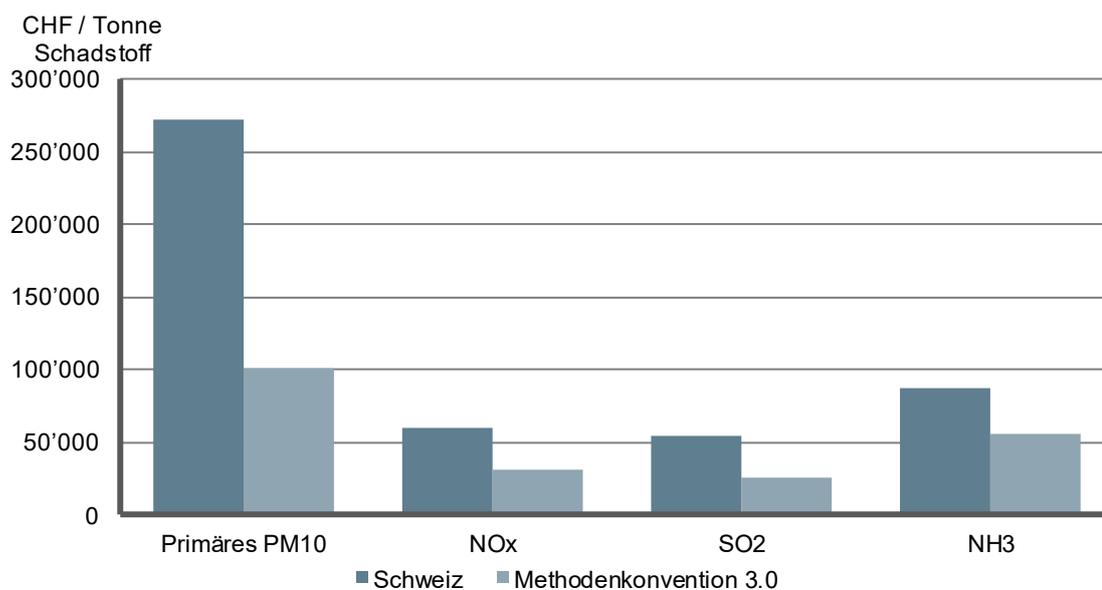
Die folgende Abbildung zeigt einen Vergleich der Kostensätze mit aktuellen Kostensätzen, die in der deutschen Methodenkonvention 3.0 verwendet werden.<sup>86</sup> Der Vergleich zeigt, dass die Schweizer Werte je nach Schadstoff 1.6- bis 2.7-mal höher sind als die deutschen Werte. Es ist allerdings zu beachten, dass in Deutschland zusätzlich noch NMVOC berücksichtigt wird

<sup>85</sup> Diese Abnahme kann entweder über Schadstoffemissionen bestimmt werden oder (wohl einfacher) über die Kosten der Luftbelastung, denn es wird ein konstanter Kostensatz verwendet. Bei diesem Vergleich müssen die Gesamtkosten der Luftbelastung betrachtet werden (inkl. Verkehr, Industrie etc.).

<sup>86</sup> Umweltbundesamt (2019), Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten. Kostensätze.

(3'500 CHF pro Tonne NMVOC) und dass in Deutschland die Waldschäden fehlen. Der Hauptgrund für die Unterscheide liegt aber in einem nur gut halb so hohen VOSL (value of statistical life), der in Deutschland zur Anwendung kommt.<sup>87</sup> Der VOSL ist eine wichtige Grundlage zur Quantifizierung der Gesundheitskosten.

Abbildung 3-5: Vergleich der Kostensätze Schweiz – Deutschland



Die Werte aus der deutschen Methodenkonvention wurden mit Wechselkurs und Kaufkraftparität auf die Schweiz angepasst. In Deutschland wurde PM<sub>2,5</sub>, nicht PM<sub>10</sub> bewertet.

### Vergleich zu bisherigen Werten

Im Folgenden soll der neue Kostensatz pro Tonne PM<sub>10</sub>-Äquivalent noch mit den bisherigen Ergebnis aus Ecoplan (2012<sup>88</sup>) verglichen werden. Bisher wurde mit einem Wert von 162'000 CHF / t PM<sub>10</sub>-Äquivalent gerechnet. Der aktualisierte Wert von 272'000 CHF liegt damit um 68% höher. Dies ist vor allem auf die neu deutlich höhere Schätzung des VOSL zurückzuführen. Zudem werden neu die Biodiversitätsverluste miteinbezogen, die bisher noch fehlten (ohne Biodiversitätsverluste würde die Zunahme nur 55% anstatt 68% betragen). Gebäudeschäden, Ernteauffälle und Waldschäden haben hingegen abgenommen. Bei den Gesundheitskosten wurde aufgrund neuer Studienergebnisse die Expositions-Wirkungs-Beziehung

<sup>87</sup> Leider fehlen in der Methodenkonvention Angaben zum verwendeten VOSL (sowohl in Umweltbundesamt 2019, Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten. Kostensätze), als auch in Umweltbundesamt 2018, Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten. Methodische Grundlagen). Auf Nachfrage bei den Autoren konnten wir den verwendeten VLYL (value of life year lost, der aus dem VOSL berechnet werden kann) doch ermitteln und mit dem Schweizer Wert für den VLYL vergleichen.

<sup>88</sup> Ecoplan (2012), Energiestrategie 2050 – volkswirtschaftliche Auswirkungen, Anhang C.

der verlorenen Lebensjahre zudem um 24% reduziert.<sup>89</sup> Schliesslich ist die Zunahme teilweise auf die Preiszunahme (Inflation, Nominallohnwachstum) zwischen 2009 und 2015 zurückzuführen. Die Veränderung im Kostensatz kann damit durch diverse Anpassungen in den Berechnungsgrundlagen erklärt werden.

#### e) Prognose bis 2060 für externe Kosten pro Tonne PM<sub>10</sub>-Äquivalent

Wie verändert sich der Kostensatz von 272'000 CHF pro Tonne PM<sub>10</sub>-Äquivalent im Jahr 2015 über die Zeit? Um diese Frage zu klären kann auf Ecoplan (2020<sup>90</sup>) zurückgegriffen werden. Dort wurde diese Frage untersucht und wie folgt beantwortet:

- Gesundheitskosten: Zunahme mit Reallohnwachstum und dem Bevölkerungswachstum
  - Die Zunahme mit dem Reallohnwachstum erfolgt, weil die Bewertung der Gesundheitsschäden (insbesondere der VOSL) mit dem Lohn zunimmt. Steigt die Bevölkerung, leiden mehr Personen unter derselben Luftbelastung und es entstehen höhere Kosten.
  - Für das Reallohnwachstum werden die langfristigen BIP-Szenarien des SECO verwendet. Für das Bevölkerungswachstum werden die Bevölkerungsszenarien des BFS herangezogen (beides wie im Gleichgewichtsmodell).
- Gebäudeschäden: Die Gebäudeschäden steigen mit der Zunahme der Gebäudeflächen.
- Bei den Vegetationsschäden wird von konstanten Kostensätzen ausgegangen.

Aus Abbildung 3-3 geht hervor, dass 88% des Kostensatzes für PM<sub>10</sub>-Äquivalente auf den Gesundheitskosten beruht. Die Gebäudeschäden sind jedoch nur für 2.2% des Kostensatzes verantwortlich. Deshalb schlagen wir vereinfachend vor, den Kostensatz für PM<sub>10</sub>-Äquivalente analog zu den Gesundheitskosten entsprechend dem Reallohn- und Bevölkerungswachstum fortzuschreiben (**88% des Reallohnwachstum und 88% des Bevölkerungswachstums**). Das Wachstum der Gebäudeschäden wird dadurch vernachlässigt.

### 3.4 Externe Kosten Luftbelastung in der Stromerzeugung

#### a) Methodik

Mit Hilfe der im vorgängigen Kapitel hergeleiteten Kostensätze können die externen Kosten der Luftbelastung für verschiedene Stromerzeugungstechnologien berechnet werden. Dazu werden die Emissionen von PM<sub>10</sub>-Äquivalenten pro produzierte kWh Elektrizität mit dem Kostensatz multipliziert.

---

<sup>89</sup> Ecoplan, Infras (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010, S. 167.

<sup>90</sup> Ecoplan (2020), Bewertung der externen Effekte im Strassenverkehr.

## Emissionen der wichtigsten Technologien der Stromerzeugung

Grundlage für diese Berechnungen bilden die Emissionen von PM<sub>10</sub>-Äquivalenten gemäss aktualisierten Ergebnissen basierend auf der ecoinvent-Datenbank,<sup>91</sup> die von ESU-Services ausgewertet wurde. Dabei wird der gesamte Lebenszyklus berücksichtigt (von der Bereitstellung der Brennstoffe und dem Bau der Kraftwerke bis zur Entsorgung der Abfälle). Es werden die folgenden neun Technologien miteinbezogen:

- Kernenergie
- Erdgas<sup>92, 93</sup>
- Photovoltaik
- Wasserkraftwerk<sup>94</sup>
- Kehrichtverbrennungsanlage (KVA)
- Windturbine (800 kW installierte Leistung)
- Biogas WKK 160 kWe (WKK = Wärme-Kraft-Kopplung)
- Holz WKK 6400 kWe<sup>95</sup>
- Geothermie<sup>96</sup>

Neben diesen Stromerzeugungstechnologien werden zusätzlich auch die Emissionen durch die Herstellung und Entsorgung von **Batterien für Photovoltaikanlagen** miteinbezogen. Dabei gehen wir (gemäss Angaben von ESU-Services) von Batterien aus, die ca. 120 kg wiegen und eine Lebensdauer von 15 Jahren erreichen.<sup>97</sup>

Stromimporte aus dem Ausland werden hingegen nicht betrachtet, da sie ausserhalb der Systemgrenzen der Energieperspektiven liegen, d.h. ausserhalb der Schweiz.

Für sämtliche Anlagen wurden die Datengrundlagen gegenüber Ecoplan (2012) aktualisiert. Zwei Bemerkungen zu den verwendeten Daten:

---

<sup>91</sup> Der Stand der Datengrundlage ist UVEK (2019).

<sup>92</sup> Beim Erdgas liegen zwei Versionen vor: In der UVEK-2019-Datenbank fehlen noch die Emissionen durch Venting (unbeabsichtigte Emissionen von Methan in Erdölfeldern) und durch sour gas (Entschwefelung von Erdgas). Deshalb verwenden wir hier die Daten gemäss ESU-Datenbank 2019, da dort diese Emissionen bereits integriert wurden, welche die Gesamtemissionen um 88% erhöhen.

<sup>93</sup> In den Datengrundlagen zum Mengengerüst vom Prognos sind auch «sonstige Kraft-, Fernheiz- und Fernheizkraftwerke» enthalten. Dabei handelt es sich vor allem um Gaskraftwerke, so dass die Kostensätze von Erdgas verwendet werden können.

<sup>94</sup> Pumpspeicherkraftwerke werden nicht gesondert betrachtet: Einerseits waren die Emissionsfaktoren für Speicher- und Laufwasserkraft in den bisherigen Arbeiten (Ecoplan 2012) praktisch identisch. Andererseits dürften die externen Kosten aus dem Bau zusätzlicher Pumpspeicherkraftwerke gering sein (bei Grimsel 3 werden nur Druckschacht, die Kraftwerkszentrale sowie der Unterwasserstollen zum Räterichsbodensee neu gebaut, beim Projekt Lago Bianco wird die Staumauer nur um 4.5 m angehoben).

<sup>95</sup> Beim Mengengerüst von Prognos auch als Biomassenanlage bezeichnet.

<sup>96</sup> Zur Geothermie gibt es keine Daten in der ecoinvent-Datenbank. Deshalb werden die Emissionsfaktoren aus Treyer et al. (2015, S. 227) verwendet.

<sup>97</sup> 120 kg wiegt z.B. die stationäre Lithium-Ionen-Batterie für 14kWh von Tesla (Powerwall [https://www.tesla.com/de\\_CH/powerwall?redirect=no](https://www.tesla.com/de_CH/powerwall?redirect=no)). ESU-services schätzt die Lebensdauer auf 15 Jahre (auch häufige Standardannahme für grössere Heimelektronikgeräte wie Waschmaschine, Backofen, etc.).

- Emissionen von Anlagen, die Strom und Wärme erzeugen (Erdgas und Biogas) werden gemäss dem Exergiegehalt<sup>98</sup> von Strom und Wärme diesen beiden Produkten zugeordnet.<sup>99</sup>
- Strom aus Kehrlichtverbrennungsanlagen (KVA) wird als belastungsfrei betrachtet, da alle Aufwendungen und Emissionen der Abfallentsorgung zugeordnet werden. Damit entstehen nur durch Stromverteilung und Netz externe Kosten.<sup>100</sup>

### Kostensatz für die Berechnung der externen Kosten

Schliesslich sind die Emissionen mit einem Kostensatz zu multiplizieren, um die externen Kosten (pro kWh) zu ermitteln. Für die Emissionen in der Schweiz kann der oben hergeleitete Kostensatz von 272'000 CHF pro Tonnen PM<sub>10</sub>-Äquivalent verwendet werden (vgl. Abbildung 3-3).

Die Verwendung desselben Kostensatzes für die ausländischen Emissionen wäre jedoch falsch: Denn je nach Bevölkerungsdichte, genauem Emissionsort, Entwicklungsstand etc. können die Kostensätze im Ausland deutlich von den Schweizer Werten abweichen. Um trotzdem eine Grobschätzung der gesamten weltweit verursachten Kosten der Luftbelastung durch die Stromproduktion in der Schweiz berechnen zu können, wurde in Ecoplan (2012<sup>101</sup>) für die ausländischen Emissionen ein Kostensatz von 51'000 CHF / t PM<sub>10</sub>-Äquivalent aus den EU-Projekten NEEDS und CASES für die EU27 verwendet. Dieser Kostensatz wird nun aktualisiert mit Ergebnissen aus dem aktuellsten EU-Handbuch,<sup>102</sup> was zu einem durchschnittlichen Kostensatz für die EU28 von gut 47'000 CHF / t PM<sub>10</sub>-Äquivalent führt.<sup>103</sup> Mit diesem deutlich tieferen Kostensatz (im Vergleich zum Kostensatz für die Schweiz 5.7-mal tiefer) werden die ausländischen Emissionen monetarisiert. Die Differenz der Kostensätze für die Schweiz bzw. für die EU dürfte auf folgende Gründe zurückzuführen sein: Die Bevölkerungsdichte ist in der EU geringer als in der Schweiz und der VOSL ist aufgrund der tieferen PPP (purchasing power parity) in der EU deutlich tiefer (ca. Faktor 2.25<sup>104</sup>).<sup>105</sup>

---

<sup>98</sup> Exergie bezeichnet den Teil der Gesamtenergie eines Systems, der Arbeit verrichten kann.

<sup>99</sup> Denkbar wäre auch eine Zuordnung nach der ökonomischen Verursachung, was durch den Anteil am Wert von Strom bzw. Wärme angenähert werden könnte.

<sup>100</sup> Laut Treibhausgasinventar müssten die Emissionen gemäss Auskunft des BFE zu 50% dem Abfall und zu 50% der Energie zugerechnet werden. Dies ist hier nicht möglich: Die Emissionen der KVA werden in diesem Projekt aus ecoinvent genommen. Dort ist nur Stromverteilung und Netz berücksichtigt, nicht aber der Betrieb. Der Betrieb wird im vorliegenden Projekt unter «Abfallindustrie» in Kapitel 4 (siehe Abbildung 4-1) miteinbezogen. Die Daten zu Emissionen in der Abfallindustrie enthalten jedoch nicht nur KVA.

<sup>101</sup> Ecoplan (2012), Energiestrategie 2050 – volkswirtschaftliche Auswirkungen, Anhang C.

<sup>102</sup> European Commission (2019), Handbook on the external costs of Transport, S. 107 und 49.

<sup>103</sup> Dieser Wert beruht auf vier Kostensätzen für die vier zugrundeliegenden Schadstoffe PM<sub>10</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> und NH<sub>3</sub> aus dem EU-Handbuch (die auf demselben VOSL beruhen, der auch in der Schweiz verwendet wird). Berechnet man aus den vier Kostensätzen mit Hilfe der Umrechnungsfaktoren in Abbildung 3-1 einen Kostensatz pro Tonne PM<sub>10</sub>-Äquivalent, so schwankt dieser je nach Schadstoff zwischen 24'000 und 60'000 CHF. Deshalb haben wir die Gewichtung in Abbildung 3-4 verwendet, um den Durchschnitt von 47'000 CHF pro Tonne PM<sub>10</sub>-Äquivalent zu bestimmen. Es ist zu beachten, dass die Kosten möglicherweise noch deutlich tiefer sein könnten, wenn sich das Ausland nicht auf die EU, sondern auf ein Entwicklungsland bezieht. Beziehen sie sich hingegen auf ein weit entwickeltes und dicht bevölkertes Land, wäre der Kostensatz für das Ausland höher als hier verwendet.

<sup>104</sup> Gemäss Berechnungen für den VOSL, die Ecoplan für die WHO durchgeführt hat.

<sup>105</sup> Zudem beruhen die beiden Berechnungen nicht exakt auf derselben Methodik bzw. denselben Datengrundlagen, was ebenfalls zu Unterschieden führen kann.

### Differenzierung der Emissionen nach Schweiz / Ausland und Betrieb / Nicht-Betrieb

Für die Berechnung der Sekundäreffekte sind wir primär an den in der Schweiz anfallenden Emissionen (territoriale Sicht für allfällige secondary benefits) interessiert.<sup>106</sup> Zusätzlich sollen aber auch die gesamten Emissionen / Kosten berechnet werden, um ein umfassendes Bild der Kosten der Luftbelastung durch die Stromproduktion zu erhalten. Deshalb werden die Emissionen zuerst in Stromverteilung und Netz, Brennstoffbereitstellung und -entsorgung sowie Kraftwerk / WKK aufgeteilt (teilweise liegen noch genauere Aufteilungen vor).<sup>107</sup> Dann wird für alle Emissionsbestandteile der Anteil der Emissionen in der Schweiz bestimmt. Dazu haben ESU-services spezifisch für dieses Projekt die Datengrundlagen analysiert, um die Anteile grob abzuschätzen. Dazu werden folgende Annahmen getroffen:<sup>108</sup>

- Herstellung von Zement und Beton: in der Schweiz
- Herstellung der Metalle (Chromstahl, Kupfer, Konstruktionsstahl): im Ausland
- Deponierung Inertstoffe<sup>109</sup>: in der Schweiz

Zudem erfolgt auch eine Aufteilung der Emissionen auf den Betrieb und den Nicht-Betrieb (insbesondere Bau und Stromverteilung im Netz). Auch diese Aufteilung erfolgt approximativ durch ESU-Services.

## b) Ergebnisse

### Emissionen der Stromerzeugungstechnologien

Die Emissionen von PM<sub>10</sub>-Äquivalenten, aufgeschlüsselt nach der Quelle des Ausstosses, werden in Abbildung 3-6 und Abbildung 3-7 dargestellt. Beim Vergleich der jeweiligen Gesamtemissionen, fällt auf, dass die Stromproduktion mit Erdgas und Biogas mit über 400 mg PM<sub>10</sub>-Äquivalenten / kWh Strom am meisten Emissionen verursacht. Dies ist vor allem auf das für den Betrieb verwendete Gas bzw. dessen Bereitstellung zurückzuführen. Mit rund 330 mg PM<sub>10</sub>-Äquivalenten / kWh belasten Holz-basierte Wärme-Kraft Koppelungen die Luftqualität ebenfalls relativ stark. Demgegenüber sind die Belastungen durch KVA und Wasserkraft am geringsten (weil die Emissionen der Abfallverbrennung der Abfallentsorgung zugeordnet werden, womit nur noch Emissionen beim Bau der erforderlichen Stromnetze berücksichtigt werden). Diese Technologien verursachen Emissionen in der Höhe von 27 bzw. 36 mg PM<sub>10</sub>-Äquivalenten / kWh. Leicht höhere, relativ aber immer noch geringe, Werte hat die Windkraft. Dies

---

<sup>106</sup> Die PM<sub>10</sub>-Äquivalent-Emissionen in der Schweiz führen nicht nur zu Schäden in der Schweiz, sondern auch zu Schäden im Ausland, da die Schadstoffe in der Luft über grosse Distanzen transportiert werden können. Wie in Ecoplan, Infrac (2014, Externe Effekte des Verkehrs 2010, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten) gehen wir davon aus, dass Import und Export von PM<sub>10</sub> sich die Waage halten (vgl. Kapitel 2.1).

<sup>107</sup> Diese Aufteilung wurde uns durch ESU-services geliefert. Bei den Baukosten besteht die Gefahr, dass Doppelzählungen entstehen, da diese über Veränderungen der externen Kosten beim Bausektor bereits berücksichtigt sind. Der Anteil der externen Kosten, welcher im Strombereich im Sektor Bau anfällt, ist aber im Vergleich zu den gesamten externen Kosten im Bausektor relativ gering.

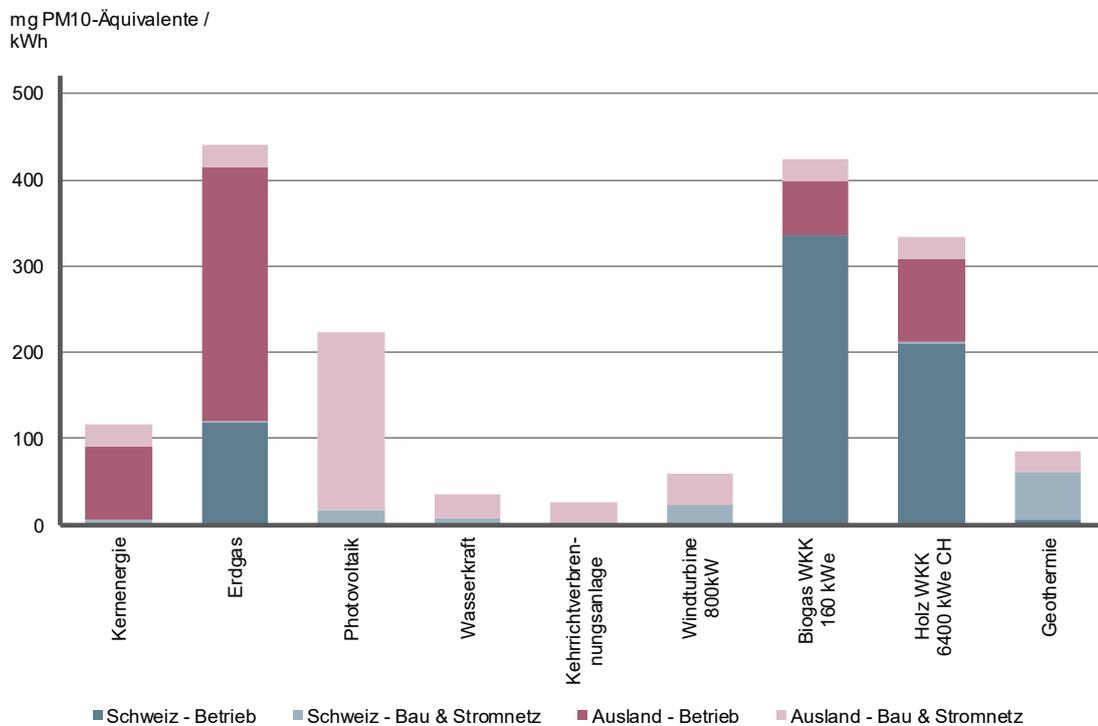
<sup>108</sup> Für die Geothermie wird für Stromverteilung und Netz derselbe Anteil verwendet wie für alle anderen Stromproduktionstechnologien (5%). Die restlichen Emissionen wurden dann vollständig der Schweiz zugerechnet, um den bisherigen Anteil der Schweiz in etwa abzubilden. Der bisherige Anteil basierte auf Nitsch et al. (2004, Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland, S. 90).

<sup>109</sup> Gesteinsähnliche, schadstoffarme Abfälle, die beim Auswaschen mit Wasser wenig Schadstoffe abgeben.

aufgrund der beim Bau der Turbine ausgestossenen Emissionen. Die Stromerzeugung mit Kernenergie und Photovoltaik belasten die Luftqualität mit Emissionen in der Höhe von 117 und 224 mg PM<sub>10</sub>-Äquivalenten / kWh. Dies liegt vor allem an der Luftbelastung durch den Abbau des für den Betrieb notwendigen Urans bzw. der für den Bau der Solarzellen notwendigen Materialien. Relativ dazu führt die Stromproduktion mit Geothermie mit 86 mg / kWh zu leicht geringeren Emissionen.

Für **Batterien** (von Photovoltaikanlagen) liefert die Ecoinvent-Datenbank Emissionen von 2.08 kg PM<sub>10</sub>-Äquivalenten pro Batterie (bzw. einem 120-igstel davon pro kg Batterie). Pro Batterie und Jahr entspricht dies bei einer Lebensdauer von 15 Jahren 0.139 kg / Batterie. Diese Emissionen fallen alle im Ausland bei der Herstellung / Entsorgung der Batterie an (d.h. nicht im Betrieb).

**Abbildung 3-6: Emissionen von PM<sub>10</sub>-Äquivalenten durch Stromerzeugung**



**Anteil der Emissionen in der Schweiz**

Je nach Technologie zur Stromerzeugung fällt der Anteil der in der Schweiz ausgestossenen Emissionen unterschiedlich aus. Abbildung 3-6 und Abbildung 3-7 zeigen, dass bei zwei Dritteln der analysierten Technologien die Mehrheit der Emissionen im Ausland ausgestossen wird. Mit Inlandsanteilen zwischen 5% und 7% trifft dies insbesondere auf die KVA, Kernenergie und Photovoltaik zu. Bei der Kernenergie und der Photovoltaik liegt dies daran, dass die erwähnten, für den Betrieb bzw. Bau benötigten Materialien fast vollständig im Ausland abgebaut werden. Dieselbe Ursache führt bei der Stromproduktion auf Basis von Erdgas ebenfalls zu einer relativ tiefen Belastung der Luftqualität im Inland (27%). Dazu kommt, dass bei allen Technologien die Emissionen zur Stromverteilung zu 95% dem Ausland anzulasten sind (Ab-

bau des Kupfers für Kabel). Dies ist auch der Grund für die tiefen Inlandsanteile bei den ansonsten praktisch emissionsfreien Technologien KVA (5%), Wasserkraft (20%) und Windenergie (38%).

**Abbildung 3-7: Emissionen, Inlandsanteil und externe Kosten der Luftbelastung durch Stromerzeugung nach detailliertem Ursprung im Jahr 2015**

	Stromverteilung und Netz	Brennstoffbereitstellung und -entsorgung	Kraftwerk / WKK	Total
<b>Kernenergie</b>				
mg PM10-eq pro kWh Strom	26.5	86.2	4.5	<b>117.2</b>
Anteil in der Schweiz	5%	3.1%	50%	<b>5.4%</b>
Rappen / kWh in Schweiz	0.036	0.073	0.061	<b>0.171</b>
<i>Rappen / kWh im Ausland</i>	<i>0.119</i>	<i>0.395</i>	<i>0.011</i>	<b>0.525</b>
<b>Erdgas</b>				
mg PM10-eq pro kWh Strom	26.6	291.0	122.0	<b>439.6</b>
Anteil in der Schweiz	5%	1.0%	95%	<b>27.3%</b>
Rappen / kWh in Schweiz	0.036	0.079	3.147	<b>3.262</b>
<i>Rappen / kWh im Ausland</i>	<i>0.120</i>	<i>1.364</i>	<i>0.029</i>	<b>1.513</b>
<b>Photovoltaik</b>				
mg PM10-eq pro kWh Strom	26.5	-	196.9	<b>223.5</b>
Anteil in der Schweiz	5%	-	8%	<b>7.5%</b>
Rappen / kWh in Schweiz	0.036	-	0.417	<b>0.453</b>
<i>Rappen / kWh im Ausland</i>	<i>0.119</i>	-	<i>0.860</i>	<b>0.979</b>
<b>Wasserkraft</b>				
mg PM10-eq pro kWh Strom	26.5	-	9.1	<b>35.7</b>
Anteil in der Schweiz	5%	-	65%	<b>20.4%</b>
Rappen / kWh in Schweiz	0.036	-	0.162	<b>0.198</b>
<i>Rappen / kWh im Ausland</i>	<i>0.119</i>	-	<i>0.015</i>	<b>0.134</b>
<b>Kehrichtverbrennungsanlage (KVA)</b>				
mg PM10-eq pro kWh Strom	26.5	-	-	<b>26.5</b>
Anteil in der Schweiz	5%	-	0%	<b>5.0%</b>
Rappen / kWh in Schweiz	0.036	-	-	<b>0.036</b>
<i>Rappen / kWh im Ausland</i>	<i>0.119</i>	-	-	<b>0.119</b>
<b>Windturbine 800 kW</b>				
mg PM10-eq pro kWh Strom	26.5	-	33.2	<b>59.7</b>
Anteil in der Schweiz	5%	-	65%	<b>38.4%</b>
Rappen / kWh in Schweiz	0.036	-	0.586	<b>0.622</b>
<i>Rappen / kWh im Ausland</i>	<i>0.119</i>	-	<i>0.055</i>	<b>0.174</b>
<b>Biogas WKK 160 kWe</b>				
mg PM10-eq pro kWh Strom	26.7	256.0	141.0	<b>423.7</b>
Anteil in der Schweiz	5%	95.0%	65%	<b>79.3%</b>
Rappen / kWh in Schweiz	0.036	6.604	2.489	<b>9.129</b>
<i>Rappen / kWh im Ausland</i>	<i>0.120</i>	<i>0.061</i>	<i>0.234</i>	<b>0.414</b>
<b>Holz WKK 6400 kWe CH</b>				
mg PM10-eq pro kWh Strom	26.5	38.7	267.8	<b>333.0</b>
Anteil in der Schweiz	5%	95%	65%	<b>63.7%</b>
Rappen / kWh in Schweiz	0.036	0.998	4.727	<b>5.761</b>
<i>Rappen / kWh im Ausland</i>	<i>0.119</i>	<i>0.009</i>	<i>0.444</i>	<b>0.572</b>
<b>Geothermie</b>				
mg PM10-eq pro kWh Strom	26.5	59.1	-	<b>85.6</b>
Anteil in der Schweiz	5%	100%	-	<b>70.6%</b>
Rappen / kWh in Schweiz	0.036	1.605	-	<b>1.641</b>
<i>Rappen / kWh im Ausland</i>	<i>0.119</i>	-	-	<b>0.119</b>

Grobschätzungen kursiv.

Im Gegensatz dazu verursachen die Stromgewinnung mit Biogas und Holz sowie durch Geothermie ihre Emissionen zu 64 - 79% in der Schweiz. Während dies bei der Geothermie am Bau der Anlage vor Ort liegt, ist der Grund bei den anderen Technologien wiederum der Ursprung der betriebsnotwendigen Materialien.

### **Externe Kosten der Luftbelastung in der Schweiz**

Die Abbildung 3-8 zeigt die durch die Stromerzeugung verursachten externen Kosten.<sup>110</sup> Diese sind nach Ursprung der verschiedenen Emissionen aufgeschlüsselt. Die in der Schweiz anfallenden externen Kosten sind in der zweiten Spalte dargestellt. Diese Zahlen sind zudem in Abbildung 3-9 graphisch aufbereitet. Aufgrund der angewendeten Methodik ergeben sich für diejenigen Technologien hohe externe Kosten, bei welchen eine hohe Gesamtemission auf einem hohen Inlandsanteil trifft. Dies ist insbesondere bei der Stromproduktion mit Biogas und Holz der Fall. Deren externe Kosten fallen mit 9.1 bzw. 5.8 Rp / kWh am höchsten aus. Absolut tiefere, aber immer noch relativ hohe externe Kosten entstehen bei der Stromproduktion mit Erdgas. Der Grund dafür liegt im relativ emissionsreichen Betrieb. Bei der Geothermie sind die externen Kosten von 1.6 Rp / kWh vor allem auf die Emissionen bei den Tiefbohrungen während des Baus zurückzuführen. Die Emissionen während des Baus sind auch der Grund für den Wert der Windkraft von rund 0.6 Rp / kWh. Bei den übrigen vier analysierten Technologien – Kernenergie, Photovoltaik, KVA sowie Wasserkraft – fallen die luftbelastungsbedingten Kosten in der Schweiz grossmehrheitlich durch Bau und Stromverteilung an. Bei der Photovoltaik betragen diese 0.45 Rp / kWh. Bei den übrigen drei Technologien liegen diese mit unter 0.2 Rp / kWh nochmals deutlich tiefer.

Wie oben erläutert führen Batterien zu keinen Luftschadstoff-Emissionen in der Schweiz.

---

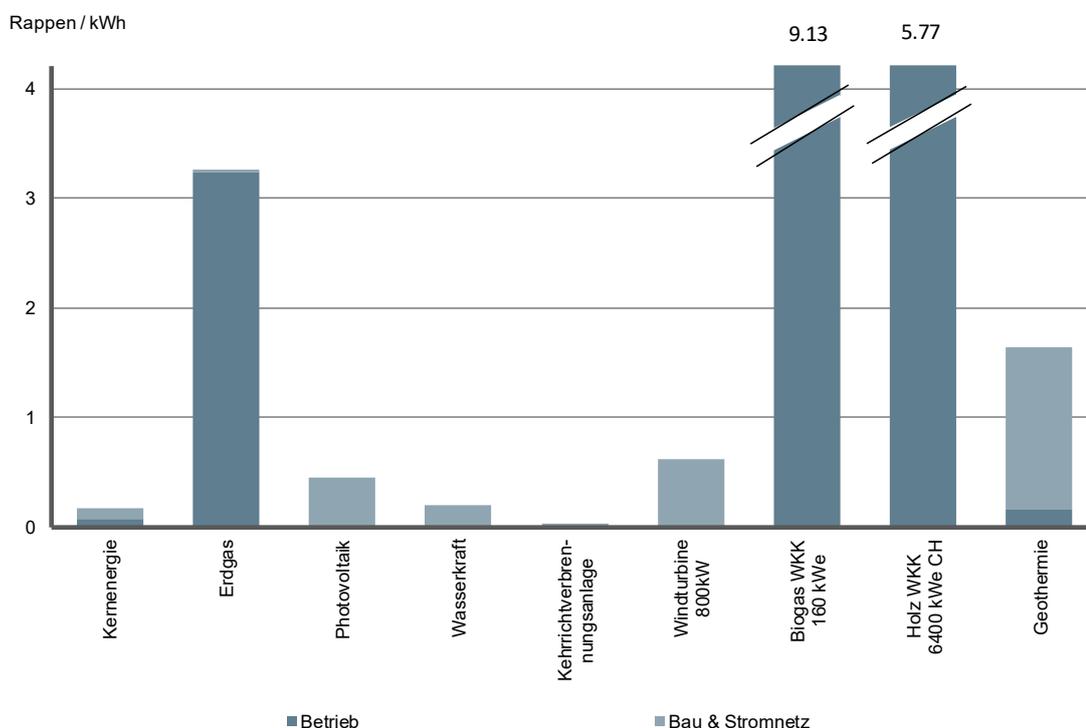
<sup>110</sup> Eine Aufschlüsselung der Emissionen und externen Kosten nach Stromverteilung / Netz, Brennstoffbereitstellung sowie Kraftwerk/WWK zeigt Abbildung 3-7.

Abbildung 3-8: Externe Kosten der Luftbelastung durch Stromerzeugung

	Externe Kosten in der Schweiz [Rappen / kWh]	Externe Kosten im Ausland [Rappen / kWh]	Total [Rappen / kWh]
<b>Kernenergie</b>			
Betrieb	0.073	0.395	<b>0.469</b>
Bau & Stromnetz	0.097	0.130	<b>0.227</b>
<b>Total</b>	<b>0.171</b>	<b>0.525</b>	<b>0.696</b>
<b>Erdgas</b>			
Betrieb	3.226	1.393	<b>4.619</b>
Bau & Stromnetz	0.036	0.120	<b>0.156</b>
<b>Total</b>	<b>3.262</b>	<b>1.513</b>	<b>4.775</b>
<b>Photovoltaik</b>			
Betrieb	0.000	0.000	<b>0.000</b>
Bau & Stromnetz	0.453	0.979	<b>1.432</b>
<b>Total</b>	<b>0.453</b>	<b>0.979</b>	<b>1.432</b>
<b>Wasserkraft</b>			
Betrieb	0.001	0.000	<b>0.001</b>
Bau & Stromnetz	0.196	0.134	<b>0.331</b>
<b>Total</b>	<b>0.198</b>	<b>0.134</b>	<b>0.332</b>
<b>Kehrichtverbrennungsanlage (KVA)</b>			
Betrieb	0.000	0.000	<b>0.000</b>
Bau & Stromnetz	0.036	0.119	<b>0.155</b>
<b>Total</b>	<b>0.036</b>	<b>0.119</b>	<b>0.155</b>
<b>Windturbine 800 kW</b>			
Betrieb	0.002	0.000	<b>0.002</b>
Bau & Stromnetz	0.620	0.174	<b>0.794</b>
<b>Total</b>	<b>0.622</b>	<b>0.174</b>	<b>0.796</b>
<b>Biogas WKK 160 kWe</b>			
Betrieb	9.093	0.294	<b>9.387</b>
Bau & Stromnetz	0.036	0.120	<b>0.156</b>
<b>Total</b>	<b>9.129</b>	<b>0.414</b>	<b>9.543</b>
<b>Holz WKK 6400 kWe CH</b>			
Betrieb	5.725	0.453	<b>6.178</b>
Bau & Stromnetz	0.036	0.119	<b>0.155</b>
<b>Total</b>	<b>5.761</b>	<b>0.572</b>	<b>6.333</b>
<b>Geothermie</b>			
Betrieb	0.160	0.000	<b>0.160</b>
Bau & Stromnetz	1.480	0.119	<b>1.599</b>
<b>Total</b>	<b>1.641</b>	<b>0.119</b>	<b>1.760</b>

Grobschätzungen kursiv.

**Abbildung 3-9: Externe Kosten der Luftbelastung in der Schweiz für Stromerzeugungstechnologien**



**Gesamte externe Kosten der Luftbelastung in der Schweiz und im Ausland**

Wie in Abbildung 3-6 bereits aufgezeigt, fällt der Anteil der in der Schweiz anfallenden Emissionen je nach Technologie unterschiedlich aus. Trotzdem verändert die Mitberücksichtigung der Grobschätzung der externen Kosten im Ausland die relative Einschätzung der verschiedenen Technologien nicht wesentlich, was auch darauf zurückzuführen ist, dass der Kostensatz pro Tonne PM<sub>10</sub>-Äquivalent im Ausland deutlich tiefer ist (vgl. oben). Wie Abbildung 3-10 und Abbildung 3-8 zeigen, führt gemäss unserer Grobschätzung die Stromproduktion mit Biogas und Holz immer noch zu den absolut höchsten externen Kosten, diejenigen durch KVA und Wasserkraft zu den geringsten. Absolut betrachtet führt der Einbezug von im Ausland anfallenden Emissionen jedoch bei allen analysierten Technologien zu höheren externen Kosten. Am geringsten fällt der Anstieg bei der KVA, Geothermie, Wasserkraft und Windenergie aus (je weniger als 0.2 Rp / kWh). Deren Auslandsanteil ist verhältnismässig klein und liegt, wie in Abbildung 3-11, Abbildung 3-8 und Abbildung 3-7 aufgezeigt, insbesondere an den zugerechneten Emissionen aus der Stromverteilung. Im Falle der Windenergie und der Wasserkraft kommen zudem noch Belastungen beim Bau des Kraftwerkes hinzu. Aufgrund von Emissionen während des Baus ändert sich auch die Beurteilung der Photovoltaik, wenn auch in weitaus grösserem Ausmass. Deren externen Kosten erhöhen sich bei der Berücksichtigung der Auslandsmissionen um mehr als 200% zu einem Total von 1.4 Rp / kWh. Wie oben bereits erwähnt, liegt dies am luftbelastenden Abbau der für den Bau benötigten Rohstoffe. Dies führt gemäss der Grobschätzung dazu, dass die Photovoltaik betreffend der Luftbelastung gesamthaft schlechter abschneidet als beispielsweise die Windenergie. Die Mitberücksichtigung von

Abbildung 3-10: Weltweite externe Kosten der Luftbelastung durch Stromerzeugung in der Schweiz

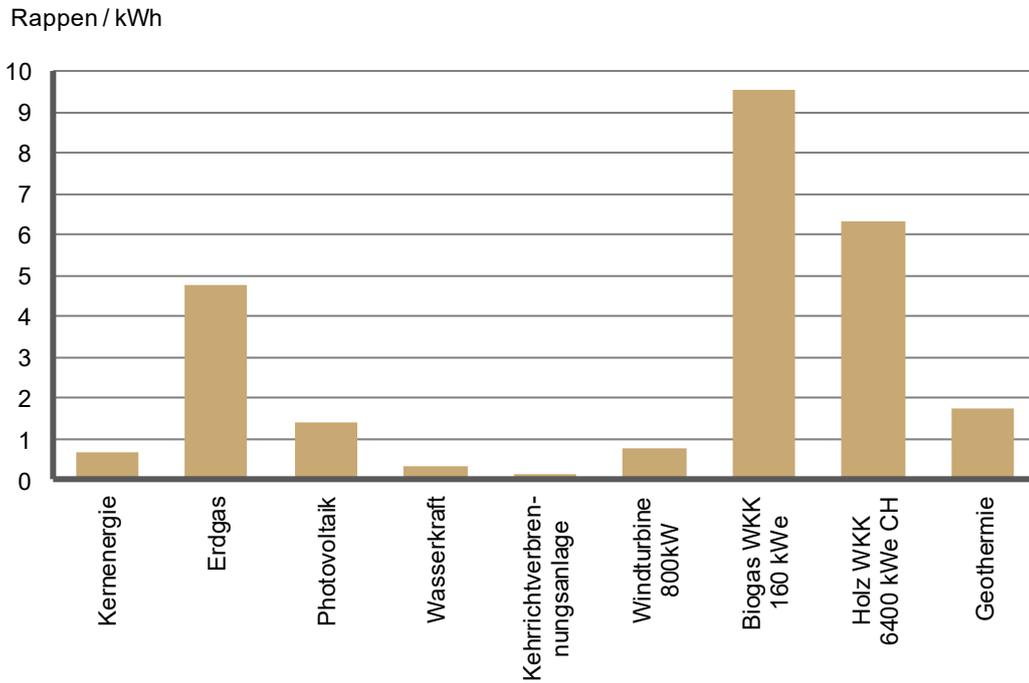
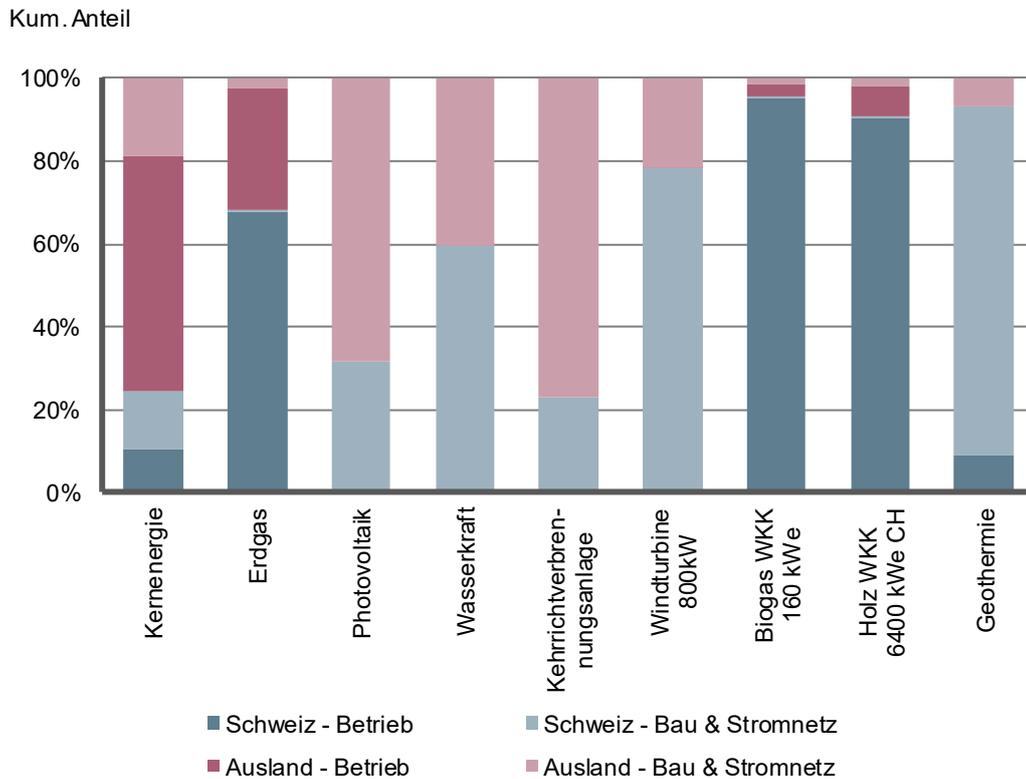


Abbildung 3-11: Relative Verteilung der weltweiten externen Kosten der Luftbelastung durch Stromerzeugung in der Schweiz



im Ausland anfallenden Emissionen bei der Rohstoffgewinnung ist auch bei der Kernkraft von spezieller Relevanz. Deren luftbelastungsbedingten Kosten erhöhen sich dadurch auf 0.7 Rp / kWh (+0.5 Rp / kWh). Absolut ähnliche, aber relative deutlich geringere Veränderungen sind bei der Stromproduktion mit Biogas und Holz zu beobachten. Die höchsten Kosten im Ausland treten gemäss der Grobschätzung beim Erdgas auf (1.5 Rp / kWh), wodurch die Gesamtkosten auf 4.8 Rp / kWh steigen.

Durch Batterien von Photovoltaikanlagen entstehen im Ausland Kosten der Luftbelastung bei Herstellung und Entsorgung von 98 CHF / Batterie (bzw. 6.6 CHF pro Batterie und Jahr).

**Abbildung 3-12: Weltweite externe Kosten durch Batterien von Photovoltaikanlagen**

Batterien von Photovoltaikanlagen	Externe Kosten in der Schweiz [CHF / Batterie]	Externe Kosten im Ausland [CHF / Batterie]	Total [CHF / Batterie]
Herstellung / Entsorgung	0.0	98.4	<b>98.4</b>

*Grobschätzungen kursiv.*

### c) Vergleich zu bisherigen Werten

Die folgende Abbildung zeigt den Vergleich zu den bisherigen Ergebnissen in Ecoplan (2012).<sup>111</sup> Im rechten Teil der Abbildung zeigt sich, dass die total anfallenden externen Kosten (im In- und Ausland) im Vergleich zur Schätzung aus Ecoplan (2012) bei einer Mehrheit der betrachteten Technologien höher ausfallen. Treibende Kraft hinter dieser Entwicklung ist der um 68% höher angesetzte Kostensatz für Emissionen in der Schweiz (vgl. Kapitel 3.33.3d). Deshalb fallen die Schätzungen der externen Kosten in der Schweiz teils deutlich höher aus. Dieser Effekt überlagert teilweise, dass die verursachte Luftverschmutzung bei mehr als der Hälfte aller analysierten Technologien gesunken ist. So gingen beispielsweise die errechneten Emissionen des Biogases gegenüber Ecoplan (2012) um 16% zurück. Aufgrund der höheren externen Kosten in der Schweiz sind die gesamten Kosten jedoch trotzdem um rund 40% gestiegen. Ein ähnlicher Effekt ist auch bei der Photovoltaik und der Windturbine zu beobachten: Obwohl sich die Unterschiede bei den Emissionswerten in Grenzen halten, ergeben sich massiv höhere externen Kosten in der Schweiz. Dies kommt daher, dass neu ein wesentlicher Anteil der beim Bau entstehenden Luftbelastung dem Inland zugeordnet wird und dadurch das Gewicht des höheren Kostensatzes nochmals erhöht wurde.<sup>112</sup>

<sup>111</sup> Ecoplan (2012), Energiestrategie 2050 – volkswirtschaftliche Auswirkungen.

<sup>112</sup> Konkret werden bei der Photovoltaik beim «Aufbau und Wechselrichter» neu 20% der Emissionen als aus der Schweiz angesehen (bisher 0%). Bei der Windturbine wird neu angenommen, dass 65% der Emissionen durch das «Kraftwerk» in der Schweiz entstehen (bisher 0%).

Ebenfalls auffällig ist die Vervierfachung der gesamten externen Kosten der Stromproduktion mit Erdgas. Diese Entwicklung muss jedoch mit Vorsicht betrachtet werden. Die jeweils analysierten Datengrundlagen sind nur bedingt miteinander vergleichbar. Für die neuen Berechnungen wurden zusätzlich Emissionen bei der Bereitstellung von Erdgas berücksichtigt (vgl. Fussnote 92). Aber auch ohne diese bisher nicht berücksichtigten Emissionen haben sich die Gesamtkosten verdreifacht, was auf höhere Emissionen und auf einen höheren Anteil der Emissionen in der Schweiz zurückzuführen ist.

**Abbildung 3-13: Vergleich zu den bisherigen Ergebnissen**

	PM-10-Äquivalente [g / kWh]			Kosten in der Schweiz [Rp / kWh]			Total Kosten [Rp / kWh]		
	bisher	neu	Differenz	bisher	neu	Differenz	bisher	neu	Differenz
Kernenergie	0.13	0.12	-0.01	0.07	0.17	0.10	0.72	0.70	-0.02
Erdgas GuD	0.15	0.44	0.29	0.58	3.26	2.69	1.14	4.77	3.63
Erdgas WKK	0.17		0.27	0.43		2.83	1.18		3.59
Photovoltaik	0.21	0.22	0.02	0.03	0.45	0.42	1.08	1.43	0.36
Wasserkraft	0.05	0.04	-0.01	0.14	0.20	0.06	0.34	0.33	-0.01
Kehrichtverbrennungsanlage	0.04	0.03	-0.01	0.03	0.04	0.01	0.21	0.16	-0.05
Windturbine 800 kW	0.09	0.06	-0.03	0.04	0.62	0.58	0.48	0.80	0.32
Biogas WKK 160 kWe	0.50	0.42	-0.08	6.11	9.13	3.01	6.76	9.54	2.78
Holz WKK 6400 kWe	n.a.	0.33	n.a.	n.a.	5.76	n.a.	n.a.	6.33	n.a.
Geothermie	0.07	0.09	0.01	0.89	1.64	0.75	0.98	1.76	0.78

n.a. = not available. Die Werte in den «bisher»-Spalten stammen aus den Abbildungen 11-8 und 11-12 aus EcoPlan (2012). Für derjenigen der Wasserkraft wird der Durchschnitt der (sehr ähnlichen) Werte von Speicher- und Laufwasserkraftwerk gezeigt.

#### d) Vergleich zu internationalen Werten

Analog zur Diskussion des Kostensatzes im Kapitel 3.3d) sollen die errechneten externen Kosten der verschiedenen Technologien mit Werten aus Deutschland<sup>113</sup> verglichen werden. In den deutschen Zahlen enthalten sind auch die vor- und nachgelagerten Prozesse. Zur Monetarisierung wird jedoch nur ein deutscher Kostensatz angewendet, d.h. es werden entweder nur die Effekte in Deutschland betrachtet oder die Effekte im Ausland gleich bewertet wie diejenigen in Deutschland (was gilt, geht aus der sehr kurzen Erläuterung leider nicht hervor). Die externen Luftbelastungskosten der Stromproduktion in Deutschland sind meist geringer als die für die Schweiz berechneten Werte.<sup>114</sup> Besonders ausgeprägt ist der relative Unterschied bei

<sup>113</sup> Umweltbundesamt (2019), Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten. Kostensätze.

<sup>114</sup> Die errechneten Werte für Deutschland (in kaufkraftbereinigten Rp / kWh) sind wie folgt:

- Erdgas 1.44 (4.77 bzw. 3.26 – Wert für die Schweiz inkl. bzw. exkl. Ausland)
- Photovoltaik 0.71 (1.43 bzw. 0.45)
- Wasserkraft 0.10 (0.33 bzw. 0.20)
- Windenergie 0.17 (0.80 bzw. 0.62)
- Biomasse 6.47 (9.54 bzw. 9.13 für Biogas oder 6.33 bzw. 5.76 für Holz)

der Wind- und Wasserkraft sowie beim Erdgas (Faktor 3.2 bis 4.6 inkl. der Effekte der Schweizer Produktion im Ausland bzw. 1.9 bis 3.6 ohne die Effekte im Ausland). Geringer sind die relativen Unterschiede bei der Photovoltaik (Faktor 2.0 inkl. Ausland bzw. 0.6 ohne Ausland) und der Biomasse (Faktor 0.9 bis 1.5 je nachdem ob Holz oder Biogas zum Vergleich verwendet wird und je nachdem ob das Ausland berücksichtigt wird). Für die übrigen Technologien liegen keine Zahlen aus Deutschland vor. Die Ursachen für die teilweise substanziellen Abweichungen liegen u.a. in der Höhe des verwendeten Kostensatzes (siehe Kapitel 3.3d). Dazu kommen vermutlich aber auch methodische Unterschiede, deren Analyse den Rahmen des vorliegenden Projektes jedoch sprengen würde.

### e) Prognose bis 2060

Zur Erstellung der Prognose zur Höhe der luftbelastungsbedingten externen Kosten müssen für die verschiedenen Technologien Annahmen zur zukünftigen Entwicklung der Emissionsfaktoren getroffen werden. Das Finden von entsprechenden Annahmen hat sich jedoch als schwierig erwiesen. In Absprache mit dem Auftraggeber und der Begleitgruppe wurde deshalb die konservative Annahme getroffen, dass grundsätzlich aufgrund der Schwierigkeit von Prognosen von konstanten Emissionsfaktoren ausgegangen wird – es sei denn, es liegen bessere Datengrundlagen vor. Wir konnten einzig im Emissionsinformationssystem der Schweiz (EMIS), dem Luftschadstoff- und Treibhausgasinventar des BAFU, belastbare Prognosen finden. Dort finden sich Prognosen für einzelne Technologien für die Emissionen in der Schweiz im Betrieb bis 2035. Danach geht auch das EMIS von Konstanz aus. Für das Ausland und den Nicht-Betrieb, sowie für andere Technologien der Stromerzeugung und für alle Technologien ab 2035 wird also von Konstanz ausgegangen.<sup>115</sup> Die Prognosen bis 2035 aus dem EMIS beruhen auf der Annahme, dass 2035 nur noch die heute aktuellsten Technologien im Einsatz stehen, ältere Anlagen mit höheren Emissionsfaktoren werden jedoch verschwinden: es ist zu erwähnen, dass die Prognosen mit grösseren Unsicherheiten behaftet sind.

Das EMIS sagt für die Betriebsemissionen in der Schweiz bis 2035 folgende Veränderungen voraus:

- Erdgas: -17.1% (oder -0.94% pro Jahr bis 2035)
- Holz: -48.2% (oder -3.23% pro Jahr bis 2035)

Beim Erdgas führt diese Abnahme (bei sonst unveränderten Annahmen) zu einer Reduktion des Gesamtkostensatzes (im In- und Ausland) bis 2035 von 4.78 auf 4.22 Rp / kWh (-11.6%), beim Holz von 6.33 auf 3.57 Rp / kWh (-43.6%). Ab ca. 2028 verursacht also die Stromerzeugung mit Holz weniger Luftbelastung als die Stromerzeugung mit Gas.

Für die anderen Technologien liegen keine Daten vor, so dass Konstanz angenommen wird.

---

<sup>115</sup> Es wurde diskutiert, ob für alle Technologien ein technologischer Fortschritt von -0.5% pro Jahr angenommen werden soll. Dies hätte zur Folge, dass die Emissionen bis 2060 um 20% sinken. Es wurde jedoch in Absprache mit dem Auftraggeber und der Begleitgruppe beschlossen, auf diese Sensitivität zu verzichten – auch bei den Technologien der Wärmeerzeugung.

Neben diesen Veränderungen der Emissionsfaktoren sind bei allen Technologien auch die Veränderungen der Kostensätze zu beachten, die gemäss Kapitel 3.33.3e) mit **88% des Reallohnwachstums** und **88% des Bevölkerungswachstums** zunehmen.<sup>116</sup>

### 3.5 Externe Kosten Luftbelastung in der Wärmeerzeugung

#### a) Methodik

Methodisch wird für die Bestimmung der externen Kosten der Luftbelastung durch die Wärmeerzeugung dasselbe Vorgehen gewählt wie bei der Stromerzeugung: Zuerst werden Emissionsfaktoren für verschiedene Technologien der Wärmeerzeugung erhoben, die dann mit dem oben bestimmten Kostensätzen pro Tonne PM<sub>10</sub>-Äquivalent multipliziert werden, um Kostensätze pro kWh Wärmeenergie herzuleiten.

#### Emissionen der wichtigsten Technologien der Wärmeerzeugung

Wie bei der Stromerzeugung bildet auch für die Wärmeerzeugung die ecoinvent-Datenbank<sup>117</sup> die Grundlage für die Emissionsfaktoren für verschiedene Technologien der Wärmeerzeugung (ergänzt mit Daten des BAFU – vgl. unten). Wiederum hat ESU-Services die Auswertung der ecoinvent-Datenbank durchgeführt. Dabei werden wie bei der Stromerzeugung die gesamten Emissionen im Lebenszyklus miteinbezogen (von der Bereitstellung der Brennstoffe und dem Bau der Heizungen bis zur Entsorgung der Abfälle). Die Daten wurden von ESU-Services wie beim Strom aufgeteilt auf Schweiz und Ausland sowie auf Betrieb und Nicht-Betrieb. Bei den Nicht-Betriebsemissionen geht es um die vor- und nachgelagerten Prozesse bei Herstellung, Unterhalt und Entsorgung der wärmeerzeugenden Technologien (z.B. Wärmepumpen).

Der Stromverbrauch in der Schweiz stellt jedoch eine Doppelzählung dar, da wir die Kosten des Stromverbrauchs bereits in der Stromproduktion berücksichtigen. Deshalb hat ESU-Services den direkten Stromverbrauch herausgerechnet (unabhängig davon, ob es sich gemäss ecoinvent-Datenbank um Schweizer Strom oder Importstrom handelt).

Ergänzend wurden auch Daten des Emissionsinformationssystems der Schweiz (EMIS), des Luftschadstoff- und Treibhausgasinventars des BAFU, verwendet. Diese Daten beziehen sich allerdings nur auf die Emissionen im Betrieb auf Schweizer Territorium. Wie zu erwarten war, stimmen die Daten aus dem EMIS und der ecoinvent-Datenbank nicht überein. In Absprache mit den beiden Datenlieferanten verwenden wir für die Betriebsemissionen in der Schweiz die Daten aus dem EMIS, da diese laufend aktualisiert werden (die ecoinvent-Datenbank beruht ebenfalls auf dem EMIS, aber auf einer älteren Version des EMIS). Die einzige Ausnahme

---

<sup>116</sup> Streng genommen gilt diese Zunahme nur für den Kostensatz in der Schweiz, aber nicht für den Kostensatz im Ausland. Vereinfachend wird diese Fortschreibung jedoch auch für das Ausland verwendet, weil auch im Ausland eine Zunahme mit dem Reallohn und dem Bevölkerungswachstum erfolgen wird und weil diese Entwicklungen im Ausland ähnlich verlaufen dürften wie in der Schweiz. Eine genauere Analyse ist kaum möglich, da nicht definiert ist, wo genau diese Emissionen im Ausland anfallen.

<sup>117</sup> Der Stand der Datengrundlage ist UVEK (2019).

bildet das Biogas, weil hier in den Emissionen gemäss ecoinvent-Datenbank auch die Herstellung von Biogas in der Schweiz enthält, während im EMIS nur dessen Verbrennung enthalten ist.<sup>118</sup>

Bei allen Technologien der Wärmeerzeugung beziehen sich die Emissionsfaktoren von PM<sub>10</sub>-Äquivalenten pro kWh auf eine kWh Inputenergie (bzw. den Energiegehalt des Inputs an Öl oder Gas etc.). Es werden die folgenden acht Technologien betrachtet (wobei bei allen Technologien mit Daten aus dem EMIS mit «EMIS» gekennzeichnet wurden, wobei die Emissionen im Betrieb in der Schweiz teilweise gleich Null sind (EMIS = 0)):

- Heizöl (EMIS)
- Erdgas (EMIS)
- Wärmepumpe Luft / Wasser (EMIS = 0)
- Wärmepumpe Sole / Wasser (Erdsonde) (EMIS = 0)
- Holz (EMIS)
- Fernwärme (nur Leitungen) (EMIS = 0)
- Biogas
- Solarthermie (für Warmwasser)

Im Folgenden einige Bemerkungen zu einzelnen Technologien:

- Beim **Holz** gibt es mehrere Technologien zur Wärmeerzeugung (Pellets, Schnitzel und Stückholz). Es wird ein Durchschnitt dieser verschiedenen Technologie verwendet, wobei als Gewichtung der Verbrauch in GJ im Jahr 2015 verwendet wird (Daten EMIS).<sup>119</sup>
- **Fernwärme:** Je nach Wärmequelle für die Fernwärme ist die Wärmeproduktion bei der entsprechenden Produktionstechnologie enthalten. Die ausgewiesenen Zahlen bei der Fernwärme beziehen sich deshalb nur auf die zusätzlichen Kosten der Leitungen für die Verteilung der Fernwärme.

Ergänzend noch einige Hinweise zu nicht (explizit) berücksichtigten Technologien:

- **Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA):** Die Emissionen von Luftschadstoffen bei der Abfallverbrennung werden vollständig der Abfallentsorgung angelastet, da die Verbrennung unabhängig von Wärme- bzw. Stromgewinnung durchgeführt werden muss (vgl. auch Fussnote 100 bei der Stromerzeugung). Die Kehrichtverbrennung ist somit im Folgenden nur eine Art der Wärmeerzeugung bei Fernwärmnetzen, deren Leitungen miteinbezogen werden.
- **Elektroheizung:** Im Betrieb entstehen bei Elektroheizungen keine Emission von Luftschadstoffen (ausser bei der Stromproduktion, was bereits vorne berücksichtigt wird). Da Elektroheizungen in Zukunft abgebaut werden, werden kaum mehr neue Heizungen hergestellt,

---

<sup>118</sup> Uns wurden aus der EMIS-Datenbank nur die Emissionen der Verbrennung geliefert, obwohl offenbar, wie wir später erfahren, auch in der EMIS-Datenbank Emissionen zur Herstellung von Biogas verfügbar wären.

<sup>119</sup> Bei der Prognose werden diese Gewichte entsprechend der Prognose im EMIS verändert, wobei es keine grösseren Verschiebungen gibt.

- so dass in Absprache mit dem Auftraggeber auf die Emissionen bei der Herstellung von Elektroheizungen verzichtet wird.
- **Kohle:** Kohle wird in der Schweiz nur noch am Rande eingesetzt. Deshalb wird in Absprache mit dem Auftraggeber Kohle nicht separat erhoben, sondern die Wärmeerzeugung mit Kohle wird vereinfachend der Wärmeerzeugung mit **Holz gleichgesetzt**.
  - **Geothermie:** Gemäss Treyer et al. (2015, S. 216) kann bei gleichzeitiger Produktion von Strom und Wärme durch Geothermie davon ausgegangen werden, dass überschüssige Wärme ohne zusätzliche Belastungen genutzt werden kann. Damit ergeben sich keine zusätzlichen Emissionen durch die Wärmeerzeugung bei gleichzeitiger Stromproduktion. Es sind folglich nur noch die Leitungen der Fernwärmenetze zu berücksichtigen. Für Geothermie-Anlagen, die nur Wärme produzieren, können – in Absprache mit BFE – die Zahlen der Stromproduktion für Geothermie (ohne Stromverteilung und Netz) als Grobschätzung verwendet werden: 0.0591 g PM<sub>10</sub>-Äquivalente pro kWh bzw. 1.605 Rp / kWh (alles in der Schweiz, 90% davon werden durch den Bau verursacht und 10% durch den Betrieb).
  - **Kühlung (Klimaanlagen):** Für Klimaanlagen konnten wir mit unseren Partnern keine Datengrundlagen finden. Als **grobe Näherung** können in Absprache mit ESU-Services Emissionsfaktoren der **Luft-Wärmepumpe** verwendet werden. Die grössten Emissionen durch die Kühlung entstehen aber ohnehin durch den Stromverbrauch, der bereits oben berücksichtigt wird.

## b) Ergebnisse

### Emissionen der Wärmeerzeugungstechnologien

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die erhobenen Emissionen der verschiedenen Technologien der Wärmeerzeugung. Mit Abstand die höchsten Emissionen hat die Wärmeerzeugung mit Holz mit 364 mg PM<sub>10</sub>-Äquivalenten / kWh, was vor allem auf die hohen PM<sub>10</sub>-Emissionen bei der Holzverbrennung zurückzuführen ist. Am zweithöchsten sind die Emissionen der Ölheizungen mit 151 mg / kWh gefolgt von Biogas mit 95 mg / kWh und Erdgas mit 51 mg / kWh. Die Emissionen von Luftschadstoffen von Wärmepumpen (Luft und Erdsonde) sowie Fernwärmeleitungen sind jedoch mit 7 bis 8 mg / kWh sehr tief. Zu beachten ist allerdings, dass die Luftschadstoffemissionen durch den Stromverbrauch wie erwähnt hier nicht betrachtet werden (um Doppelzählungen zu vermeiden). Diese Emissionen sind gemäss dem Strommix der ecoinvent-Datenbank für alle Technologien sehr klein ausser für die Wärmepumpen: Für Luft-Wärmepumpen betragen sie 112 mg / kWh und für Erdsonden 80 mg / kWh (für die übrigen Technologien betragen sie maximal 6 mg / kWh (Erdgas und Holz)).

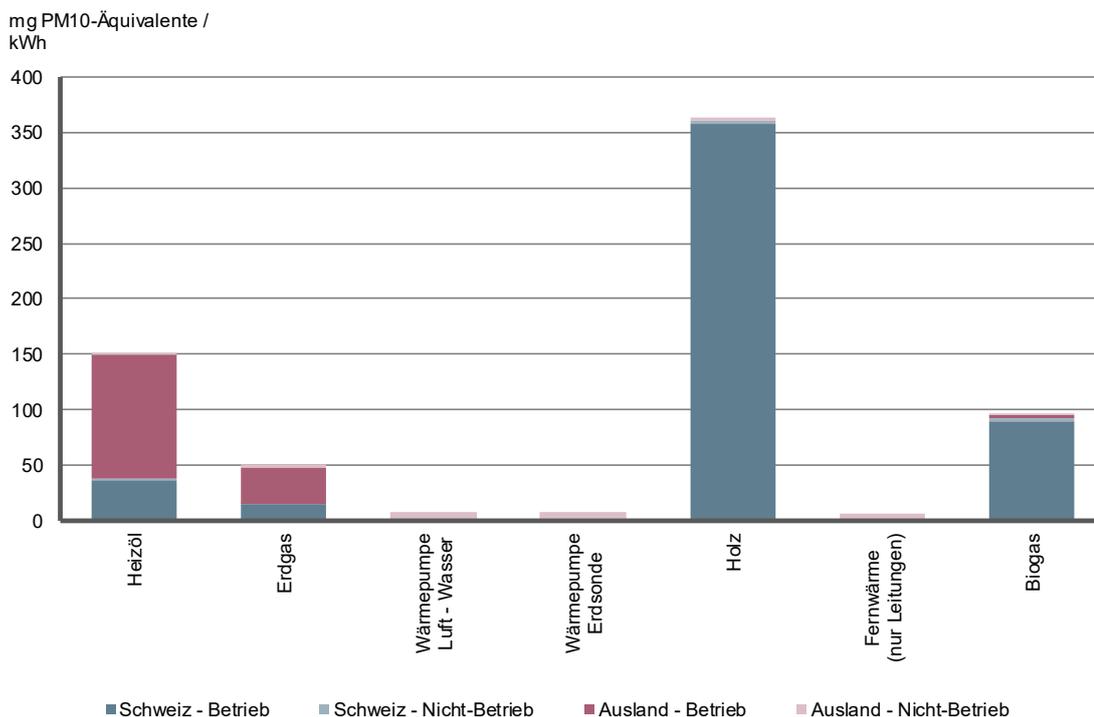
Die Solarthermie wird in einer anderen Einheit berechnet (237 g PM<sub>10</sub>-Äquivalente pro m<sup>2</sup> Kollektorfläche), weil die Datengrundlagen dafür genauer sind. Diese Emissionen fallen für Herstellung und Entsorgung der Solarkollektoren an. Geht man von einer Lebensdauer von 25 Jahren der Solarkollektoren aus (gemäss ESU-Services), so ergeben sich jährliche Kosten von 9.5 g / m<sup>2</sup> Kollektorfläche.

Abbildung 3-14: Emissionen von PM<sub>10</sub>-Äquivalenten in der Wärmeerzeugung

	Emissionsfaktoren in der Schweiz [mg / kWh]	Emissionsfaktoren im Ausland [mg / kWh]	Total [mg / kWh]
<b>Heizöl</b>			
Betrieb	36.4	111.6	<b>147.9</b>
Nicht-Betrieb	1.6	1.3	<b>2.9</b>
<b>Total</b>	<b>37.9</b>	<b>112.9</b>	<b>150.8</b>
<b>Erdgas</b>			
Betrieb	15.0	33.2	<b>48.2</b>
Nicht-Betrieb	0.3	2.6	<b>2.9</b>
<b>Total</b>	<b>15.2</b>	<b>35.9</b>	<b>51.1</b>
<b>Wärmepumpe Luft - Wasser</b>			
Betrieb	0.0	0.0	<b>0.0</b>
Nicht-Betrieb	0.0	7.0	<b>7.0</b>
<b>Total</b>	<b>0.0</b>	<b>7.0</b>	<b>7.0</b>
<b>Wärmepumpe Sole - Wasser (Erdsonde)</b>			
Betrieb	0.0	0.0	<b>0.0</b>
Nicht-Betrieb	2.3	5.6	<b>7.9</b>
<b>Total</b>	<b>2.3</b>	<b>5.6</b>	<b>7.9</b>
<b>Holz</b>			
Betrieb	357.5	0.0	<b>357.5</b>
Nicht-Betrieb	3.3	3.0	<b>6.3</b>
<b>Total</b>	<b>360.8</b>	<b>3.0</b>	<b>363.8</b>
<b>Fernwärme (nur Leitungen)</b>			
Betrieb	0.0	0.0	<b>0.0</b>
Nicht-Betrieb	0.6	6.3	<b>6.9</b>
<b>Total</b>	<b>0.6</b>	<b>6.3</b>	<b>6.9</b>
<b>Biogas</b>			
Betrieb	89.7	2.0	<b>91.7</b>
Nicht-Betrieb	2.8	0.1	<b>2.9</b>
<b>Total</b>	<b>92.5</b>	<b>2.1</b>	<b>94.6</b>
<b>Solarthermie</b>			
	[g / m <sup>2</sup> ]	[g / m <sup>2</sup> ]	[g / m <sup>2</sup> ]
Betrieb	0.0	0.0	<b>0.0</b>
Nicht-Betrieb	5.2	232.1	<b>237.3</b>
<b>Total</b>	<b>5.2</b>	<b>232.1</b>	<b>237.3</b>

Quellen: Ecoinvent-Datenbank und EMIS des BAFU.

Abbildung 3-15: Emissionen von PM<sub>10</sub>-Äquivalenten in der Wärmeerzeugung



### Anteil der Emissionen in der Schweiz bzw. im Betrieb

Die beiden vorangehenden Abbildungen zeigen auch den Anteil der Emissionen von PM<sub>10</sub>-Äquivalenten in der Schweiz bzw. im Betrieb. Bei Holz und Biogas entstehen fast alle Emissionen in der Schweiz (99% bzw. 98%), weil auch die «Rohstoffe» in der Schweiz abgebaut / hergestellt werden. Bei den drei Technologien Erdgas, Erdsonde und Heizöl beträgt der Schweizer Anteil hingegen nur 25% bis 30%. Bei den Fernwärmeleitungen beläuft sich der Schweizer Anteil noch auf 9%.<sup>120</sup> Bei der Solarthermie ist der Anteil mit 2% sehr gering und bei der Luft-Wärmepumpe ist er gar Null.<sup>121</sup>

Der Anteil der Emissionen im Betrieb ist entweder fast 100% oder 0%: Sehr hoch ist der Anteil bei Holz (98%), Heizöl (98%), Biogas (97%) und Erdgas (94%). Hingegen entstehen bei den anderen Technologien (beide Wärmepumpen, Fernwärmeleitungen, und Solarthermie) gar keine Emissionen von Luftschadstoffen im Betrieb (bei den Wärmepumpen, weil der Stromverbrauch bei der Stromproduktion berücksichtigt wird).

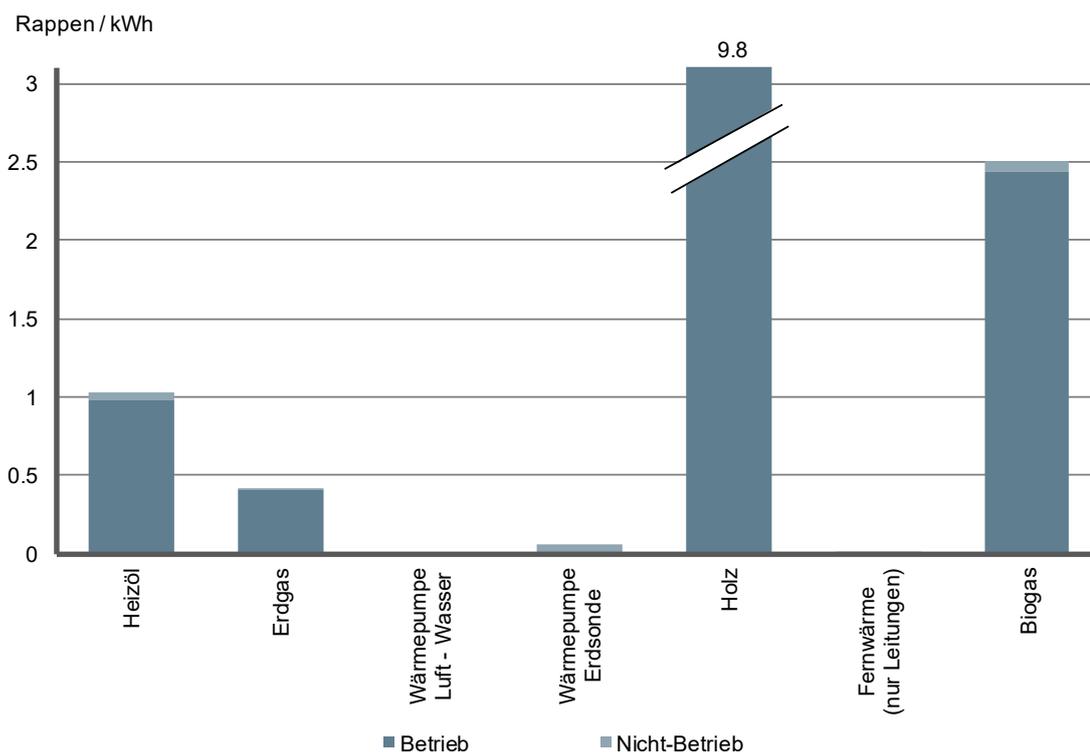
<sup>120</sup> Es ist darauf hinzuweisen, dass diese Aufteilungen mit Unsicherheiten behaftet sind, da die Ecoinvent-Datenbank nicht für die Aufteilung auf Schweiz / Ausland erstellt wurde. Bei den Fernwärmeleitungen kommt dazu, dass die Hauptemissionen der Fernwärme durch die Wärmeerzeugung entstehen und entsprechend die Emissionen durch die Leitungen nicht bis ins letzte Detail ausgearbeitet wurden.

<sup>121</sup> Der Anteil ist Null, weil von einer Herstellung der Wärmepumpe im Ausland ausgegangen wird.

### Externe Kosten der Luftbelastung in der Schweiz

Um die externen Kosten durch die Wärmeerzeugung in der Schweiz zu ermitteln, können die sieben dargestellten Emissionsfaktoren mit dem Kostensatz von 272'000 CHF / t PM<sub>10</sub>-Äquivalent multipliziert werden (vgl. Kapitel 3.3 bzw. Abbildung 3-3). Das Ergebnis für die externen Kosten in der Schweiz wird in den folgenden beiden Abbildungen dargestellt.

**Abbildung 3-16: Externe Kosten der Luftbelastung in der Schweiz durch Wärmeerzeugung**



Wie sich zeigt, sind die Kosten der Luftverschmutzung beim Holz mit 9.8 Rp / kWh mit Abstand am grössten. Am zweithöchsten sind die Kosten der Luftbelastung beim Biogas mit 2.5 Rp / kWh, gefolgt vom Heizöl mit 1.0 Rp / kWh und dem Erdgas mit 0.4 Rp / kWh. Sehr tief sind die Kosten in der Schweiz bei der Boden-Wärmepumpe (0.06 Rp / kWh), den Fernwärmeleitungen (0.02 Rp / kWh) und Luftwärmepumpe, bei der gar keine Kosten in der Schweiz anfallen. Bei der Solarthermie entstehen Kosten von 1.4 CHF / m<sup>2</sup> Kollektorfläche bzw. 0.06 CHF / m<sup>2</sup> pro Jahr (bei einer Lebensdauer von 25 Jahren).

### Gesamte externe Kosten der Luftbelastung in der Schweiz und im Ausland

Durch die Wärmeproduktion in der Schweiz fallen aber auch im Ausland weitere Kosten der Luftbelastung an. Diese werden wie bei der Stromproduktion mit einem Kostensatz von 47'000 CHF / t PM<sub>10</sub>-Äquivalent monetarisiert. Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die Ergebnisse für die gesamten weltweiten Kosten der Luftverschmutzung (ohne Stromverbrauch).

Abbildung 3-17: Externe Kosten der Luftbelastung durch Wärmeerzeugung

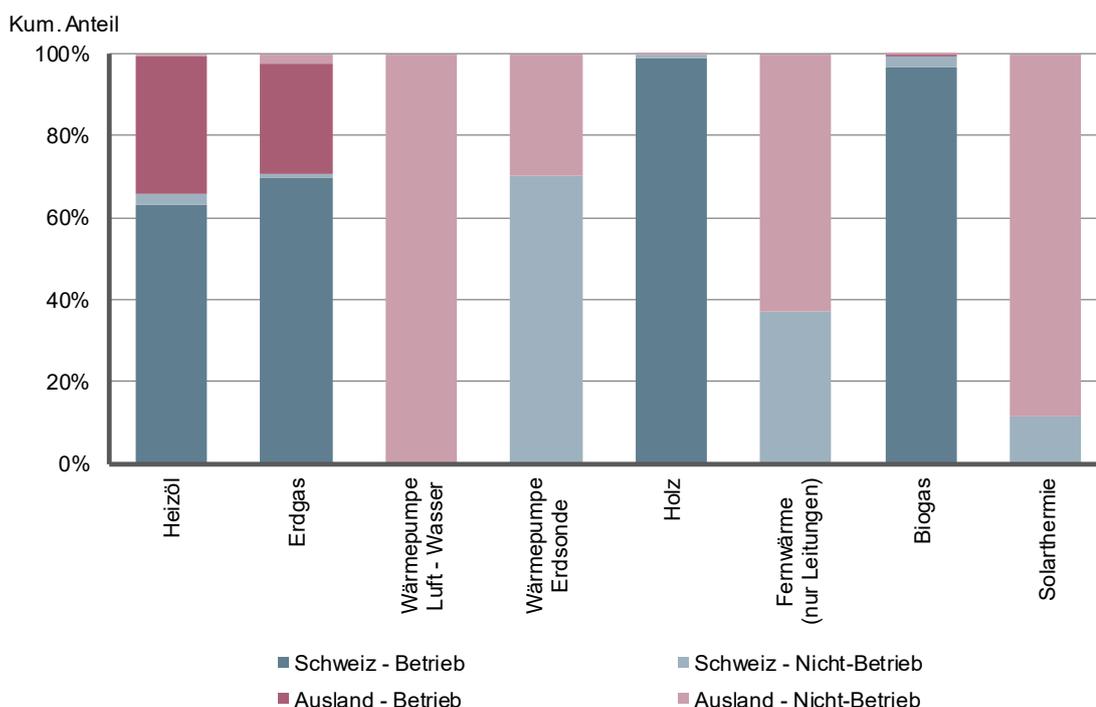
	Externe Kosten in der Schweiz [Rappen / kWh]	Externe Kosten im Ausland [Rappen / kWh]	Total [Rappen / kWh]
<b>Heizöl</b>			
Betrieb	0.988	0.528	<b>1.516</b>
Nicht-Betrieb	0.042	0.006	<b>0.049</b>
<b>Total</b>	<b>1.030</b>	<b>0.535</b>	<b>1.565</b>
<b>Erdgas</b>			
Betrieb	0.407	0.157	<b>0.564</b>
Nicht-Betrieb	0.007	0.013	<b>0.019</b>
<b>Total</b>	<b>0.414</b>	<b>0.170</b>	<b>0.584</b>
<b>Wärmepumpe Luft - Wasser</b>			
Betrieb	0.000	0.000	<b>0.000</b>
Nicht-Betrieb	0.000	0.033	<b>0.033</b>
<b>Total</b>	<b>0.000</b>	<b>0.033</b>	<b>0.033</b>
<b>Wärmepumpe Sole - Wasser (Erdsonde)</b>			
Betrieb	0.000	0.000	<b>0.000</b>
Nicht-Betrieb	0.062	0.027	<b>0.089</b>
<b>Total</b>	<b>0.062</b>	<b>0.027</b>	<b>0.089</b>
<b>Holz</b>			
Betrieb	9.707	0.000	<b>9.707</b>
Nicht-Betrieb	0.089	0.014	<b>0.103</b>
<b>Total</b>	<b>9.797</b>	<b>0.014</b>	<b>9.811</b>
<b>Fernwärme (nur Leitungen)</b>			
Betrieb	0.000	0.000	<b>0.000</b>
Nicht-Betrieb	0.018	0.030	<b>0.047</b>
<b>Total</b>	<b>0.018</b>	<b>0.030</b>	<b>0.047</b>
<b>Biogas</b>			
Betrieb	2.435	0.010	<b>2.444</b>
Nicht-Betrieb	0.077	0.000	<b>0.077</b>
<b>Total</b>	<b>2.512</b>	<b>0.010</b>	<b>2.522</b>
<b>Solarthermie</b>			
	[CHF / m2]	[CHF / m2]	[CHF / m2]
Betrieb	0.000	0.000	<b>0.000</b>
Nicht-Betrieb	1.418	10.989	<b>12.407</b>
<b>Total</b>	<b>1.418</b>	<b>10.989</b>	<b>12.407</b>

Grobschätzungen kursiv.

Auf eine Abbildung der Kosten pro kWh verzichten wir, weil diese sehr ähnlich aussieht wie Abbildung 3-16: Die beiden Technologien mit den höchsten Kosten im Bereich Luftbelastung – Holz und Biogas – haben kaum Kosten im Ausland und nehmen damit nur marginal zu (auf 9.81 Rp / kWh bzw. 2.52 Rp / kWh). Die Kosten von Heizöl (1.56 Rp / kWh), Erdgas (0.58 Rp / kWh), und Erdsonden (0.09 Rp / kWh) nehmen alle um etwa 50% zu – bei der Erdsonde allerdings auf sehr tiefem Niveau. Die Kosten der Fernwärmeleitungen verdreifachen sich zwar beinahe, aber ebenfalls auf sehr tiefem Niveau (0.05 Rp / kWh). Und die Luft-Wärmepumpe ist nun ebenfalls mit geringen Kosten von 0.03 Rp / kWh verbunden. Am stärksten nehmen jedoch die Kosten der Solarthermie zu, wenn das Ausland mitberücksichtigt wird: Sie steigen knapp um den Faktor 9 auf 12.4 CHF / m<sup>2</sup> Kollektorfläche (oder 0.50 CHF / m<sup>2</sup> / Jahr).

In Abbildung 3-18 werden noch die relativen Anteile der Emissionen in der Schweiz bzw. im Ausland bzw. im Betrieb und Nicht-Betrieb illustriert. Es zeigt sich, dass Holz und Biogas praktisch die gesamten Kosten in der Schweiz anfallen (über 99.5%). Bei Erdgas, Erdsonden und Heizöl beträgt der Schweizer Anteil an den Kosten ca. 70%. Bei den Fernwärmeleitungen fallen 37% der Kosten in der Schweiz an, bei der Solarthermie noch 11%. Bei der Luft-Wärmepumpe fallen jedoch keine Kosten in der Schweiz an. Zudem fällt bei Holz (99%), Heizöl, Erdgas und Biogas (alle 97%) der Grossteil der Kosten im Betrieb an, weil bei diesen Technologien ein Brennstoff verbrannt wird – mit entsprechenden Emissionen. Bei den übrigen Technologien fallen hingegen überhaupt keine Kosten im Betrieb an (Wärmepumpen, Fernwärmeleitungen und Solarthermie).

**Abbildung 3-18: Relative Verteilung der weltweiten externen Kosten der Luftbelastung durch Wärmeerzeugung in der Schweiz**



### c) Vergleich zu den bisherigen Werten

In der Studie Ecoplan (2012) wurde nur Heizöl und Erdgas untersucht. Für diese beiden Wärmequellen wurden zudem nur die Emissionen im Betrieb in der Schweiz analysiert (basierend auf den damaligen Daten aus dem EMIS des BAFU) – die Nicht-Betriebs-Emissionen und die Emissionen im Ausland wurden 2012 vernachlässigt. Wie die folgende Abbildung zeigt, sind die Emissionen gesunken – um 24% beim Heizöl bzw. um 15% beim Erdgas. Das Heizen mit Öl oder Gas wurde also im Zeitverlauf weniger belastend für die Luftqualität. Wie bereits erwähnt (vgl. Kapitel 3.3d) hat jedoch der Kostensatz um 68% zugenommen (insbesondere aufgrund des höheren VOSL). Damit fällt der Kostensatz pro kWh um 28% (Öl) bzw. 43% (Erdgas) höher aus als bisher. Werden jedoch auch die Emissionen im Ausland und im Nicht-Betrieb berücksichtigt, so steigen die Kostensätze von Gas und Öl gegenüber bisher auf gut das Doppelte.

**Abbildung 3-19: Vergleich zu den bisherigen Ergebnissen für den Betrieb in der Schweiz**

	Emissionen [g / kWh]	Kostensatz [Rp / g]	Kosten [Rappen / kWh]
Heizöl bisher	0.0477	16.2	0.77
Heizöl neu	0.0364	27.2	0.988
Veränderung in %	-24%	68%	28%
Erdgas bisher	0.0176	16.2	0.29
Erdgas neu	0.0150	27.2	0.407
Veränderung in %	-15%	68%	43%

### d) Vergleich zu internationalen Werten

Wiederum werden die Ergebnisse mit der deutschen Methodenkonvention 3.0<sup>122</sup> verglichen. Dort werden die Kosten der Luftbelastung von mehreren Technologien zur Wärmeerzeugung aufgeführt. In den Zahlen enthalten sind wie bei der Stromerzeugung auch die vor- und nachgelagerten Prozesse (unklar, ob nur in Deutschland oder auch im Ausland, vgl. Kapitel d). Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse ist insofern eingeschränkt als die Werte für Deutschland pro kWh Endenergie gelten, die Werte für die Schweiz aber pro kWh Inputenergie. Damit ergeben sich für Deutschland teilweise höhere teilweise tiefere Werte als in der Schweiz.<sup>123</sup> Die deutlich

<sup>122</sup> Umweltbundesamt (2019), Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten. Kostensätze.

<sup>123</sup> Die errechneten Werte für Deutschland (in kaufkraftbereinigten Rp / kWh) sind wie folgt:

- Heizöl 1.42 (1.56 bzw. 1.03 – Wert für die Schweiz inkl. bzw. exkl. Ausland)
- Erdgas 0.67 (0.58 bzw. 0.41)
- Fernwärme 2.25 (0.05 bzw. 0.02) – nicht vergleichbar, weil in Deutschland inkl. Wärmeproduktion und Netzverlusten in Schweiz nur Fernwärmeleitungen
- Biomasse 3.69 (2.52 bzw. 2.51 für Biogas oder 9.81 bzw. 9.80 für Holz)

tiefere Kostensätze in Deutschland (siehe Kapitel 3.3d) werden hier also teilweise durch andere methodische Effekte überlagert.

### e) Prognose bis 2060

Die Prognose bei der Wärmeerzeugung wird methodisch gleich erstellt wie bei der Stromerzeugung: Wir gehen also aufgrund der Schwierigkeiten bei der Prognose von konstanten Emissionsfaktoren aus, sofern nicht bessere Datengrundlagen zur Verfügung stehen. Bessere Datengrundlagen liegen einzig aus dem EMIS vor und auch nur für einzelne Technologien für die Emissionen im Betrieb in der Schweiz bis 2035. Wie in Kapitel e) erläutert, beruhen diese Prognosen auf der Annahme, dass die heute besten Technologien sich bis 2035 durchsetzen und ältere Technologien mit höheren Emissionsfaktoren verdrängen.

Das EMIS sagt für die Betriebsemissionen in der Schweiz bis 2035 folgende Veränderungen voraus:

- Heizöl: -28.5% (oder -1.66% pro Jahr bis 2035)
- Erdgas: -17.1% (oder -0.94% pro Jahr bis 2035)
- Holz: -48.2% (oder -3.23% pro Jahr bis 2035)

Für Erdgas und Holz sind dies exakt dieselben Annahmen wie bei der Stromproduktion, weil gemäss BAFU nur die verwendete Energiequelle relevant ist, nicht ob Strom oder Wärme daraus gewonnen wird. Beim Heizöl führt diese Abnahme (bei sonst unveränderten Annahmen) zu einer Reduktion des Gesamtkostensatzes (im In- und Ausland) bis 2035 von 1.56 auf 1.28 Rp / kWh (-18.0%), beim Erdgas von 0.58 auf 0.51 Rp / kWh (-11.9%) und beim Holz von 9.81 auf 5.13 Rp / kWh (-47.7%). Die Reihenfolge der Technologien verändert sich dadurch nicht.

Für die anderen Technologien liegen keine Daten vor, so dass Konstanz angenommen wird.

Neben diesen Veränderungen der Emissionsfaktoren gilt es auch die Veränderungen der **Kostensätze** zu berücksichtigen, die gemäss Kapitel e) mit **88% des Reallohnwachstums** und **88% des Bevölkerungswachstums** zunehmen.

## 3.6 Externe Kosten Luftbelastung von Sektorkopplungstechnologien

Im Folgenden werden die Kosten der Luftbelastung durch Sektorkopplungstechnologien (Power-to-X) untersucht. Power-to-X bezeichnet verschiedene Technologien zur Speicherung bzw. anderweitigen Nutzung von Stromüberschüssen in Zeiten eines (zukünftigen) Überangebotes variabler erneuerbarer Energien wie Solarenergie, Windenergie und Wasserkraft.<sup>124</sup> Mit solchen Technologien können durch (nachhaltig produzierten) Strom fossile Energieträger substituiert werden. Beispielsweise kann mit Strom erzeugter Wasserstoff (Power to Hydrogen

---

– Solarthermie 0.35 und damit deutlich am tiefsten (ausser Tiefengeothermie mit 0.02, die bei uns mit Null bewertet wird (bei gleichzeitiger Stromproduktion))

<sup>124</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/Power-to-X>

= PtH<sub>2</sub>) Diesel oder Benzin in Fahrzeugen ersetzen. Dadurch können insbesondere Treibhausgasemissionen vermieden werden, die hier aber nicht berücksichtigt werden. Bei den Luftschadstoffen werden jedoch keine grösseren Unterschiede erwartet.

In den Energieperspektiven 2050+ wird Power-to-X im Verkehr berücksichtigt, und zwar in den Formen Power to Hydrogen (PtH<sub>2</sub>), Power-to-Benzin, Power-to-Diesel und Power-to-Kerosin. Der Verbrauch dieser synthetischen Treibstoffe ist bereits im von Infras aufbereiteten verkehrlichen Mengengerüst enthalten, d.h. in den von Infras ermittelten Emissionen von Luftschadstoffen (und Klimagasen) sind die Emissionen beim Verbrauch der synthetischen Treibstoffe bereits enthalten.

Was hingegen noch fehlt, sind die Emissionen bei der Herstellung dieser Treibstoffe und dem Bau der Produktionsstätten. PtH<sub>2</sub> wird durch Elektrolyse in der Schweiz und im Ausland hergestellt. Die übrigen synthetischen Treibstoffe werden voraussichtlich nur im Ausland hergestellt. Es wurde nach Daten für die Herstellung synthetischer Treibstoffe Power-to-X gesucht. Jedoch konnten nur Daten für die Herstellung von PtH<sub>2</sub> gefunden werden, für die anderen synthetischen Treibstoffe (Power-to-Benzin, Power-to-Diesel und Power-to-Kerosin) konnten keine Daten gefunden werden. Die Daten für PtH<sub>2</sub> stammen ebenfalls aus der ecoinvent-Datenbank.

Die folgende Abbildung zeigt die Emissionsfaktoren von PtH<sub>2</sub>. Bei der Produktion in der Schweiz darf der Stromverbrauch nicht berücksichtigt werden, weil es sonst zu einer Doppelzählung kommen würde. Der Grossteil der Emissionen entsteht jedoch durch den Stromverbrauch. Die verbleibenden Emissionen belaufen sich noch auf 6 mg PM<sub>10</sub>-Äquivalente pro kWh, wobei etwa die Hälfte in der Schweiz anfällt. Bei einer Produktion im Ausland wird der Stromverbrauch aber miteinbezogen, da die externen Kosten der Stromerzeugung im Ausland nicht bei den hier nur für das Inland berechneten Kosten berücksichtigt sind. Damit sind die Emissionen bei einer Produktion im Ausland mit 33 mg / kWh deutlich höher.

**Abbildung 3-20: Emissionsfaktoren von PM<sub>10</sub>-Äquivalenten bei der Herstellung von PtH<sub>2</sub>**

PtH <sub>2</sub>	Emissionsfaktoren in der Schweiz [mg / kWh]	Emissionsfaktoren im Ausland [mg / kWh]	Total [mg / kWh]
Produktion in der Schweiz	3.0	3.0	<b>6.0</b>
Produktion im Ausland	0.0	33.2	<b>33.2</b>

Werden die bekannten Kostensätze von 272'000 CHF / Tonne PM<sub>10</sub>-Äquivalent in der Schweiz bzw. 47'000 CHF / Tonne im Ausland angewendet, ergeben sich Kosten von 0.09 Rp / kWh in der Schweiz bzw. 0.16 Rp / kWh im Ausland. Die tatsächlichen Kosten für die Herstellung in der Schweiz werden aber (je nach Stromerzeugungstechnologie) höher sein, wenn die Kosten der Stromerzeugung mitgerechnet werden.

Abbildung 3-21: Externe Kosten von PM<sub>10</sub>-Äquivalenten bei der Herstellung von P<sub>t</sub>H<sub>2</sub>

P <sub>t</sub> H <sub>2</sub>	Externe Kosten in der Schweiz [Rappen / kWh]	Externe Kosten im Ausland [Rappen / kWh]	Total [Rappen / kWh]
Produktion in der Schweiz	0.080	0.014	<b>0.094</b>
Produktion im Ausland	0.000	0.157	<b>0.157</b>

Grobschätzungen kursiv.

Es liegen keine Prognosen für die Emissionsfaktoren von P<sub>t</sub>H<sub>2</sub> vor, so dass von Konstanz ausgegangen wird. Der Kostensatz nimmt jedoch ebenfalls mit **88% des Reallohnwachstums** und **88% des Bevölkerungswachstums** zu (vgl. Kapitel 3.3e).

## 4 Herleitung von Kostensätzen für die Luftbelastung in der Produktion

Es sollen auch die Auswirkungen auf die Luftbelastung von Veränderungen in den übrigen Produktionssektoren – also den «Nicht-Energiesektoren» – berücksichtigt werden. Deshalb sind insbesondere für verschiedene Industriesektoren sowie für die Land- und Forstwirtschaft die luftbelastungsbedingten externen Kosten zu berechnen. Es handelt sich dabei um nicht-energetische externe Kosten.

Dazu verwenden wir die Emissionen von PM<sub>10</sub>-Äquivalenten aus Abbildung 3-1 sowie den Kostensatz von 272'000 CHF pro Tonne PM<sub>10</sub>-Äquivalente (vgl. Abbildung 3-3), um die Ergebnisse für das Jahr 2015 in der folgenden Abbildung herzuleiten. Damit wird für die gesamten Emissionen in der Schweiz der Grenzkostensatz verwendet. Wie in Kapitel 3.3b) erläutert, ist dies gleichbedeutend mit der Annahme, dass auch unterhalb einer Schadensgrenze von 3.3 µg / m<sup>3</sup> Gesundheitsschäden auftreten. Hier geht es jedoch letztendlich darum, die Veränderungen im Output gewisser Wirtschaftssektoren (in der folgenden Abbildung grau hinterlegt<sup>125</sup>) aus dem Gleichgewichtsmodell in Veränderungen der luftbelastungsbedingten Kosten umzurechnen. Dazu wird der oben bestimmte Grenzkostensatz von 272'000 CHF pro Tonne PM<sub>10</sub>-Äquivalent verwendet. Erst am Ende der Berechnungen wird dann geprüft, ob die gesamte Reduktion der Luftbelastungskosten grösser als 79.03% ist. Ist dies der Fall, ist der neue Schwellenwert von 3.3 µg / m<sup>3</sup> bindend und die berechneten Nutzen müssen entsprechend reduziert werden (vgl. Kapitel 3.3d) oben).

Mit den Zahlen in Abbildung 4-1 können die Veränderungen im Output gewisser Wirtschaftssektoren (in der folgenden Abbildung grau hinterlegt) in Veränderungen der luftbelastungsbedingten Kosten umgerechnet werden (vereinfachend mit einem einfachen Dreisatz). Dabei

<sup>125</sup> Es werden alle Sektoren berücksichtigt, die nicht andernorts miteinbezogen werden. Um Doppelzählungen zu vermeiden, wird also der Verkehr, alle Feuerungen und die Elektrizität ausgeschlossen.

werden nur die Emissionen im Inland berücksichtigt (Emissionen durch vor- und nachgelagerte Prozesse z.B. durch eingekaufte Vorleistungen werden vernachlässigt, soweit sie nicht in einem der anderen Sektoren in der Schweiz geleistet werden). Dies bedeutet, dass eine lineare Beziehung zwischen Output und externen Kosten unterstellt wird: Wenn die Produktion in einem Sektor um 5% zurückgeht, gehen auch die externen Kosten dieses Sektors um 5% zurück.

**Abbildung 4-1: Gesamte externe Kosten der Luftbelastung (ohne Schadensgrenze bei Gesundheitskosten) im Jahr 2015 (relevante Sektoren grau hinterlegt)**

	t PM10-Äquivalente	ext. Kosten in Mio. CHF
<b>Verkehr</b>	<b>14'724</b>	<b>3'998</b>
Strassenverkehr	11'398	3'095
Schienenverkehr	1'346	366
Flugverkehr	1'590	432
Schifffahrt	390	106
<b>Haushalte</b>	<b>4'634</b>	<b>1'258</b>
Feuerungen Öl und Gas	990	269
Feuerungen Holz und Kohle	1'769	480
Rest	1'876	509
<b>Industrie und Gewerbe</b>	<b>10'002</b>	<b>2'716</b>
Industrie Steine Erden	1'504	409
Abfallindustrie	708	192
Baugewerbe	2'755	748
Industrielle Maschinen	254	69
Raffinerien	291	79
Prozesse weitere	2'027	550
Elektrizität	40	11
Fernwärme	119	32
Feuerungen Industrie	786	213
Feuerungen GD	1'211	329
Industrie Gewerbe andere	307	83
<b>Land- und Forstwirtschaft</b>	<b>20'230</b>	<b>5'493</b>
Nutztierhaltung	9'261	2'515
Feuerungen	51	14
Maschinen Geräte	892	242
Rest	10'026	2'722
<b>Gesamttotal</b>	<b>49'590</b>	<b>13'466</b>

Die hier interessierenden Sektoren (in Abbildung 4-1 grau hinterlegt) summieren sich auf 7.6 Mrd. CHF (davon 2.1 Mrd. CHF Industrie und Gewerbe sowie 5.5 Mrd. Landwirtschaft).

Die Ergebnisse in Abbildung 4-1 weichen beim Strassen- und Schienenverkehr von den tatsächlichen, berechneten Werten aus Abbildung 5-2 unten ab: Im Strassenverkehr um  $-7\%$ , im Schienenverkehr um  $-8\%$ , im Luftverkehr um den Faktor  $10^{126}$  und im Schiffsverkehr um  $49\%$ .<sup>127</sup> Dies gibt einen Hinweis auf die Genauigkeit der Schätzung: Die tatsächlichen Ergebnisse einzelner Sektoren könnten durchaus auch um  $50\%$  (oder mehr) von den Schätzungen in Abbildung 4-1 abweichen.

Abbildung 4-1 zeigt auch, dass durch die Produktion von Elektrizität lediglich externe Kosten im Bereich Luftbelastung von gut 11 Mio. CHF entstehen. Die Wärmeproduktion (Feuerungen in Haushalten, Industrie, Gewerbe und Landwirtschaft sowie Fernwärme) verursacht luftbelastungsbedingte Kosten von 1.3 Mrd. CHF. Die externen Kosten im Verkehr von 4.0 Mrd. CHF sind also etwa drei Mal so hoch wie diese Werte. Ausserdem verursacht der Verkehr noch weitere externe Kosten wie z.B. Lärm, Stau und Unfälle (siehe Kapitel 2.2 bzw. Kapitel 5), die im Energiesektor kaum von Bedeutung sind – mit Ausnahme der Unfälle, insbesondere in der Kernenergie (vgl. Exkurs in Kapitel 2.2). Gesamthaft entstehen durch die Luftbelastung Kosten von 13.5 Mrd. CHF im Jahr 2015,<sup>128</sup> wobei wie erwähnt der Schwellenwert von  $3.3 \mu\text{g} / \text{m}^3$  bei den Gesundheitskosten hier nicht berücksichtigt wird (der Schwellenwert wird erst ganz am Schluss der Berechnungen berücksichtigt).

### Vergleich zu bisherigen Werten

In der Schätzung von 2012 ging man für die hier relevanten (grau hervorgehobenen) Sektoren von 5.7 Mrd. CHF aus (davon 1.3 Mrd. CHF Industrie und Gewerbe sowie 4.4 Mrd. Landwirtschaft). Die Kosten werden heute mit 7.6 Mrd. CHF also  $33\%$  höher geschätzt (Industrie und Gewerbe  $+60\%$ , Landwirtschaft  $+25\%$ ). Der Hauptgrund für die Erhöhung ist der neue um  $68\%$  höhere Kostensatz. Denn die Emissionen haben um  $20\%$  abgenommen (Industrie und Gewerbe  $-5\%$ , Landwirtschaft  $-25\%$ ).

### Prognose bis 2060

Für eine möglichst robuste Prognose der Emissionen von  $\text{PM}_{10}$ -Äquivalenten durch die Produktion müssten neben der Produktionsmenge auch die Emissionsfaktoren nach Sektoren vorausgesagt werden. Dazu müssten die einzelnen Prozesse genauer untersucht werden, die

---

<sup>126</sup> Diese hohe Abweichung im Luftverkehr dürfte darauf zurückzuführen sein, dass in den ARE-Berechnungen nur die Emissionen im LTO-Zyklus bis 900m Höhe berücksichtigt werden (Infras, EcoPlan 2012, Integration des Luftverkehrs in die Transportrechnung, S. 110), in der Abbildung 4-1 aber auch die Emissionen in grösserer Höhe, inkl. der Emissionen von Überflügen.

<sup>127</sup> Bei der Berechnung der externen Kosten des Verkehrs in Abbildung 5-2 wird der genaue Emissionsort miteinbezogen, hier jedoch alles über einen Durchschnitt berechnet, was zu Differenzen führt.

<sup>128</sup> Dieser Wert widerspricht dem Ergebnis aus Abbildung 3-3 von 14.2 Mrd. CHF. Dieser Unterschied ist wie folgt zu erklären: In Abbildung 3-3 basiert die Berechnung auf den Emissionen wie sie den Berechnungen für das ARE zugrunde gelegt wurden. Die Berechnung in Abbildung 4-1 auf den aktualisierten Emissionszahlen des BAFU. Aufgrund der aktualisierten Daten geht man neu von  $5\%$  tieferen Gesamtemissionen aus.

innerhalb einer Branche stark variieren können. Da dies kaum durchführbar ist und es sich bei den vorliegenden Zahlen nur um eine Grobschätzung handelt, verzichten wir auf eine Prognose der Emissionsfaktoren und nehmen damit an, dass diese konstant bleiben.

Zu berücksichtigen ist aber auch hier die Zunahme des Kostensatzes, der mit **88% des Reallohnwachstums** und mit **88% des Bevölkerungswachstums** zunimmt (vgl. Kapitel 3.3e).

## 5 Herleitung von Kostensätzen für die externen Kosten des Verkehrs

### 5.1 Überblick

Im Folgenden werden die externen Kosten des Verkehrs aus Sicht Verkehrsteilnehmende dargestellt. Dabei konzentrieren wir uns auf den Strassen-, Schienen- und Luftverkehr (vgl. folgende Abbildung) – basierend auf den umfangreichen Berechnungen im Auftrag des ARE. Im Vergleich zu den bisherigen Arbeiten in Ecoplan (2012)<sup>129</sup> wird neben dem Strassen- und Schienenverkehr neu auch der Luftverkehr miteinbezogen, zu dem bisher keine Datengrundlagen zur Verfügung standen, mittlerweile aber im Auftrag des ARE erarbeitet wurden. Weiterhin nicht mit einbezogen werden hingegen der Schiffs- und Langsamverkehr (Fuss- und Veloverkehr), da beide in den Energieperspektiven 2050+ nicht modelliert werden und ihr Beitrag zu den externen Effekten gering ist.

---

<sup>129</sup> Ecoplan (2012), Energiestrategie 2050 – volkswirtschaftliche Auswirkungen, Anhang C.

Abbildung 5-1: Berücksichtigte und nicht berücksichtigte Verkehrsbereiche

Verkehrsbereich		✓ berücksichtigt
		✗ nicht berücksichtigt
Strassenverkehr	Personenwagen	✓
	Gesellschaftswagen (Car)	✓
	Motorisierte Zweiräder (Motorrad und Mofa)	✓
	Bus (öffentlicher Linienbus)	✓
	Trolleybus	✓
	Tram	✓
	Lieferwagen	✓
	Schwere Nutzfahrzeuge	✓
	Langsamverkehr (Fuss- und Veloverkehr)	✗
Schienenverkehr	Personen	✓
	Güter	✓
Luftverkehr	Personen und Güter	✓
Schiffsverkehr		✗

In den nachfolgenden Ausführungen beschränken wir uns auf die Darstellung der Ergebnisse der neusten methodischen Schweizer Studien (Infras und EcoPlan 2019 im Auftrag des ARE<sup>130</sup>) – also auf die offiziell gültigen Werte für die Schweiz. Ergänzt werden diese Zahlen durch die Staukosten: Im Auftrag des ARE wurden die gesamten Zeitkosten durch Staus berechnet.<sup>131</sup> Ob diese Kosten extern oder intern sind, wurde in der Studie jedoch nicht untersucht. Im EU-Handbuch<sup>132</sup> werden die Staukosten als externen Kosten mitberücksichtigt, was wir hier deshalb auch tun.

Abbildung 5-2 zeigt einen Überblick über die gesamten externen Kosten in den berücksichtigten Verkehrsbereichen im Jahr 2015 (bei allen Angaben handelt sich um Faktorpreise<sup>133</sup>). Dabei wird nach Strassen-, Schienen- und Luftverkehr differenziert sowie nach Personen- und Güterverkehr (Strassenverkehr im Gegensatz zu den Studien für das ARE ohne Langsamverkehr). Aus Sicht Verkehrsteilnehmende fallen insgesamt externe Kosten von mindestens 15.8 Mrd. CHF an. Davon entfallen 12.5 Mrd. CHF auf den motorisierten Strassenverkehr,<sup>134</sup> 1.1 Mrd. CHF auf den Schienenverkehr und 1.2 Mrd. CHF auf den Luftverkehr. Im motorisierten Strassenverkehr verursacht der Personenverkehr 84% der Kosten (und damit der Güterverkehr

<sup>130</sup> Infras, EcoPlan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015, Aktualisierung der Berechnungen von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten des Strassen-, Schienen-, Luft- und Schiffsverkehrs 2010 bis 2015..

<sup>131</sup> Keller (2019), Staukosten Schweiz 2015.

<sup>132</sup> European Commission (2019), Handbook on the external costs of Transport, S. 94 und 129-130.

<sup>133</sup> Kosten zu Marktpreisen abzüglich der indirekten Steuerbelastung (z.B. durch MWST, Benzinzoll, Zollzuschlag, Fahrzeugsteuer).

<sup>134</sup> Für die detaillierte Herleitung der Kosten im Strassenverkehr siehe Abbildung 5-3 unten.

16%). Im Schienenverkehr liegt der Anteil des Personenverkehrs mit 54% deutlich tiefer. Im Luftverkehr beträgt der Personenverkehrsanteil 93%.

Weiter zeigt Abbildung 5-2 (grau hinterlegte Werte), welche Kostenbereiche im Rahmen der Energieperspektiven 2050+ bei der Schätzung der «Sekundäreffekte» berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 2.2). Diese Kostenbereiche verursachen externe Kosten von insgesamt 11.0 Mrd. CHF (70% der gesamten externen Kosten aus Sicht Verkehrsteilnehmende). Davon entfallen 9.0 Mrd. CHF auf den Strassenverkehr, 0.9 Mrd. CHF auf den Schienenverkehr und 0.2 Mrd. CHF auf den Luftverkehr (davon entfallen 86%, 51% bzw. 94% auf den Personenverkehr). Im Luftverkehr werden also nur 14% der externen Kosten betrachtet, weil im Luftverkehr der Klimabereich dominant ist, der hier nicht miteinbezogen wird.

Im Schwerverkehr auf der Strasse ist zudem zu beachten, dass insbesondere im Güterverkehr ein Teil der externen Kosten durch die LSVA (leistungsabhängige Schwerverkehrsabgabe) internalisiert wird. Diese Internalisierung wird in den ausgewiesenen Zahlen berücksichtigt, d.h. die angegebene Totalwerte wurde um die LSVA bereinigt (zur Herleitung vgl. unten).

Für die Abschätzung der Effekte der Energieperspektiven 2050+ werden diese externen Kosten in geeignete Kostensätze umgerechnet, die eine Abschätzung der Auswirkungen der Energieperspektiven 2050+ erlauben. Dazu wird wie folgt vorgegangen:

- Im Schienenverkehr wird ein Kostensatz pro Zugkm bestimmt.

**Abbildung 5-2: Externe Kosten im Verkehrsbereich in Mio. CHF im Jahr 2015 (grau hinterlegt = in den Energieperspektiven 2050+ berücksichtigte Sekundäreffekte)**

Externe Kosten im Verkehrsbereich im Jahr 2015 (ohne Langsamverkehr)	Strassenverkehr		Schienenverkehr		Luftverkehr		Total Verkehr	In Energieperspektiven 2050+ berücksichtigte Sekundärnutzen	Begründung	Linearer Zusammenhang zwischen ... und Externalität (vereinfachende Annahmen für Strassen- / Schienen- / Luftverkehr)
	Personen	Güter	Personen	Güter	Personen	Güter				
Luft: Gesundheitskosten	2'143	723	229.8	136.0	30.6	2.5	3'264	Ja		PM10-Emissionen / Zugkm / LTO
Luft: Gebäudeschäden	161	54	17.3	10.2	2.6	0.2	246	Ja		PM10-Emissionen / Zugkm / LTO
Luft: Ernteausfälle	39	19	0.3	0.5	2.0	0.2	61	Ja		NOx-Emissionen / Zugkm / LTO
Luft: Waldschäden	37	17	0.2	0.4	1.8	0.1	57	Ja		NOx-Emissionen / Zugkm / LTO
Luft: Biodiversitätsverluste	87	31	0.4	0.7	3.2	0.3	122	Ja		NOx-Emissionen / Zugkm / LTO
Lärm	1'342	747	153.4	245.8	114.9	6.7	2'610	Ja		Fzkm / Zugkm / LTO
Klima	1'217	292	1.2	2.1	825.3	66.4	2'404	Nein	Primärnutzen (vgl. Text)	
Natur und Landschaft	826	177	95.4	33.2	6.3	0.5	1'138	Nein	Kein direkter Zusammenhang, da es sich im Wesentlichen um Fixkosten handelt	
Bodenschäden	79	61	25.4	3.7	0.0	0.0	169	Ja		Fzkm / Zugkm / LTO
Vor- und nachgelagerte Prozesse	836	200	34.2	19.9	153.5	12.6	1'256	Nein	Klimaeffekte sind Primärnutzen, Luftbelastung vernachlässigbar klein	
Unfälle: Sicht Verkehrsteilnehmende <sup>1</sup>	2'469	376	13.2	51.2	15.3	0.0	2'926	Ja		Fzkm / Zugkm / LTO
Zusatzkosten in städtischen Räumen	213	35	31.4	4.6	0.0	0.0	284	Ja		Fzkm / Zugkm / LTO
Staukosten	1'126	168					1'294	Ja		Fzkm
Abzug LSVA alle Bereiche	-19	-931								
Abzug LSVA berücksichtigte Bereiche	0	-496						Ja		Fzkm
<b>Total Sicht Verkehrsteilnehmende</b>	<b>10'556</b>	<b>1'969</b>	<b>602</b>	<b>508</b>	<b>1'155</b>	<b>90</b>	<b>15'831</b>			
<b>Total berücksichtigte Bereiche</b>	<b>7'697</b>	<b>1'734</b>	<b>471</b>	<b>453</b>	<b>170</b>	<b>10</b>	<b>11'033</b>			

Quellen: Infrac, Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten sowie für Staukosten: Keller (2019), Staukosten Schweiz 2015.

<sup>1</sup> Nur durch Schienenverkehr verursachte Unfälle, d.h. ohne Unfälle durch Dritte.

LTO = Landing and Take Off.

- Im Luftverkehr basieren die Berechnungen auf Kostensätzen pro LTO (Landing and Take Off).
- Im Strassenverkehr führt Infrac detaillierte Berechnungen zu den Emissionen von Klimagasen mit dem HBEFA (Handbuch Emissionsfaktoren, Version 4.1)<sup>135</sup> durch. Mit dem HBEFA wertet Infrac anschliessend auch die Veränderung PM<sub>10</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionen durch die Energieperspektiven 2050+ aus. Deshalb werden für die Effekte der Luftbelastung (insgesamt 3.3 Mrd. CHF) Kostensätze pro Tonne Schadstoff hergeleitet, mit denen die Ergebnisse von Infrac multipliziert werden können. Die übrigen Kostenbereiche (insgesamt 5.8 Mrd. CHF) werden über Kostensätze pro Fzkm (Fahrzeugkilometer) ermittelt.

Es ist zu erwähnen, dass zum Zeitpunkt der Herleitung der folgenden Kostensätze vom Auftraggeber erwartet wurde, dass sich die Szenarien der Energieperspektiven bzgl. Fzkm, Zugkm und LTO voraussichtlich nicht unterscheiden. Es wurde aber mit der Möglichkeit gerechnet, dass sich doch Unterschiede ergeben könnten. Deshalb wurde vom Auftraggeber die Herleitung der entsprechenden Kostensätze pro Fzkm, Zugkm bzw. LTO verlangt. Entsprechend werden diese Kostensätze im Folgenden hergeleitet. Sie werden aber nicht zur Anwendung

<sup>135</sup> Infrac (2019), Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs HBEFA, Version 4.1.

kommen, da sich die Szenarien WWB und ZERO der EP2050+ tatsächlich nicht unterscheiden bzgl. Fzkm.

Nachfolgend werden der Strassen-, Schienen- und Luftverkehr in den Kapiteln 5.2 bis 5.4 behandelt. Dabei werden jeweils die Kostensätze für das Jahr 2015 hergeleitet, die im Rahmen der Berechnungen der Sekundäreffekte direkt angewendet werden können. Zudem werden Prognosen zur Entwicklung der Kostensätze bis 2060 erstellt.

Bei den nachfolgenden Ausführungen werden weiterhin zu illustrativen Zwecken auch die externen Kosten in den Bereichen Klima, Natur und Landschaft sowie vor- und nachgelagerte Prozesse dargestellt, obwohl diese nicht zu den hier berücksichtigten sekundären Nutzen der Energieperspektiven 2050+ gehören.

## 5.2 Strassenverkehr

### a) Kostensätze 2015

#### Gesamtkosten in der Schweiz 2015

Im Strassenverkehr sollen eingangs zuerst nochmals die gesamten externen Kosten aus Sicht Verkehrsteilnehmende nach Fahrzeugkategorien dargestellt werden. Dies dient der Nachvollziehbarkeit im Vergleich zu Infrac, Ecoplan (2019)<sup>136</sup>, da hier mehrere Anpassungen vorgenommen werden müssen (vgl. Abbildung 5-3):<sup>137</sup>

- Es wird mit den Staukosten ein zusätzlicher Kostenbereich aufgenommen (vgl. Zeile Staukosten in Abbildung 5-3), der in Infrac, Ecoplan (2019) fehlt. Wie erwähnt wurden diese gesamten Staukosten ebenfalls im Auftrag des ARE in einer eigenen Studie berechnet.<sup>138</sup> Wie im EU-Handbuch<sup>139</sup> werden die Staukosten als externe Kosten betrachtet (vgl. oben).
- Mit der Aufnahme der Staukosten muss auch der LSVA-Abzug erhöht werden: In Infrac, Ecoplan (2019, S. 117) wurde von den LSVA-Einnahmen der den Staukosten zuteilbare Betrag von 444 Mio. CHF abgezogen. Werden die Staukosten aber wie hier berücksichtigt, ist dies nicht mehr zulässig (vgl. Zeile Abzug LSVA-Anteil Staukosten in Abbildung 5-3).
- Von dem Betrag der LSVA, der als Internalisierung externer Kosten gezählt wird, wurde der Prozentsatz für die nicht berücksichtigten Bereiche (Klima, Natur und Landschaft sowie vor- und nachgelagerte Effekte in der Höhe der anfallenden Kosten) abgezogen. Somit wird nur

---

<sup>136</sup> Infrac, Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten, S. 126.

<sup>137</sup> All diese Punkte sind im Schienen- und Luftverkehr nicht relevant, so dass in den folgenden Kapiteln auf diese Darstellung verzichtet werden kann.

<sup>138</sup> Keller (2019), Staukosten Schweiz 2015.

<sup>139</sup> European Commission (2019), Handbook on the external costs of Transport, S. 94 und 129-130.

derjenige Teil der LSVA berücksichtigt, welcher die externen Kosten in den betrachteten Kostenbereichen teilweise internalisiert.<sup>140</sup>

Abbildung 5-3: Externe Kosten im Strassenverkehr (Sicht Verkehrsteilnehmende 2015)

Externe Kosten Strassenverkehr in Mio. CHF	Personenverkehr											Güterverkehr				Gesamt- total	Total (ohne LV und Tr/Arbm)
	Motorisierter privater Personenverkehr				Langsamverkehr			Öffentlicher Personenverkehr				Li	LW	SS	Tr/Arbm		
	PW	GW	MR	Mofa	Velo	fäG	Fuss	Bus	Trolley	Tram							
Gesundheit Luft	1'985.3	35.5	18.0	0.1	-	-	-	104.1	n.a.	n.a.	198.8	322.7	201.1	n.a.	2'865.6	2'865.6	
Gebäude Luft	149.5	2.7	1.4	0.0	-	-	-	7.8	n.a.	n.a.	15.0	24.3	15.1	n.a.	215.7	215.7	
Ernteauffälle Luft	34.0	1.4	0.4	0.0	-	-	-	3.5	-	-	7.0	7.7	4.6	n.a.	58.5	58.5	
Waldschäden Luft	32.7	1.2	0.4	0.0	-	-	-	3.1	-	-	6.1	6.7	4.0	n.a.	54.0	54.0	
Biodiversitätsverluste Luft	78.4	2.2	0.7	0.0	-	-	-	5.6	-	-	11.6	12.2	7.3	n.a.	117.8	117.8	
Lärm	907.0	24.8	354.4	2.5	-	-	-	51.5	0.4	1.7	210.4	320.1	216.8	n.a.	2'089.5	2'089.5	
Klima	1'147.5	12.9	21.8	0.1	-	-	-	34.3	-	-	106.7	100.8	84.9	n.a.	1'509.1	1'509.1	
Natur und Landschaft	793.8	5.6	12.0	0.7	12.2	0.4	17.7	13.1	0.2	0.3	63.4	64.1	49.5	n.a.	1'033.2	1'002.8	
Bodenschäden	68.8	2.8	1.3	0.0	-	-	-	5.8	0.6	0.0	13.8	27.8	19.0	n.a.	139.9	139.9	
Vor- und nachgelagerte Prozesse	785.1	6.2	19.0	1.6	18.6	0.8	36.0	14.3	2.0	7.6	64.4	68.0	67.6	n.a.	1'091.1	1'035.7	
Unfälle	1'958.1	37.8	358.5	38.4	673.7	104.6	388.0	41.2	20.1	15.5	222.3	123.6	30.4	19.8	4'031.9	2'845.8	
Städtische Räume	200.4	0.7	4.1	0.3	-	-	-	4.9	0.8	1.5	21.6	6.9	6.5	n.a.	247.8	247.8	
Staukosten	1'120.9	4.9	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	84.0	49.9	33.8	n.a.	1'293.5	1'293.5	
<b>Zwischentotal aller Kostenbereiche</b>	<b>9'261.4</b>	<b>138.6</b>	<b>791.9</b>	<b>43.8</b>	<b>704.5</b>	<b>105.9</b>	<b>441.7</b>	<b>289.3</b>	<b>24.1</b>	<b>26.5</b>	<b>1'025.0</b>	<b>1'134.8</b>	<b>740.4</b>	<b>19.8</b>	<b>14'747.6</b>	<b>13'475.8</b>	
Abzug LSVA-Anteil	-	10.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	263.8	232.4	-	506.5	506.5	
Abzug LSVA-Anteil Staukosten	-	9.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	231.2	203.8	-	444.0	444.0	
<b>Total aller Kostenbereiche (mit LSVA Abzug)</b>	<b>9'261.4</b>	<b>119.3</b>	<b>791.9</b>	<b>43.8</b>	<b>704.5</b>	<b>105.9</b>	<b>441.7</b>	<b>289.3</b>	<b>24.1</b>	<b>26.5</b>	<b>1'025.0</b>	<b>639.8</b>	<b>304.3</b>	<b>19.8</b>	<b>13'797.1</b>	<b>12'525.3</b>	
Gesundheitsnutzen Langsamverkehr	-	-	-	-	-451.8	n.a.	-893.3	-	-	-	-	-	-	-	-1'345.1	-	
Abzug LSVA berücksichtigte Kostenbereiche	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	262.0	234.2	-	496.2	496.2	
<b>Total berücksichtigte Kostenbereiche</b>	<b>6'535.1</b>	<b>114.0</b>	<b>739.1</b>	<b>41.4</b>				<b>227.5</b>	<b>21.8</b>	<b>18.7</b>	<b>790.4</b>	<b>639.8</b>	<b>304.3</b>		<b>9'432.0</b>	<b>9'432.0</b>	

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahrzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper, Tr = Traktor, Arbm = Arbeitsmaschine, n.a. = not available (nicht verfügbar)

- Es werden nur die Kosten des motorisierten Verkehrs berücksichtigt, d.h. der Langsamverkehr wird ausgeschlossen. Zudem werden auch die geringen Unfallkosten in der Kategorie Traktor / Arbeitsmaschine vernachlässigt (vgl. Summe in letzter Spalte der Abbildung 5-3).

### Kostensätze für Luftschadstoffe pro Tonne

Wie eingangs erwähnt werden im Bereich der Luftbelastung die Veränderungen der Schadstoffemissionen durch Infras mit dem HBEFA berechnet. Dabei werden die Emissionen für die Jahre 2015 bis 2060 für verschiedene Szenarien der Energieperspektiven 2050+ und für die folgenden Fahrzeugkategorien ermittelt:

- Personenwagen
- Gesellschaftswagen (Car)
- Motorisierte Zweiräder (Motorrad und Mofa)
- Bus (öffentlicher Linienbus)
- Trolleybus

<sup>140</sup> Dieser Ausschluss erfolgt insbesondere aufgrund der Prognose bis 2060, die zu erstellen ist. In den beiden Szenarien werden sich die Klimakosten sehr unterschiedlich entwickeln. Dies dürfte auch einen Einfluss auf die Höhe der LSVA haben. Mit dem Ausschluss der LSVA-Einnahmen für die Klimabelastung (auch bei den vor- und nachgelagerten Effekten) müssen wir uns über die Entwicklung der LSVA nicht nach den beiden Szenarien der Energieperspektiven differenzieren. Ein analoger Ausschluss eines Teiles der LSVA-Einnahmen wurde in Infras, Eco-plan (2019, S. 117) für die Staukosten erstellt.

- Tram
- Lieferwagen
- Schwere Nutzfahrzeuge (Lastwagen und Sattelschlepper)

Zudem werden diverse Antriebstechnologien und verschiedene Treibstoffarten (fossile Treibstoffe, Biotreibstoffe und synthetische Treibstoffe) betrachtet. Die folgende Abbildung gibt einen Überblick über die Berechnungsgrundlagen von Infras.

**Abbildung 5-4: Fahrzeugkategorien, Antriebstechnologien und Treibstoffarten für die Energieperspektiven 2050+**

Fahrzeuge Segmente		Treibstoffe	
Personenwagen	petrol (4S)	Petrol	petrol
	diesel		ethanol (bio)
	bifuel CNG/petrol		petrol PtX (power to X)
	bifuel LPG/petrol	Diesel	diesel
	flex-fuel E85		biodiesel
	Plug-in Hybrid petrol/electric		diesel PtX (power to X)
	Plug-in Hybrid diesel/electric	Strom	electricity
	electricity		Gas
	FuelCell	CNG = Erdgas	
	Gesellschaftswagen	diesel	
CNG		gas PtX = Wasserstoff aus Elektrolyse	
electricity			
FuelCell			
Motorrad	petrol (4S)		
	petrol (2S)		
	electricity		
Linienbus	diesel		
	CNG		
	LNG		
	electricity		
	FuelCell		
Trolleybus	electricity		
Tram	electricity		
Lieferwagen	petrol (4S)		
	diesel		
	bifuel CNG/petrol		
	Plug-in Hybrid diesel/electric		
	electricity		
Schwere Nutzfahrzeuge	FuelCell		
	petrol (4S)		
	diesel		
	CNG		
	LNG		
	Plug-in Hybrid diesel/electric		
	electricity		
FuellCell			

Quelle: Adaptiert von Infras

Infras führt diese Emissionsberechnungen im Rahmen der Energieperspektiven 2050+ primär für Klimagase durch. Im Nachgang zu den Berechnungen der Klimagase werden jedoch ergänzende Berechnungen für PM<sub>10</sub> (Motoremissionen sowie Abrieb und Aufwirbelung) und NO<sub>x</sub> durchgeführt. Denn PM<sub>10</sub> ist der Leitschadstoff für die Gesundheits- und Gebäudeschäden und NO<sub>x</sub> wird als Leitschadstoff für Ernteauffälle, Waldschäden und Biodiversitätsverluste verwendet.<sup>141</sup>

Das Mengengerüst in Tonnen PM<sub>10</sub> und Tonnen NO<sub>x</sub> liegt also aus den Berechnungen von Infras vor. Nun sind noch Kostensätze zu bestimmen. Solche Kostensätze wurden bereits in Ecoplan (2020)<sup>142</sup> hergeleitet – und zwar für die Anwendung in Kosten-Nutzen-Analysen von Strassenprojekten. Die Kostensätze basieren auf den ARE-Studien, insbesondere auf Infras, Ecoplan (2019).<sup>143</sup> Es wurden folgende Kostensätze für das Jahr 2015 hergeleitet:<sup>144</sup>

- PM<sub>10</sub>:
  - Gesundheitskosten: 836'000 CHF / t PM<sub>10</sub>
  - Gebäudeschäden 63'000 CHF / t PM<sub>10</sub>
  - **Total** **899'000 CHF / t PM<sub>10</sub>**
- NO<sub>x</sub>
  - Ernteauffälle 1'800 CHF / t NO<sub>x</sub>
  - Waldschäden 1'600 CHF / t NO<sub>x</sub>
  - Biodiversitätsverluste 3'600 CHF / t NO<sub>x</sub>
  - **Total** **7'000 CHF / t NO<sub>x</sub>**

### Kostensätze der übrigen Kostenbereiche pro Fahrzeugkilometer

Für die übrigen zu berücksichtigenden Kostenbereiche wird wie erläutert mit Kostensätzen pro Fzkm gerechnet. Das Mengengerüst (Fzkm) wird dabei wiederum von Infras ermittelt gemäss den oben dargestellten Fahrzeugkategorien. Es bildet auch die Grundlage für die Berechnungen der Emissionen oben, da das HBEFA lediglich Emissionsfaktoren pro Fzkm enthält. Im

<sup>141</sup> Ecoplan (2020), Bewertung der externen Effekte des Strassenverkehrs, Kapitel 3.3.2.

<sup>142</sup> Ecoplan (2020), Bewertung der externen Effekte des Strassenverkehrs, Kapitel 3.3.

<sup>143</sup> Infras, Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015, Aktualisierung der Berechnungen von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten des Strassen-, Schienen-, Luft- und Schiffsverkehrs 2010 bis 2015.

<sup>144</sup> Ecoplan (2020), Bewertung der externen Effekte des Strassenverkehrs, Kapitel 3.3.2, Tab. 19. Es fällt auf, dass der Kostensatz für PM<sub>10</sub> von 899'000 CHF / t deutlich vom in Abbildung 3-3 berechneten Kostensatz für PM<sub>10</sub>-Äquivalente von 272'000 CHF / t abweicht. Dies hat folgende Gründe: Hier wird nur PM<sub>10</sub> betrachtet, in Abbildung 3-3 jedoch PM<sub>10</sub>-Äquivalente. Würden in Abbildung 3-3 nur die Gesundheits- und Gebäudeschäden auf die Emissionen von PM<sub>10</sub> (nicht PM<sub>10</sub>-Äquivalente) verteilt, so ergäbe sich ein deutlich höherer Kostensatz, der aber tiefer liegt als die hier berechneten 899'000 CHF / t. Ergänzend ist zu erwähnen, dass im Strassenverkehr die Emissionen oft direkt im bebauten Gebiet anfallen, wo die entstehenden (lokalen) Schäden höher sind. So zeigt Ecoplan<sup>144</sup>, dass die Schäden durch Emissionen im bebauten Gebiet ca. 3-mal höher sind als durch Emissionen im unbebauten Gebiet. Die Gesamtemissionen in der Schweiz in Abbildung 3-3 werden jedoch mehrheitlich durch die Landwirtschaft (41%) und Industrie und Gewerbe (20%) ausgestossen und damit weniger im bewohnten Gebiet. Diese beiden Effekte erklären den Unterschied.

Folgenden sind deshalb noch Kostensätze pro Fzkm herzuleiten. Dazu gehen wir von den Kosten in Abbildung 5-3 aus und dividieren die Kosten durch die Fzkm im Jahr 2015. Zudem müssen die Fahrzeugkategorien Motorrad und Mofa zur Kategorie motorisierte Zweiräder zusammengefasst werden und die Kategorien Lastwagen und Sattelschlepper zur Kategorie schwere Nutzfahrzeuge, um mit den Fahrzeugkategorien aus den Berechnungen der Fzkm von Infrac kompatibel zu sein.

Die Ergebnisse für alle Kostenbereiche werden in Abbildung 5-5 dargestellt. Die Kosten der Luftbelastung werden aber wie erläutert über Kostensätze pro Tonne Schadstoff abgebildet und dienen nur zu Vergleichszwecken. Zudem werden die Bereiche Klima, Natur und Landschaft sowie vor- und nachgelagerte Effekte nicht berücksichtigt (vgl. Kapitel 2.2). Die über die Fzkm berücksichtigten Kostenbereiche (Lärm, Bodenschäden, Unfälle, Städtische Räume und Stau) sind grau hervorgehoben. Da die Fzkm in den Szenarien der Energieperspektiven jedoch gleich sind, ist die Abbildung 5-5 für die Energieperspektiven nicht relevant.

**Abbildung 5-5: Externe Kosten pro Fahrzeugkilometer im Jahr 2015 (Sicht Verkehrsteilnehmende)**

Externe Kosten pro Fzkm Strassenverkehr Sicht Verkehrsteilnehmende	Personenverkehr						Güterverkehr	
	Motorisierter privater Personenverkehr			Öffentlicher Personenverkehr			Li	SNF
	PW	GW	MZ	Bus	Trolley	Tram		
<b>Rp. pro Fzkm</b>								
Gesundheit Luft	3.7	31.6	0.7	41.5	n.a.	n.a.	5.5	22.9
Gebäude Luft	0.3	2.4	0.1	3.1	n.a.	n.a.	0.4	1.7
Ernteausfälle Luft	0.1	1.1	0.0	1.3	-	-	0.2	0.5
Waldschäden Luft	0.1	0.9	0.0	1.1	-	-	0.1	0.5
Biodiversitätsverluste Luft	0.1	1.7	0.0	2.0	-	-	0.3	0.9
Lärm	1.7	19.7	18.4	19.7	1.7	5.3	5.3	21.7
Klima	2.1	9.9	1.1	12.6	-	-	2.6	8.3
Natur und Landschaft	1.4	4.2	0.6	4.8	0.9	0.9	1.5	5.1
Bodenschäden	0.1	2.1	0.1	2.1	2.1	0.0	0.3	2.1
Vor- und nachgelagerte Prozesse	1.4	4.7	1.0	5.3	7.2	22.8	1.6	6.1
Unfälle	3.6	28.9	19.6	15.1	73.9	46.8	5.4	6.9
Städtische Räume	0.4	0.6	0.2	1.8	2.8	4.5	0.5	0.6
Staukosten	2.0	3.7	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	2.0	3.7
<b>Total aller Kostenbereiche</b>	<b>17.0</b>	<b>111.6</b>	<b>41.8</b>	<b>110.5</b>	<b>88.7</b>	<b>80.4</b>	<b>25.8</b>	<b>81.0</b>
<b>Abzug LSVA (total)</b>	-	14.7	-	-	-	-	-	41.7
<b>Total mit LSVA Abzug</b>	<b>17.0</b>	<b>96.8</b>	<b>41.8</b>	<b>110.5</b>	<b>88.7</b>	<b>80.4</b>	<b>25.8</b>	<b>39.3</b>
<b>Abzug LSVA berücksichtigte Kostenbereiche</b>		-						22.2
<b>Total berücksichtigte Bereiche</b>	<b>7.8</b>	<b>55.0</b>	<b>38.2</b>	<b>38.8</b>	<b>80.6</b>	<b>56.6</b>	<b>13.6</b>	<b>12.8</b>

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MZ = Motorisierte Zweiräder, Li = Lieferwagen, SNF = schwere Nutzfahrzeuge, n.a. = not available (nicht verfügbar).

## b) Prognose bis 2060

Die oben hergeleiteten Kostensätze müssen im Folgenden noch bis 2060 prognostiziert werden. Dabei kann auf Ecoplan (2020)<sup>145</sup> zurückgegriffen werden: In dieser Studie wurden die externen Kosten für Kosten-Nutzen-Analysen von Strassenprojekten in die Zukunft prognostiziert. Die dort hergeleiteten Ergebnisse können hier übernommen werden:<sup>146</sup>

### Luftbelastung (über Kostensätze pro Tonne Schadstoff)

- Ein wichtiger Input in die Prognose der Kosten der Luftschadstoffe sind die Prognosen von Infras zur emittierten Menge der Luftschadstoffe. In seiner Prognose berücksichtigt Infras auch Verschiebungen von verschiedenen Antriebstechnologien (Segmenten) und Treibstoffen (vgl. Abbildung 5-4), z.B. die Ausbreitung von Elektrofahrzeugen. Die Prognosen werden von Infras ursprünglich in der starken Differenzierung der Abbildung 5-4 erstellt und dann zusammengefasst.
- Zudem sind die Kostensätze fortzuschreiben (wobei dieselbe Fortschreibung verwendet wird wie in Kapitel 3.3e):<sup>147</sup>
  - **Gesundheitskosten:** Zunahme mit **Reallohnwachstum** und **Bevölkerungswachstum** (für weitere Erläuterungen siehe Kapitel 3.3e).
  - Gebäudeschäden: Die Zunahme wird wie in Kapitel 3.3e) vernachlässigt.
  - Bei den Vegetationsschäden wird von konstanten Kostensätzen pro Tonne NO<sub>x</sub> ausgegangen.

### Übrige Kostenbereiche (übrige Kostensätze pro Fzkm)

- Auch hier ist ein wichtiger Input in die Prognose die Veränderung der Fzkm. Wobei auch hier anzumerken ist, dass in den Energieperspektiven angenommen wird, dass sich die Fzkm zwischen den Szenarien WWB und ZERO nicht ändern.
- Die Kostensätze pro Fzkm verändern sich wie folgt:
  - **Lärm:** Die Lärmkosten pro Fzkm nehmen einerseits mit dem **Reallohnwachstum** zu, weil die Bewertung der Lärmkosten mit dem Lohn steigt.

Andererseits ist die Veränderung der Lärmimmissionen zu prognostizieren. In Ecoplan (2020)<sup>148</sup> geht man davon aus, dass sich die Motorengeräusche der Benzin- und Dieselfahrzeuge nicht verändern, dass aber immer mehr Elektrofahrzeuge unterwegs sind, deren Motorenlärm neben den Rollgeräuschen verschwindet. Zudem wird bei den Rollgeräuschen eine Reduktion von 2 dB(A) bis 2050 erwartet. Daraus wird eine durchschnittliche jährliche Abnahme bis 2050 von 0.45% berechnet. Wird jedoch auch das

---

<sup>145</sup> Ecoplan (2020), Bewertung der externen Effekte des Strassenverkehrs.

<sup>146</sup> Mögliche Auswirkungen des automatisierten Fahrens auf die externen Kosten werden in Absprache mit dem Auftraggeber hier nicht genauer untersucht, da dazu noch keine zuverlässigen Prognosen vorliegen und dies auch in Ecoplan (2020) nicht genauer analysiert wurde.

<sup>147</sup> Ecoplan (2020), Bewertung der externen Effekte im Strassenverkehr, Kapitel 3.4.

<sup>148</sup> Ecoplan (2020), Bewertung der externen Effekte im Strassenverkehr, Kapitel 2.4.

Bevölkerungswachstum (+0.5% pro Jahr) und das Wachstum der Wohnungen (+0.7% pro Jahr) miteinbezogen, ergibt sich insgesamt ein Wachstum der Lärmkosten von 0.15% pro Jahr.

Für die Energieperspektiven kann dieser Wert jedoch nicht übernommen werden, denn die Verbreitung der lärmarmen Elektrofahrzeuge ist im Referenzszenario WWB weniger schnell als im Szenario ZERO. Deshalb wird die Wachstumsrate hier differenziert nach den Szenarien. Zudem soll sie auch nach Fahrzeugkategorien differenziert werden, da die Verbreitung der leisen Motoren unterschiedlich rasch ist. Die folgende Abbildung zeigt die prognostizierten Veränderungen auf (in den Zahlen berücksichtigt sind Veränderungen der Motoren- und Rollgeräusche sowie das Wachstum von Bevölkerung und Wohnungszahl). Im Szenario WWB wird für PW eine Abnahme von 0.07% pro Jahr erwartet.<sup>149</sup> Mit einer stärkeren Verbreitung der leisen Motoren (Elektrofahrzeuge, Hybridfahrzeuge solange elektrisch betrieben und Brennstoffzellenfahrzeuge) im Szenario ZERO sinken die Lärmimmissionen um 0.36% pro Jahr. Bei den schweren Nutzfahrzeugen ist die Abnahme geringer (Zunahme um 0.11% oder Abnahme um 0.04%). Trolleybusse erfahren keine Veränderung beim Motorenlärm (schon heute 100% elektrisch) und sinken in beiden Szenarien dank den abnehmenden Rollgeräuschen um 0.04% pro Jahr. Der Lärm der Trams nimmt einerseits mit dem Wachstum von Bevölkerung und Wohnungszahl zu (um 0.6% pro Jahr) und andererseits mit den Lärmemissionen im Schienenverkehr ab (um -0.6% pro Jahr – vgl. unten). Diese beiden Effekte gleichen sich gegenseitig gerade (in etwa) aus.

Es ist zu beachten, dass die Lärmkosten selbst bei gleichen Fzkm in den Szenarien WWB und ZERO relevant sind, da sie sich über die Zeit anders entwickeln.

**Abbildung 5-6: Prozentuale jährliche Veränderung der Lärmimmissionen nach Szenario und Fahrzeugkategorie**

	PW, MZ, Li	SNF, GW, Bus	Trolley	Tram
Referenzfall "Weiter wie bisher"	-0.07%	0.11%	-0.04%	0.00%
Szenario "ZERO"	-0.36%	-0.04%	-0.04%	0.00%

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MZ = Motorisierte Zweiräder, Li = Lieferwagen, SNF = schwere Nutzfahrzeuge,

- **Bodenschäden:** Der Kostensatz bleibt **konstant**.<sup>150</sup>
- **Unfälle:** Auch bei den Unfällen wird gemäss SN 641 824<sup>151</sup> das **Reallohnwachstum** berücksichtigt. Zudem wird eine **Abnahme der Unfallraten um 2% pro Jahr** erwartet.<sup>152</sup>

<sup>149</sup> Im Gegensatz zu Ecoplan (2020) wird also eine Abnahme erwartet, nicht eine Zunahme. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Ecoplan (2020) noch auf dem HBEFA, Version 3.3, beruht, in dem noch eine langsamere Verbreitung der leisen Elektrofahrzeuge angenommen wurde als im der neuen Version 4.1 des HBEFA.

<sup>150</sup> Ecoplan (2020), Bewertung der externen Effekte im Strassenverkehr, Kapitel 3.4.

<sup>151</sup> SN 641 824 (2013), Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr. Unfallraten und Unfallkostensätze, Ziffer 18.

<sup>152</sup> Eine mögliche Unfallzunahme durch leisere Elektrofahrzeuge (Überhören der Gefahr) wird nicht berücksichtigt.

- **Städtische Räume:** Für die Effekte in städtischen Räumen gibt es noch keine Prognosen, so dass hier erstmals Prognosen hergeleitet werden müssen. Die Zusatzkosten in städtischen Räumen setzen sich aus zwei Effekten zusammen, den Trennungseffekten (Zeitverluste von Fussgängern und Velofahrern beim Überqueren von Strassen) und der Beeinträchtigung des Ortsbildes und der Aufenthaltsqualität:
  - Trenneffekte: Die Trenneffekte werden mit dem Bevölkerungswachstum und dem Reallohnwachstum fortgeschrieben. Denn der Kostensatz beruht einerseits auf der Grösse der betroffenen Bevölkerung. Andererseits erfolgt die Umrechnung in Geldeinheiten mit einem Zeitkostensatz aus der SN 641 822a, der gemäss SN 641 822a mit dem Reallohnwachstum fortzuschreiben ist.<sup>153</sup>
  - Beeinträchtigung des Ortsbildes und der Aufenthaltsqualität: Wir schlagen vor, auch hier die Fortschreibung mit dem Bevölkerungswachstum und dem Reallohnwachstum vorzunehmen. Denn es ist davon auszugehen, dass mit dem Bevölkerungswachstum immer mehr Personen unter den Beeinträchtigungen leiden, und dass Ihre Zahlungsbereitschaft mit dem Reallohnwachstum zunimmt.
  - Damit können die gesamten Zusatzkosten in städtischen Räumen mit dem **Bevölkerungswachstum** und dem **Reallohnwachstum** fortgeschrieben werden.
- **Staukosten:** Bei den Staukosten handelt es sich um die Kosten der Zeit, die im Stau verloren gehen. Der Zeitkostensatz nimmt wie bereits oben beschrieben gemäss SN 641 822a mit dem **Reallohnwachstum** zu.<sup>154</sup>
- **LSVA-Abzug:** Der LSVA-Abzug ist nur bei den schweren Nutzfahrzeugen relevant. Wir gehen davon aus, dass der **Anteil der internalisierten Kosten** über die Zeit **konstant** bleibt. 2015 werden **36.1%** der für die Sekundäreffekte berücksichtigten Kostenbereiche (inkl. Luftbelastung) durch die LSVA als Internalisierung gezählt. Selbst wenn sich die Fzkm nicht verändern, sind Luftbelastung und Lärm in den Szenarien WWB und ZERO unterschiedlich und entsprechend auch die LSVA-Abzüge.

## 5.3 Schienenverkehr

### a) Kostensätze 2015

Die gesamten Kosten des Schienenverkehrs in der Schweiz wurden bereits in Abbildung 5-2 dargestellt. Die folgende Abbildung zeigt die externen Kosten des Schienenverkehrs pro Zugkilometer im Jahr 2015 gemäss Infrac, Ecoplan (2019). Wiederum werden die zu berücksichtigenden Bereiche für die Sekundäreffekte der Energieperspektiven 2050+ grau hervorgehoben. Im Personenverkehr fallen Kosten von 274 Rp / Zugkm an, im Güterverkehr 1'479 Rp / Zugkm. Die Kosten sind im Güterverkehr deutlich höher, weil die Güterzüge oft länger sind und vermehrt in der Nacht fahren (hohe Lärmkosten) und sich beim Rangieren mehr Unfälle ereignen. Wie erwähnt verändern sich die Zugkm in den Energieperspektiven 2050+ nicht, so dass die Abbildung 5-7 für die Energieperspektiven nicht relevant ist.

---

<sup>153</sup> SN 641 822a (2009), Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr. Zeitkosten im Personenverkehr, Ziffer 10.

<sup>154</sup> Prinzipiell nehmen die Stauzeiten überproportional mit den Fzkm zu, d.h. je mehr Verkehr auf den Strassen fährt, desto stärker steigen die Stauzeitkosten mit dem zunehmenden Verkehr an. Vereinfachend verzichten wir jedoch darauf diesen Effekt hier abzubilden, da der genaue Funktionsverlauf (für die Verkehrsbelastung in der Gesamtschweiz) nicht bekannt ist. Da die Energiestrategie eher zu einer Abnahme der Fzkm führen dürfte, wird die Abnahme der Staukosten damit eher unterschätzt.

Abbildung 5-7: Externe Kosten im Schienenverkehr pro Zugkm (2015)

Externe Kosten pro Zugkm Schienenverkehr Sicht Verkehrsteilnehmende	Personenverkehr	Güterverkehr
<b>Rp. pro Zugkm</b>		
Gesundheit Luft	137.2	515.7
Gebäude Luft	10.3	38.7
Ernteauffälle Luft	0.1	1.6
Waldschäden Luft	0.1	1.4
Biodiversitätsverluste Luft	0.2	2.5
Lärm	89.9	710.4
Klima	0.6	7.3
Natur und Landschaft	48.6	116.4
Bodenschäden	12.9	12.9
Vor- und nachgelagerte Prozesse	17.4	69.9
Unfälle	6.7	179.7
Städtische Räume	16.0	16.0
<b>Total aller Kostenbereiche</b>	<b>340.2</b>	<b>1'672.5</b>
<b>Total berücksichtigte Bereiche</b>	<b>273.6</b>	<b>1'478.9</b>

Quelle: Infras, Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten.

### b) Prognose bis 2060

Wiederum sind für die oben dargestellten Kostensätze Prognosen bis 2060 herzuleiten, die natürlich kompatibel zu den Prognosen im Strassenverkehr (und im Strom- und Wärmebereich) sein müssen. Da es sich um die Prognose der Kosten pro Zugkm handelt, ist die Veränderung der Zugkm hier nicht relevant – spielt aber natürlich für das Endergebnis (Veränderung der Kosten) eine wichtige Rolle. Die Prognosen werden nach den einzelnen Kostenbereiche erstellt (die im Folgenden dargestellten Prognosen wurden mit dem BAV abgestimmt):

- **Gesundheit Luft:** Zunahme des Kostensatzes mit **Reallohnwachstum** und **Bevölkerungswachstum** (für weitere Erläuterungen siehe Kapitel 3.3e).

Zudem ist noch die Veränderung der Emissionen über die Zeit zu berücksichtigen. Es wird jedoch von konstanten Emissionen pro Zugkm ausgegangen. Im Schweizer Schienenverkehr sind dieselbetriebene Züge so selten (wohl nur noch im Rangierverkehr), dass sie vernachlässigt werden können. Die elektrischen Züge emittieren keine Luftschadstoffe durch den Motor (nur bei der Stromproduktion, deren Emissionen wie bei den Elektrofahrzeugen auf der Strasse im Stromsektor betrachtet werden). Die Hauptquelle von PM<sub>10</sub>-Emissionen im Schienenverkehr sind damit Abrieb und Aufwirbelung. Diese dürften über die Zeit konstant bleiben.

- **Rest Luft** (Gebäudeschäden, Ernteauffälle, Waldschäden, Biodiversitätsverluste): Die übrigen Kostenbereiche der Luftbelastung bleiben **konstant**. Die Emissionen verändern sich wie oben beschrieben nicht und die Kostensätze ebenfalls nicht.

- **Lärm:** Die Lärmkosten nehmen mit dem **Reallohnwachstum** (höhere Bewertung der Auswirkungen) und dem **Bevölkerungswachstum** zu (mehr Lärmbetroffene). Zudem ist die Veränderung der Lärmemissionen im Schienenverkehr zu beachten. Hierzu wurden uns vom BAV die folgenden pragmatischen Annahmen geliefert (vgl. auch Abbildung 5-8):

Abbildung 5-8: Prognose der Lärmkosten im Schienenverkehr

	2015-2020		2020-2060	
	Personenverkehr	Güterverkehr	Personenverkehr	Güterverkehr
Lärmabnahme	-1 dB(A)	-4 dB(A)	-2 dB(A)	-2 dB(A) (-1 bis -3)
Abnahme Lärmkosten	-10.5%	-37.1%	-20.4%	-22.0%
Abnahme pro Jahr	-2.2%	-8.9%	-0.6%	-0.6%

- 2015-2020 (gesichertes Wissen, nachweisbar)
  - Personenzüge: geringe Reduktion durch Ausrangierung von altem Rollmaterial: –1 dB(A)
  - Güterzüge: Abschluss der Sanierung von Güterwagen: –4 dB(A)
- 2021-2060 (Prognose: keine grossen Minderungen)
  - Personenzüge: Ausrangierung altes Rollmaterial, Optimierung Oberbau: –2 dB(A)
  - Güterzüge: Scheibenbremse, Optimierung Oberbau: – 2 dB(A) (bzw. –1 bis –3 dB(A); Verbesserungen evtl. teilweise kompensiert durch höhere Geschwindigkeit)

Diese Abnahmen in dB(A) wurden in das für das ARE entwickelte Berechnungsmodell für die externen Lärmkosten 2015 eingesetzt und es wurde berechnet, wie stark sich die Lärmkosten in Mio. CHF (bzw. pro Zugkm) reduzieren, wenn die Lärmimmissionen der Züge um 1 bis 6 dB(A) abnehmen. Diese Abnahme wurde aufgeteilt in die ersten 5 Jahre bis 2020 und die darauffolgenden 40 Jahre. Wie sich zeigt, konnte **bis 2020 eine jährliche Abnahme von 2.2% im Personenverkehr bzw. 8.9% im Güterverkehr** beobachtet werden. **Ab 2020** wird jedoch nur noch eine **jährliche Abnahme von 0.6%** erwartet (für Personen- und Güterverkehr gleich).

- **Bodenschäden:** Der Kostensatz bleibt **konstant**.
- **Unfälle:** Auch bei den Unfällen wird das **Reallohnwachstum** berücksichtigt. Zusätzlich ist Veränderung der Unfallhäufigkeit im Schienenverkehr zu beachten. Leider konnten wir keine Studien für die Schweiz zu Unfallprognosen im Schienenverkehr finden. Gemäss Daten des BFS hat sich die Zahl der Unfälle, Todesfälle bzw. verunfallter Personen pro Zugkm in den letzten 10 Jahren (2008-2018) durchschnittlich um ca. 6% pro Jahr reduziert. Diese Abnahme gilt auch für den längeren Zeitraum 1991 bis 2018. Ob sich diese deutliche Reduktion allerdings bis 2060 fortsetzen wird, ist unsicher, zumal das Unfallniveau im Schienenverkehr bereits sehr tief ist, so dass weitere Reduktionen immer schwieriger werden. Pragmatisch gehen wir deshalb wie im Strassenverkehr von einer **Abnahme von 2% pro Jahr** aus.
- **Städtische Räume:** Die Effekte in städtischen Räumen können wie im Strassenverkehr mit dem **Reallohnwachstum** und dem **Bevölkerungswachstum** fortgeschrieben werden.

## 5.4 Luftverkehr

### a) Kostensätze 2015

Zuerst muss genau abgegrenzt werden, welcher Luftverkehr genau berücksichtigt werden soll. In den Energieperspektiven wird der gesamte Linien- und Charterverkehr ab der Schweiz berücksichtigt, konkret der Linien- und Charterverkehr ab den Landesflughäfen Zürich und Genf sowie ab den Regionalflughäfen.<sup>155</sup> Nicht berücksichtigt wird jedoch – in Absprache mit dem BFE – der Landesflughafen Basel, da dieser in Frankreich und somit ausserhalb der Systemgrenze der Energieperspektiven 2050+ liegt.

Im Folgenden werden aus den Ergebnissen von Infrac, Ecoplan (2019) bzw. aus Abbildung 5-2 neue Kostensätze pro LTO-Zyklus (Landing and Take Off Cycle) ermittelt. Dazu werden die Kosten des Linien- und Charterverkehrs ab der Schweiz durch die Zahl der LTO im Linien- und Charterverkehr<sup>156</sup> dividiert. Dabei wird – wo möglich – der Flughafen Basel nicht miteinbezogen.<sup>157</sup>

Zudem werden im Folgenden die Kosten des gesamten Luftverkehrs auf den LTO umgelegt. Damit werden auch die Kosten des Luftgüterverkehrs (7.2% der Gesamtkosten des Luftverkehrs) auf die LTO umgerechnet. Dadurch wird unterstellt, dass sich der Güterverkehr gleich verändert wie der Personenverkehr bzw. der Güterverkehr erfolgt in der Schweiz grossmehrheitlich über «Belly Freight», d.h. die Güter werden im Bauch von Personenflugzeugen transportiert.

Die resultierenden Kostensätze pro LTO werden in der folgenden Abbildung dargestellt. Insgesamt entstehen pro LTO externe Kosten von gut 5'000 CHF im Jahr 2015. Für die Ermittlung der Sekundäreffekte müssen jedoch die Primärnutzen durch die Reduktion der Klimagase ausgeschlossen werden. Entsprechend müssen auch die vor- und nachgelagerten Prozesse vernachlässigt werden, die grossmehrheitlich auf Klimagasen beruhen. Die für die Bestimmung der Sekundäreffekte relevanten Bereiche sind grau hervorgehoben und belaufen sich auf total 667 CHF / LTO. In den Bereichen Bodenschäden und städtische Räume treten im Luftverkehr keine Kosten auf. Für die Sekundäreffekte am bedeutendsten sind die Lärmkosten von 434 CHF / LTO. Allerdings verändert sich die Zahl der LTO zwischen den Szenarien der Energieperspektiven 2050+ nicht, so dass die Abbildung 5-9 für die Energieperspektiven nicht relevant ist.

Die betrachteten Kostenbereiche beziehen sich alle auf lokale Schäden im Umkreis der Flughäfen. Bei der Luftbelastung werden nur Emissionen im LTO-Zyklus (bis 900m ab Boden) mit-

---

<sup>155</sup> Diese Festlegung wurde mit Infrac abgesprochen.

<sup>156</sup> Daten des BFS für Bewegungen (Starts und Landungen) dividiert durch zwei.

<sup>157</sup> Dies ist allerdings nur beim Lärm sowie bei Natur und Landschaft möglich. In den anderen Bereichen muss der Kostensatz pro LTO inkl. der Zahlen des Flughafens Basel berechnet werden, da die differenzierten Daten für den Flughafen Basel nicht verfügbar sind. Bei einer Berechnung eines Kostensatzes pro pkm wäre ein Ausschluss des Flughafens Basels gar nicht möglich, da nur die Summe der pkm der Landesflughäfen verfügbar ist. Deshalb wird auf Kostensätze pro pkm verzichtet.

einbezogen, Lärmeffekte sind ebenfalls nur bei tieffliegenden Flugzeugen relevant. Unfälle geschehen meist auch bei Start oder Landung, könnten sich prinzipiell aber auch unterwegs ereignen, was hier aber nicht genauer betrachtet wird. Damit fallen die betrachteten Kosten alle in der Schweiz an und entsprechen dem Territorialprinzip. Obwohl im Luftverkehr eigentlich das Halbstreckenprinzip verwendet wird (Effekte bis zur halben Strecke zum Zielort, vgl. Kapitel 2.1), ist dieses für die betrachteten Kostenbereiche mit dem Territorialprinzip weitgehend identisch.

**Abbildung 5-9: Externe Kosten im Luftverkehr pro LTO (2015)**

Externe Kosten pro LTO	Total
Luftverkehr	(PV + GV)
Sicht Verkehrsteilnehmende	
<b>CHF pro LTO</b>	
Gesundheit Luft	132.80
Gebäude Luft	11.26
Ernteauffälle Luft	8.78
Waldschäden Luft	7.99
Biodiversitätsverluste Luft	14.23
Lärm	433.88
Klima	3'657.89
Natur und Landschaft	25.32
Bodenschäden	0.00
Vor- und nachgelagerte Prozesse	692.66
Unfälle	57.80
Städtische Räume	0.00
<b>Total aller Kostenbereiche</b>	<b>5'042.6</b>
<b>Total berücksichtigte Bereiche</b>	<b>666.7</b>

## b) Prognose bis 2060

Im Folgenden wird dargestellt, wie sich diese Kostensätze bis 2060 verändern dürften. Da es sich um eine Prognose der Kosten pro LTO handelt, ist die Veränderung der Zahl der LTO für diese Prognose nicht relevant. Es ist jedoch zu beachten, dass Infrac in seinen Prognosen davon ausgeht, dass die Gefässgrösse der Flugzeuge zunimmt (andernfalls wäre aufgrund der Beschränkung der Zahl der Starts und Landungen ab ca. 2030 kein Wachstum mehr möglich). Wir gehen von folgenden Veränderungen aus:

- **Gesundheit Luft:** Zunahme des Kostensatzes mit **Reallohnwachstum** und **Bevölkerungswachstum** (für weitere Erläuterungen siehe Kapitel 3.3e). Zudem ist die Veränderung der Emissionen über die Zeit zu beachten. Die Gesundheitskosten hängen vom Leitschadstoff PM<sub>10</sub> ab. Vereinfachend gehen wir in Absprache mit dem BAZL davon aus, dass die PM<sub>10</sub>-Emissionen einerseits aufgrund neuer, besserer Motoren um voraussichtlich ca.

- 1% pro Jahr abnehmen.** Andererseits entwickeln sich die PM<sub>10</sub>-Emissionen analog dem Treibstoffbedarf.<sup>158</sup> Infrac berechnet den **Treibstoffverbrauch** im Luftverkehr bis 2060 im Rahmen seiner Arbeiten für die Energieperspektiven 2050+. Dabei geht Infrac von einem Treibstoffverbrauch pro pkm aus, d.h. in der Prognose von Infrac ist die Zunahme der Gefässgrösse der Flugzeuge bereits enthalten.
- **Gebäude Luft:** Auch die Gebäudeschäden werden über PM<sub>10</sub> berechnet. Sie nehmen deshalb wie die Gesundheitskosten einerseits um **1% pro Jahr ab** und verändern sich andererseits gemäss dem **Treibstoffverbrauch** zu. Die eigentlichen Kostensätze zur Monetarisierung der Emissionen verändern sich nicht über die Zeit.
  - **Rest Luft** (Ernteauffälle, Waldschäden, Biodiversitätsverluste): Die übrigen Kostenbereiche hängen vom Leitschadstoff NO<sub>x</sub> ab. Auch beim NO<sub>x</sub> gehen wir davon aus, dass es sich mit dem **Treibstoffverbrauch** verändert. Die Kostensätze der übrigen Kostenbereiche verändern sich wie im Strassen- und Schienenverkehr nicht.
  - **Lärm:** Die Lärmkosten steigen mit dem **Reallohnwachstum** (höhere Bewertung der Auswirkungen) und dem **Bevölkerungswachstum** (mehr Lärmbetroffene). Zudem ist die Veränderung der Lärmemissionen zu berücksichtigen. Hier ist ein Wachstum aufgrund der Zunahme der Anzahl Flugbewegungen und der Gefässgrösse zu erwarten, gleichzeitig sollte der technische Fortschritt aber eine Reduktion erlauben. Wir gehen – in Absprache mit dem BAZL – davon aus, dass sich diese beiden Effekte gegenseitig aufheben und damit der emittierte Lärm konstant bleibt – und zwar auf Ebene der Gesamtlärmemissionen in der Schweiz (nicht pro LTO). Grund hierfür ist, dass pro Flughafen der zulässige Lärm definiert ist und dieser nicht überschritten werden darf. Der heutige Lärm entspricht in etwa dem zulässigen Lärm, so dass keine Veränderungen der Lärmemissionen zu erwarten sind (bei mehr Flugbewegungen müssen leisere Flugzeuge eingesetzt werden). So zeigen gemäss BAZL auch die letzten 15 Jahre (ab 2005), dass die Lärmemissionen in etwa konstant blieben. Beim Fluglärm ist die Zunahme mit Reallohn- und Bevölkerungswachstum also **ausgehend von den gesamten Lärmkosten in der Schweiz** zu berechnen (nicht pro LTO).
  - **Unfälle:** Die Unfallkosten nehmen mit dem **Reallohnwachstum** zu. Zudem ist die Veränderung der Unfallhäufigkeit (und Unfallschwere) zu berücksichtigen. Die Unfallhäufigkeit schwankt von Jahr zu Jahr stark, doch konnte Infrac (2015)<sup>159</sup> zwischen 2002 und 2013 in der General Aviation keinen Trend feststellen. Im Linien- und Charterverkehr der Schweiz gab es in diesem Zeitraum keine Unfälle. Auch weltweit wird zwischen 2015 und 2025 kein klarer Trend vorausgesagt.<sup>160</sup> Deshalb nehmen wir in Absprache mit dem BAZL an, dass sich die Unfallkosten pro LTO bis 2060 nur mit dem Reallohnwachstum verändern.

---

<sup>158</sup> Wir verwenden den Treibstoffbedarf, nicht die CO<sub>2</sub>-Emissionen, da Bio- und synthetische Treibstoffe kein CO<sub>2</sub> erzeugen, aber sehr wohl Luftschadstoffe.

<sup>159</sup> Infrac (2015), Luftverkehr und Nachhaltigkeit. Update 2015, S. 71.

<sup>160</sup> Li (2019), Analysis and Forecast of Global Civil Aviation Accidents for the Period 1942-2016, Tabelle 3 (Anzahl Unfälle) und 4 (Todesfälle).

## 6 Zusammenfassung Kostensätze

In den vorangehenden Kapiteln wurden Kostensätze erarbeitet, um auch sekundäre Nutzen der Energiestrategie im Bereich der externen Kosten abschätzen zu können. Diese werden im Folgenden zusammengefasst.

### Externe Kosten der Strom- und Wärmeerzeugung

Im Bereich der Strom- und Wärmeproduktion werden nur die externen Kosten der Luftbelastung ermittelt (Gesundheitskosten, Gebäudeschäden, Ernteauffälle, Waldschäden und Biodiversitätsverluste je inkl. vor- und nachgelagerte Effekte). Nicht berücksichtigt werden die Risiken der Kernkraft und die Schäden des Klimawandels:

- Die Kernkraftrisiken unterscheiden sich im Szenario ZERO und dem Referenzszenario WWB nicht – in beiden Szenarien gibt es ein Phase-out aus der Atomenergie. Kommt dazu, dass die Monetarisierung dieser Risiken sehr grosse Unsicherheiten zeigt.
- Beim Klima werden die Vermeidungskosten für die Reduktion der Treibhausgase in der Schweiz mit einem Gleichgewichtsmodell berechnet (Vergleich Szenario ZERO mit Referenzszenario WWB). Die Berechnung des Primärnutzen der Umsetzung des Netto-Null Ziels ist nicht Teil der Energieperspektiven 2050+. Die Gründe werden im technischen Bericht zu den volkswirtschaftlichen Auswirkungen im Rahmen der EP2050+ in einem Exkurs zusammengefasst. Zudem wird dort in der Diskussion der Sekundäreffekte (Kapitel 5.2) kurz auf den Primärnutzen eingegangen..

Diverse weitere Kostenbereiche werden nicht berücksichtigt, weil sie entweder praktisch unbedeutend (Lärm) oder schwer quantifizierbar sind (Landschaftsbild, Habitatverluste). In den vorliegenden Arbeiten werden aufgrund diverser Datenquellen<sup>161</sup> die externen Kosten der Luftbelastung pro kWh ermittelt. Für die Hauptarbeiten zu den volkswirtschaftlichen Auswirkungen der Energieperspektiven 2050+ gilt die Schweiz als Systemgrenze. Somit wird einerseits der Anteil der Kosten in der Schweiz bestimmt. Ergänzend werden aber auch die Kosten im Ausland ermittelt.

In der vorliegenden Studie werden diejenigen spezifischen externen Kostensätze ermittelt, zu denen es verlässliche Grundlagen gibt. Einige dieser Kostensätze werden zwar in der vorliegenden Studie bestimmt, dann aber für die Berechnung der Sekundäreffekte in EcoPlan (2022) nicht angewendet. Die nachfolgende Abbildung 6-1 fasst zusammen, welche Kostensätze im Rahmen der vorliegenden Studie ermittelt wurden und wie diese in EcoPlan (2022) verwendet werden.

---

<sup>161</sup> Aus den Gesamtemissionen der Luftschadstoffe in der Schweiz und den gesamten externen Kosten in der Schweiz (vom ARE) ergibt sich ein Kostensatz pro Tonne PM<sub>10</sub>-Äquivalent von 272'000 CHF / t (für Ausland 47'000 CHF / t aus EU-Handbuch zu externen Kosten des Verkehrs), der dann mit den Emissionen von PM<sub>10</sub>-Äquivalenten der Strom- (basierend auf ecoinvent-Datenbank) und Wärmeproduktion (ecoinvent und BAFU) multipliziert wird.

**Abbildung 6-1: Externe Kostensätze in der vorliegenden Studie und Anwendung in EcoPlan (2022)**

Bereiche	Für folgende Kostenbereiche werden in der vorliegenden Studie <b>Kostensätze</b> berechnet / nicht berechnet			
	berechnet		nicht berechnet	
Stromproduktion	Luft *)		Kernkraft-risiken	Klima
Wärmeerzeugung	Luft *)			
Sektorkopplungstechnologien (PtH2)	Luft *)			
Industrielle Produktion	Luft *)			
Strassenverkehr	Luft *)	Lärm	Unfälle, Stau, Bodenschäden, sädtische Räume, vor- und nachgelagerte Prozesse, Natur- und Landschaft	
Schienenverkehr	Luft *)	Lärm		
Luftverkehr	Luft *)	Lärm	Unfälle, Stau, Bodenschäden,...	
*) Luft = Kosten der Luftverschmutzung in den Bereichen Gesundheit, Gebäude, Ernteausfälle, Waldschäden, Biodiversitätsverluste				
<b>Legende:</b> Berücksichtigung bei der Berechnung der <b>Sekundäreffekte (Multiplikation der obigen Kostensätze mit Mengengerüst)</b> in EcoPlan (2022):			berücksichtigt	
			berücksichtigt, aber gleiches Mengengerüst für WWB und ZERO (keine Unterschiede in den externen Kosten zwischen Szenario WWB und ZERO)	
			ausserhalb der Systemgrenze der Energieperspektiven 2050+	

**Externe Grenzkosten der Stromerzeugung pro kWh**

Im ersten Block der Abbildung 6-2 werden die externen Grenzkosten der Stromproduktion dargestellt. Die externen Kosten der Luftbelastung liegen in der Schweiz zwischen 0.04 und 9.1 Rp / kWh (je nach Technologie). Werden auch die Effekte im Ausland miteinbezogen, steigen die externen Kosten auf 0.16 bis 9.5 Rp / kWh.

Die höchsten weltweiten Kosten von 9.5 Rp / kWh verursacht das Biogas, gefolgt vom Holz mit 6.3 Rp / kWh und dem Erdgas mit 4.8 Rp / kWh. Die nachhaltigen Technologien sind mit deutlich tieferen Kosten verbunden: Geothermie 1.8 Rp / kWh, Photovoltaik 1.4 Rp / kWh, Windkraft 0.8 Rp / kWh und Wasserkraft 0.3 Rp / kWh. Bei der Kernkraft mit 0.7 Rp / kWh fehlen die Nuklearrisiken und bei den Kehrlichtverbrennungsanlagen werden nur die Emissionen durch Stromverteilung und Netz von 0.2 Rp / kWh miteinbezogen und die Emissionen der eigentlichen Verbrennung werden der Abfallentsorgung zugerechnet.

Abbildung 6-2: Zusammenfassung externe Kosten der Luftbelastung durch Strom- und Wärmeerzeugung und in der Produktion im Jahr 2015<sup>162</sup>

<b>Externe Grenzkosten der Strom- und Wärmeerzeugung in Rp / kWh</b>			
<b>Stromerzeugung im Jahr 2015</b>	Rappen pro kWh erzeugtem Strom		
<b>nur Luftbelastung</b>	Schweiz	Ausland	Total
Kernenergie	0.17	0.53	0.70
Erdgas	3.26	1.51	4.77
Photovoltaik	0.45	0.98	1.43
Wasserkraft	0.20	0.13	0.33
Kehrrichtverbrennungsanlage	0.04	0.12	0.16
Windturbine 800kW	0.62	0.17	0.80
Biogas WKK 160 kWe	9.13	0.41	9.54
Holz WKK 6400 kWe CH	5.76	0.57	6.33
Geothermie	1.64	0.12	1.76
<b>Batterien von Photovoltaikanlagen <i>in CHF/Batterie</i></b>	-	<b>98.41</b>	<b>98.41</b>
<b>Wärmeerzeugung im Jahr 2015</b>	Rappen pro kWh Inputenergie		
<b>nur Luftbelastung</b>	Schweiz	Ausland	Total
Heizöl	1.03	0.53	1.56
Erdgas	0.41	0.17	0.58
Wärmepumpe Luft - Wasser	-	0.03	0.03
Wärmepumpe Erdsonde	0.06	0.03	0.09
Holz	9.80	0.01	9.81
Fernwärme (nur Leitungen)	0.02	0.03	0.05
Biogas	2.51	0.01	2.52
<b>Solarthermie <i>in CHF / m2</i></b>	<b>1.42</b>	<b>10.99</b>	<b>12.41</b>
<b>Sektorkopplungstechnologien</b>	Rappen pro kWh		
<b>Power-to-Wasserstoff (PtH2)</b>	Schweiz	Ausland	Total
Produktion in der Schweiz	0.08	0.01	0.09
Produktion im Ausland	-	0.16	0.16
<b>Nichtenergetische externe Kosten der Luftbelastung in der Produktion im Jahr 2015 in Mio. CHF</b>			
Industrie Steine Erden	409	Mio. CHF	
Abfallindustrie	192	Mio. CHF	
Baugewerbe	748	Mio. CHF	
Industrielle Maschinen	69	Mio. CHF	
Raffinerien	79	Mio. CHF	
Prozesse weitere	550	Mio. CHF	
Industrie Gewerbe andere	83	Mio. CHF	
Land- und Forstwirtschaft (ohne Feuerungen)	5'479	Mio. CHF	
<b>Total</b>	<b>7'610</b>	<b>Mio. CHF</b>	

<sup>162</sup> Aus Konsistenzgründen wurden alle Strom- und Wärmeerzeugungs-Grenzkosten mit Hilfe einer einzigen Datengrundlage (Ecoinvent) erhoben. Dies hat den Vorteil, dass alle Kostenberechnungen auf derselben Basis mit der gleichen Methodik berechnet werden. Der Nachteil besteht aber darin, dass einzelne berechnete Werte (bspw. Biogas) auf teilweise nicht mehr aktuellen Daten beruhen.

### **Externe Grenzkosten der Wärmeerzeugung pro kWh (inkl. PtH<sub>2</sub>)**

Die Wärmeerzeugung ist mit weltweiten Kosten von 0.03 Rp / kWh (Luft-Wärmepumpe) bis 9.8 Rp / kWh (Holz) verbunden (zweiter Block in Abbildung 6-2). Am zweithöchsten sind die Kosten beim Biogas mit 2.5 Rp / kWh, gefolgt vom Heizöl mit 1.6 Rp / kWh und Erdgas mit 0.6 Rp / kWh. Wärmepumpen (Luft und Erdsonde) sind mit Kosten unter 0.1 Rp / kWh verbunden (wobei der Stromverbrauch nicht berücksichtigt wird, da dieser bei der Stromerzeugung miteinbezogen wird). Die Solarthermie kann nicht direkt verglichen werden, da sie in einer anderen Einheit gemessen wird (12.4 CHF / m<sup>2</sup> Kollektorfläche oder 0.50 CHF / m<sup>2</sup> / Jahr). Für Klimaanlagen (Kühlung) können als grobe Näherung die Ergebnisse der Luft-Wärmepumpe verwendet werden.

Bei der Herstellung von Power to Hydrogen (PtH<sub>2</sub>) entstehen nur geringe Kosten von ca. 0.1 Rp / kWh.

### **Nichtenergetische externe Grenzkosten der Produktion**

Der letzte Block in Abbildung 6-2 zeigt schliesslich noch die nichtenergetischen externen Kosten der Luftbelastung in der Produktion: Verändert sich aufgrund der Energieperspektiven 2050+ der Output in den verschiedenen Produktionssektoren, so werden die sich dadurch verändernden externen Kosten ebenfalls miteinbezogen. Dabei wird vereinfachend eine lineare Beziehung zwischen Output und externen Kosten unterstellt. Insgesamt entstehen in den betrachteten Sektoren Luftbelastungskosten von 7.6 Mrd. CHF (davon 5.5 Mrd. CHF in der Land- und Forstwirtschaft).

### **Externe Grenzkosten des Verkehrs**

Im Verkehrsbereich werden neben der Luftbelastung noch weitere externe Kostenbereiche miteinbezogen (Lärm, Bodenschäden, Unfälle, Städtische Räume, Staukosten). Wie bei der Strom- und Wärmeerzeugung werden die Auswirkungen auf das Klima nicht berücksichtigt. Entsprechend werden auch die vor- und nachgelagerten Prozesse weggelassen, die grossmehrheitlich Klimaeffekte sind. Zudem verändern die Energieperspektiven die Kosten im Bereich Natur und Landschaft nicht (Fixkosten).

Die externen Kosten (aus Sicht Verkehrsteilnehmende) in den relevanten Bereichen werden in der folgenden Abbildung dargestellt. Nur im Strassenverkehr wird bei der Luftbelastung ein Kostensatz pro Tonne Schadstoff bestimmt, da Infrast die Änderung der Schadstoffemissionen durch die Energieperspektiven sehr genau ermittelt. Die übrigen Kostenbereiche wurden im Strassenverkehr in einen Kostensatz pro Fzkm zusammengefasst und nach Fahrzeugkategorien differenziert. Im Schienen- und Luftverkehr sind die Kosten der Luftbelastung jedoch im Kostensatz pro Zugkm bzw. pro LTO integriert.

**Abbildung 6-3: Zusammenfassung der externen Kosten im Verkehr (Sicht Verkehrsteilnehmende) für das Jahr 2015**

<b>Strassenverkehr 2015</b>		
CHF pro Tonne PM10	899'000	
CHF pro Tonne NOx	7'000	
<b>Kosten pro Fzkm in den übrigen berücksichtigten Kostenbereichen</b>		
Personenwagen	7.1	Rp / Fzkm
Gesellschaftswagen	47.4	Rp / Fzkm
Motorisierte Zweiräder	31.2	Rp / Fzkm
Bus	31.2	Rp / Fzkm
Trolleybus	79.9	Rp / Fzkm
Tram	54.6	Rp / Fzkm
Lieferwagen	11.5	Rp / Fzkm
Schwere Nutzfahrzeuge	4.5	Rp / Fzkm
<b>Schieneverkehr 2015: Kosten pro Zugkm in den berücksichtigten Kostenbereichen (inkl. Luft)</b>		
Personenverkehr	274	Rp / Zugkm
Güterverkehr	1'479	Rp / Zugkm
<b>Luftverkehr 2015: Kosten pro LTO in den berücksichtigten Kostenbereichen (inkl. Luft)</b>		
Linien- und Charterverkehr	667	CHF / LTO

### Schwellenwerte

Bei den Gesundheitskosten der Luftbelastung muss ein Schwellenwert berücksichtigt werden, denn unter einer Konzentration von  $3.3 \mu\text{g} / \text{m}^3$  PM<sub>10</sub> werden keine Kosten berechnet, da es keine Studien bei so geringen Konzentrationen gibt. Es ist zwar anzunehmen, dass es auch unter diesem Schwellenwert Gesundheitskosten gibt, doch da diese nicht belegt werden können, wird vorsichtig angenommen, dass sie nicht existieren. Konkret ist mit dem Schwellenwert wie folgt umzugehen: Es wird gerechnet als gäbe es keinen Schwellenwert. Am Ende wird aber untersucht, wie sich die PM<sub>10</sub>-Emissionen (bzw. die Gesundheitskosten der Luftbelastung) verändert haben. Sollte die Abnahme höher als 79.03% sein, so muss die Abnahme der Gesundheitskosten so verringert werden, als ob die Abnahme nur 79.03% betragen hätte.

### Prognosen

Die oben dargestellten Kostensätze gelten alle für das Jahr 2015. Die Energieperspektiven 2050+ reichen jedoch bis ins Jahr 2060. Entsprechend müssen die Kostensätze bis 2060 prognostiziert werden. Die folgende Abbildung zeigt, welche Annahmen der Prognose zugrundeliegen.

In der Strom- und Wärmeerzeugung konnten für einzelne Technologien Prognosen des BAFU bis 2035 für die Emissionen im Betrieb in der Schweiz übernommen werden (Emissionen im Nicht-Betrieb und im Ausland bzw. nach 2035 bleiben konstant). Viele Kostensätze nehmen auch mit dem Reallohnwachstum (höhere Bewertung der Schäden) und dem Bevölkerungswachstum zu.

wachstum (mehr von der Umweltbelastung betroffene Personen) zu. Bei der Strom- und Wärmezeugung, bei den Sektorkopplungstechnologien und in der Produktion wird nur 88% des Kostensatzes entsprechend fortgeschrieben, weil nur die Gesundheitskosten der Luftbelastung zunehmen, die anderen Effekte der Luftbelastung hingegen nicht. Im Verkehr werden die Kostenbereiche separat analysiert und entsprechend nehmen die Kostensätze entweder zu 100% oder gar nicht mit Reallohnwachstum (und Bevölkerungswachstum) zu.

Abbildung 6-4: Prognostizierte Veränderung der Kostensätze bis 2060

Stromerzeugung nur Luftbelastung	Emissionsfaktoren		Reallohn- wachstum	Bevölkerungs- wachstum
	2015-2035	2035-2060		
Erdgas	-0.94% / Jahr	konstant	X*	X*
Holz	-3.23% / Jahr	konstant	X*	X*
Übrige Technologien (inkl. Batterien)	konstant	konstant	X*	X*
Wärmeerzeugung nur Luftbelastung	Emissionsfaktoren		Reallohn- wachstum	Bevölkerungs- wachstum
	2015-2035	2035-2060		
Heizöl	-1.66% / Jahr	konstant	X*	X*
Erdgas	-0.94% / Jahr	konstant	X*	X*
Holz	-3.23% / Jahr	konstant	X*	X*
Übrige Technologien	konstant	konstant	X*	X*
Sektorkopplungstechnologien PtH2				
Produktion in Schweiz und Ausland		konstant	X*	X*
Nichtenergetische externe Kosten der Luftbelastung in der Produktion				
Alle Sektoren		konstant	X*	X*
Strassenverkehr	Emissionsfaktoren		Reallohn- wachstum	Bevölkerungs- wachstum
Gesundheitskosten Luftbelastung	in Anzahl Tonnen aus Bottom-up Modell von Infrass		X	X
Luftbelastung Rest			-	-
Lärm: Je nach Fzkat. und Szenario	-0.33% bis +0.11% pro Jahr		X	(vorne drin)
Bodenschäden	konstant		-	-
Unfälle	-2% pro Jahr		X	-
Städtische Räume	konstant		X	X
Staukosten	konstant		X	-
LSVA-Abzug	konstanter %-satz		-	-
Schieneverkehr	Emissionsfaktoren		Reallohn- wachstum	Bevölkerungs- wachstum
Gesundheitskosten Luftbelastung	konstant		X	X
Luftbelastung Rest	konstant		-	-
Lärm bis 2020 (Personen- / Güterverkehr)	-2.2% / -8.9% pro Jahr		X	X
Lärm ab 2020	-0.6% pro Jahr		X	X
Bodenschäden	konstant		-	-
Unfälle	-2% pro Jahr		X	-
Städtische Räume	konstant		X	X
Luftverkehr	Emissionsfaktoren		Reallohn- wachstum	Bevölkerungs- wachstum
Gesundheitskosten Luftbelastung	Treibstoffverbrauch / -1% pro Jahr		X	X
Gebäudeschäden Luftbelastung	Treibstoffverbrauch / -1% pro Jahr		-	-
Luftbelastung Rest	Treibstoffverbrauch		-	-
Lärm (nicht pro LTO)	konstant in Schweiz		X	X
Unfälle	konstant		X	-

\* Bei diesen Kostensätzen darf nur 88% des Reallohn- und Bevölkerungswachstums berücksichtigt werden.

## Literaturverzeichnis

- B,S,S. Volkswirtschaftliche Beratung AG (2009)  
Literaturübersicht Kernenergie. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Energie. Online:  
[https://www.bss-basel.ch/images/stories/bss-basel/News/b,s,s.-literaturstudie\\_kernenergie.pdf](https://www.bss-basel.ch/images/stories/bss-basel/News/b,s,s.-literaturstudie_kernenergie.pdf) (12.11.2019).
- Beelen Rob, Ole Raaschou-Nielsen, Massimo Stafoggia, Zorana Jovanovic Andersen, Gudrun Weinmayr, Barbara Hoffmann, Kathrin Wolf, Evangelia Samoli, Paul Fischer, Mark Nieuwenhuijsen, Paolo Vineis, Wei W Xun, Klea Katsouyanni, Konstantina Dimakopoulou, Anna Oudin, Bertil Forsberg, Lars Modig, Aki S Havulinna, Timo Lanki, Anu Turunen, Bente Oftedal, Wenche Nystad, Per Nafstad, Ulf De Faire, Nancy L Pedersen, Claes-Göran Östenson, Laura Fratiglioni, Johanna Penell, Michal Korek, Göran Pershagen, Kirsten Thorup Eriksen, Kim Overvad, Thomas Ellermann, Marloes Eeftens, Petra H Peeters, Kees Meliefste, Meng Wang, Bas Bueno-de-Mesquita, Dorothea Sugiri, Ursula Krämer, Joachim Heinrich, Kees de Hoogh, Timothy Key, Annette Peters, Regina Hampel, Hans Concin, Gabriele Nagel, Alex Ineichen, Emmanuel Schaffner, Nicole Probst-Hensch, Nino Künzli, Christian Schindler, Tamara Schikowski, Martin Adam, Harish Phuleria, Alice Vilier, Françoise Clavel-Chapelon, Christophe Declercq, Sara Gioni, Vittorio Krogh, Ming-Yi Tsai, Fulvio Ricceri, Carlotta Sacerdote, Claudia Galassi, Enrica Migliore, Andrea Ranzi, Giulia Cesaroni, Chiara Badaloni, Francesco Forastiere, Ibon Tamayo, Pilar Amiano, Miren Dorronsoro, Michail Katsoulis, Antonia Trichopoulou, Bert Brunekreef, Gerard Hoek (2014)  
Effects of long-term exposure to air pollution on natural-cause mortality: an analysis of 22 European cohorts within the multicentre ESCAPE project. In: Lancet online:  
[http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736\(13\)62158-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736(13)62158-3) (18.11.2019).
- Burnett Richard, Hong Chen, Mieczysław Szyszkwicz, Neal Fann, Bryan Hubbell, C. Arden Pope III, Joshua S. Apte, Michael Brauer, Aaron Cohen, Scott Weichenthal, Jay Coggins, Qian Di, Bert Brunekreef, Joseph Frostad, Stephen S. Lim, Haidong Kan, Katherine D. Walker, George D. Thurston, Richard B. Hayes, Chris C. Lim, Michelle C. Turner, Michael Jerrett, Daniel Krewski, Susan M. Gapstur, W. Ryan Diver, Bart Ostro, Debbie Goldberg, Daniel L. Crouse, Randall V. Martin, Paul Peters, Lauren Pinault, Michael Tjepkema, Aaron van Donkelaar, Paul J. Villeneuve, Anthony B. Miller, Peng Yin, Maigeng Zhou, Lijun Wang, Nicole A. H. Janssen, Marten Marra, Richard W. Atkinson, Hilda Tsang, Thuan Quoc Thach, John B. Cannon, Ryan T. Allen, Jaime E. Hart, Francine Laden, Giulia Cesaroni, Francesco Forastiere, Gudrun Weinmayr, Andrea Jaensch, Gabriele Nagel, Hans Concin, and Joseph V. Spadaro (2018)  
Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter. In: PNAS Proceedings of the national Academy of Sciences of the United States of America, vol. 115, Nr 38, S. 9592-9597. Online:  
<https://www.pnas.org/content/suppl/2018/08/29/1803222115.DCSupplemental> (4.2.2020).
- Castro Alberto, Thomas Götschi, Beat Achermann, Urs Baltensperger, Brigitte Buchmann, Denise Felber Dietrich, Alexandre Flückiger, Marianne Geiser, Brigitte Gälli Purghart, Hans Gygax, Meltem Kutlar Joss, Lara Milena Lüthi, Nicole Probst-Hensch, Peter Strähl, Nino Künzli (2020)  
Comparing the lung cancer burden of ambient particulate matter using scenarios of air quality standards versus acceptable risk levels. In: International Journal of Public Health. Online: <https://doi.org/10.1007/s00038-019-01324-y> (5.2.2020).

Econcept, BAFU (2011)

Indikatoren für Ökosystemleistungen: Systematik, Methodik und Umsetzungsempfehlungen für eine wohlfahrtsbezogene Umweltberichterstattung. Umwelt-Wissen Nr. 1102. Online:

<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wirtschaft-konsum/publikationen-studien/publikationen/indikatoren-oekosystemleistungen.html> (12.11.2019).

Econcept, Infrac (2005)

Konsequente Umsetzung des Verursacherprinzips. Studie im Auftrag des BUWAL Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Umwelt-Materialien Nr. 201. Bern.

Ecoplan (2007)

Die Energieperspektiven 2035 – Band 3: Volkswirtschaftliche Auswirkungen, Ergebnisse des dynamischen Gleichgewichtsmodells, mit Anhang über die externen Kosten des Energiesektors. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Energie. Bern.

Ecoplan (2012)

Energiestrategie 2050 – volkswirtschaftliche Auswirkungen. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Energie. Bern.

Ecoplan (2016)

Empfehlungen zur Festlegung der Zahlungsbereitschaft für die Verminderung des Unfall- und Gesundheitsrisikos (value of statistical life). Studie im Auftrag des Bundesamtes für Raumentwicklung ARE und der Beratungsstelle für Unfallverhütung bfu.n Bern und Altdorf.

Ecoplan (2020)

Bewertung der externen Effekte im Strassenverkehr. Grundlagen zur Durchführung einer Kosten-Nutzen-Analyse. Forschungsprojekt VSS 2015/115 auf Antrag des Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS). Bern und Altdorf.

Ecoplan (2022)

Energieperspektiven 2050+ Volkswirtschaftliche Auswirkungen. Analyse mit einem Mehrländer-Gleichgewichtsmodell – Annahmen, Szenarien, Ergebnisse. Studie im Auftrag des Bundesamts für Energie.

Ecoplan, Infrac (2014),

Externe Effekte des Verkehrs 2010, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Raumentwicklung (ARE), Bern, Zürich und Altdorf. Online: <https://www.are.admin.ch/are/de/home/verkehr-und-infrastruktur/grundlagen-und-daten/kosten-und-nutzen-des-verkehrs.html> (6.12.2019).

Ecoplan, Infrac, ISPM (Institut für Sozial- und Präventivmedizin) (2004)

Externe Gesundheitskosten durch verkehrsbedingte Luftverschmutzung in der Schweiz. Aktualisierung für das Jahr 2000. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Raumentwicklung, des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft, des Bundesamtes für Energie sowie des Bundesamtes für Gesundheit. Bern.

ESU-services GmbH, Paul Scherrer Institut (Christian Bauer, Rolf Frischknecht, Petrisa Eckle, Karin Flury, Thierry Neal, Katalin Papp, Salome Schori, Andrew Simons, Matthias Stucki, Karin Treyer) (2012)  
Umweltauswirkungen der Stromerzeugung in der Schweiz. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Energie.

European Commission (2003)  
External Costs. Research results on socio-environmental damages due to electricity and transport. Online im Internet: [http://www.externe.info/externe\\_2006/externpr.pdf](http://www.externe.info/externe_2006/externpr.pdf) (12.11.2019).

European Commission (2005)  
ExternE Externalities of Energy Methodology 2005 Update. Hrsg: Peter Bickel und Rainer Friedrich. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung — IER, Universität Stuttgart. Online im Internet:  
[http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/kina\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/kina_en.pdf) (13.6.2012).

European Commission (2019)  
Handbook on the external costs of Transport. Version 2019. Brüssel. Directorate-General for Mobility and Transport. Online:  
<https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/studies/internalisation-handbook-isbn-978-92-79-96917-1.pdf> (9.1.2020).

Infras (2006),  
Externe Kosten des Strassen- und Schienenverkehrs 2000. Klima und nicht erfasste Umweltbereiche sowie vor- und nachgelagerte Prozesse. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Raumentwicklung. Zürich.

Infras (2015)  
Luftverkehr und Nachhaltigkeit. Update 2015. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Zivilluftfahrt. Online: [https://www.infras.ch/media/filer\\_public/13/83/1383c11b-c096-4854-b36d-49ed5592bd18/2747\\_update-nhl\\_sb\\_19mai15\\_finf.pdf](https://www.infras.ch/media/filer_public/13/83/1383c11b-c096-4854-b36d-49ed5592bd18/2747_update-nhl_sb_19mai15_finf.pdf) (3.3.2020).

Infras (2019)  
Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs HBEFA. Version 4.1.  
Berechnungstool im Auftrag der Schweiz, Deutschlands, Österreichs, Schwedens, Frankreichs und Norwegens. Bern.

Infras, Ecoplan (2012)  
Integration des Luftverkehrs in die Transportrechnung. Studie im Auftrag der Bundeämter für Statistik (BFS) und Raumentwicklung (ARE). Zürich und Bern.

Infras, Ecoplan (2019)  
Externe Effekte des Verkehrs 2015, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Raumentwicklung (ARE). Bern, Zürich und Altdorf. Online: <https://www.aren.admin.ch/aren/de/home/verkehr-und-infrastruktur/grundlagen-und-daten/kosten-und-nutzen-des-verkehrs.html> (9.7.2019).

KATARISK (2002)

KATARISK - Katastrophen und Notlagen in der Schweiz. Eine Risikobeurteilung aus der Sicht des Bevölkerungsschutzes. Erläuterung der Methode. Online im Internet:

<https://www.babs.admin.ch/de/aufgabenbabs/gefaehrdrisiken/studienberichte.html#ui-collapse-122> (12.11.2019).

KATARISK (2002)

KATARISK - Katastrophen und Notlagen in der Schweiz. Eine Risikobeurteilung aus der Sicht des Bevölkerungsschutzes. Ergebnisse der Risikobewertung. Online im Internet:

<https://www.babs.admin.ch/de/aufgabenbabs/gefaehrdrisiken/studienberichte.html#ui-collapse-122> (12.11.2019).

Keller, Mario (2019)

Staukosten Schweiz 2015. Online im Internet:

<https://www.are.admin.ch/are/de/home/verkehr-und-infrastruktur/grundlagen-und-daten/kosten-und-nutzen-des-verkehrs.html> (18.12.2019).

Krewitt W., DLR und Schломann B, ISI (2006)

Externe Kosten der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im Vergleich zur Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern. Gutachten im Rahmen von Beratungsleistungen für das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Stuttgart und Karlsruhe.

Li Yafei (2019)

Analysis and Forecast of Global Civil Aviation Accidents for the Period 1942-2016. In: Mathematical Problems in Engineering. Online:

<http://downloads.hindawi.com/journals/mpe/2019/5710984.pdf> (3.3.2020).

Liu C., R. Chen, F. Sera, A.M. Vicedo-Cabrera, Y. Guo, S. Tong, M.S.Z.S. Coelho, P.H.N. Saldiva, E. Lavigne, P. Matus, N. Valdes Ortega, S. Osorio Garcia, M. Pascal, M. Stafoggia, M. Scortichini, M. Hashizume, Y. Honda, M. Hurtado-Díaz, J. Cruz, B. Nunes, J.P. Teixeira, H. Kim, A. Tobias, C. Íñiguez, B. Forsberg, C. Åström, M.S. Ragettli, Y.-L. Guo, B.-Y. Chen, M.L. Bell, C.Y. Wright, N. Scovronick, R.M. Garland, A. Milojevic, J. Kysely, A. Urban, H. Orru, E. Indermitte, J.J.K. Jaakkola, N.R.I. Rytö, K. Katsouyanni, A. Analitis, A. Zanobetti, J. Schwartz, J. Chen, T. Wu, A. Cohen, A. Gasparrini, H. Kan (2019)

Ambient Particulate Air Pollution and Daily Mortality in 652 Cities. In: The New England Journal of Medicine Vol 381 (8), 705-715.

Markandya Anil, Hunt Alistair (2004)

ExternE-Pol Externalities of Energy: Extension of Accounting Framework and Policy Applications. The Externalities of Energy Insecurity. University of Bath, Bath, UK. Online im Internet: [http://www.externe.info/externe\\_2006/expolwp3.pdf](http://www.externe.info/externe_2006/expolwp3.pdf) (12.11.2019).

NEEDS (2009)

External costs from emerging electricity generation technologies. Deliverable 6.1 (RS1a). NEEDS New Energy Externalities Developments for Sustainability.

Nitsch J. et al. (DLR, ifeu, Wuppertaler Institut für Klima, Umwelt und Energie) (2004)

Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland.

Forschungsvorhaben im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. FKZ 901 41 803. Stuttgart, Heidelberg, Wuppertal.

- SN 641 822a (2009)  
Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr. Zeitkosten im Personenverkehr.  
Schweizer Norm des schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS). Zürich.
- SN 641 824 (2013)  
Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr. Unfallraten und Unfallkostensätze.  
Schweizer Norm des Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute.  
Zürich.
- Treyer Karin, Oshikawa Hiroki, Bauer Christian, Miotti Marco (2015)  
WP4 Environment. In: Hirschberg Stefan, Wiemer Stefan, Burgherr Peter (Hrsg): Energy from the Earth. Bern, S. 183-227. Online: <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/91855> (24.2.2020).
- UBA Umweltbundesamt (2018)  
Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten. Methodische Grundlagen.  
Dessau-Rosslau. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/methodenkonvention-30-zur-ermittlung-von-0> (9.12.2019).
- UBA Umweltbundesamt (2019)  
Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten. Kostensätze. Dessau-Rosslau. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/methodenkonvention-30-zur-ermittlung-von> (9.12.2019).
- UVEK (2019)  
UVEK LCI Data 2019. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern.
- Weidmann Ulrich, Hecht Markus, Maibach Markus (2015)  
Stand der Forschung und Forschungsbedarf im Bereich Eisenbahnlärm. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt.  
<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/laerm/fachinformationen/massnahmen-gegen-laerm/massnahmen-gegen-eisenbahnlarm/ressortforschung-eisenbahnlarm.html> (28.2.2020).