

# Umweltaspekte von Elektroautos

Ein Argumentarium

ausgearbeitet durch  
**Rolf Frischknecht**

Auftraggeber  
**Bundesamt für Umwelt BAFU**

Uster, Januar 2012

---

|                     |                    |                              |
|---------------------|--------------------|------------------------------|
| ESU-services Ltd.   | Kanzleistrasse 4   | CH - 8610 Uster              |
| Rolf Frischknecht   | T +41 44 940 61 91 | frischknecht@esu-services.ch |
| Niels Jungbluth     | T +41 44 940 61 32 | jungbluth@esu-services.ch    |
| Sybille Büsser      | T +41 44 940 61 35 | buesser@esu-services.ch      |
| Karin Flury         | T +41 44 940 61 02 | flury@esu-services.ch        |
| René Itten          | T +41 44 940 61 38 | itten@esu-services.ch        |
| Salome Schori       | T +41 44 940 61 35 | schori@esu-services.ch       |
| Matthias Stucki     | T +41 44 940 67 94 | stucki@esu-services.ch       |
| www.esu-services.ch | F +41 44 940 61 94 |                              |

## Impressum

|                    |   |
|--------------------|---|
| Titel              | Umweltaspekte von Elektroautos – Ein Argumentarium  |
| Autor              | Rolf Frischknecht<br>ESU-services Ltd.<br>Kanzleistrasse 4, 8610 Uster<br>Tel. +41 44 940 61 91, Fax +41 44 940 61 94<br><a href="mailto:frischknecht@esu-services.ch">frischknecht@esu-services.ch</a><br><a href="http://www.esu-services.ch">www.esu-services.ch</a>   |
| Auftraggeber       | Bundesamt für Umwelt BAFU, Abt. LuNis [Luftreinhaltung und Nis], CH-3003 Bern, Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).   |
| Begleitung BAFU    | Michael Weber, Sektion Verkehr  |
| Urheberrecht       | Bundesamt für Umwelt BAFU   |
| Haftungsausschluss | Die Informationen und Schlussfolgerungen in diesem Bericht wurden auf Grundlage von als verlässlich eingeschätzten Quellen erhoben. ESU-services GmbH und die Autoren geben keine Garantie bezüglich Eignung, oder Vollständigkeit der im Bericht dargestellten Informationen. ESU-services GmbH und die Autoren lehnen jede rechtliche Haftung für jede Art von direkten, indirekten, zufälligen oder Folge-Schäden oder welche Schäden auch immer, ausdrücklich ab. |
| Hinweis            | Diese Studie/dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.  |
| Version            | 387_Argumentarium Elektromobilität_final_v2.5.docx, 18.01.2012 15:57:00   |

## Abkürzungen

|         | Deutsch                                       | Englisch  |
|---------|---|---|
| CH      | Schweiz (Confoederatio Helvetica)             |   |
| CED     |   | Cumulative Energy Demand  |
| db(A)   | Dezibel (A)                                   |   |
| ENTSO-E |   | European Network of Transmission System Operators for Electricity (from 01.07.2009) |
| GuD     | Gas und Dampf                                 |   |
| GWP     | Treibhauspotential                            | Global Warming Potential  |
| KEA     | Kumulierter Energieaufwand                    |   |
| kWh     | Kilowattstunde                                |   |
| Li-Ion  | Lithium-Ionen                                 |   |
| LIMP    | Lithium Metall Polymer                        | Lithium metal polymer   |
| MJ      | Megajoule                                     |   |
| NEFZ    | Neuer Europäischer Fahrzyklus                 |   |
| NiMH    | Nickel-Metallhydrid                           |   |
| PJ      | Petajoule                                     |   |
| pkm     | Personenkilometer                             |   |
| TARGA   | Schweizerisches Fahrzeugtypenregister         |   |
| TJ      | Terajoule                                     |   |
| UBP     | Umweltbelastungspunkt                         |   |
| UCTE    |   | Union for the Coordination of Transmission of Electricity (until 30.06.2009)        |
| UNECE   | United Nations Economic Commission for Europe |   |

# Zusammenfassung

## Zielsetzung

Der vorliegende Bericht dient dazu, die Umweltauswirkungen von batteriebetriebenen Elektroautos auf der Basis von Ökobilanzen möglichst umfassend abschätzen zu können. Der Inhalt dieses Argumentariums beschränkt sich auf den Bereich der individuellen Mobilität mit rein batterieelektrischen Fahrzeugen und schliesst den Vergleich mit öffentlichen Verkehrsmitteln und mögliche Rückkopplungseffekte (rebound effects) aus.

Der vorliegende Bericht stützt sich auf naturwissenschaftliche Grundlagen und die Expertise des Autors. Ein unabhängiger Experte, Dr. Martin Pehnt, ifeu Heidelberg, hat eine frühere Fassung des Berichts kommentiert. Dessen Kommentare und Verbesserungsvorschläge weitgehend berücksichtigt werden konnten.

## Untersuchungsgegenstand und Modellierungsgrundlagen

In diesem Bericht werden Fahrzeuge der unteren Mittelklasse vom Typ VW Golf beschrieben. Dies gilt für das Elektroauto wie auch für verbrauchsarme beziehungsweise das meistverkaufte Auto. Zusätzlich werden im Sinne eines Ausblicks auch Bilanzen von zwei unterschiedlich motorisierten Leichtbaufahrzeugen dokumentiert.

Die Bilanzen beinhalten die Herstellung des Fahrzeugs und wesentlicher Komponenten (insbesondere die Batterie bei Elektroautos), die Bereitstellung des Treibstoffs beziehungsweise des Stroms, die Emissionen beim Fahren sowie Bau, Unterhalt und Rückbau der Strasseninfrastruktur. Die publizierten Ergebnisse zu den Umweltauswirkungen der Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien unterscheiden sich stark. Aufgrund einer Übersicht über mehrere publizierte Arbeiten erachten wir Treibhausgas-Emissionen pro kg Batterie in der Grössenordnung von 15 bis 20 kg CO<sub>2</sub>-eq als plausibel.

Der Strombedarf beziehungsweise Kraftstoffbedarf der einzelnen Fahrzeuge bezieht sich auf die Realsituation und berücksichtigt damit den Energiebedarf von Nebenverbrauchern wie Heizung, Licht oder Klimaanlage. Die schweizerischen Flottendurchschnitte basieren auf den Angaben der Version 2.1 des Handbuchs für Emissionsfaktoren. Die Verbräuche der Leichtbaufahrzeuge („cityCar“) basieren auf Herstellerangaben.

Die Umweltauswirkungen individueller Mobilität werden mit den vier Indikatoren Treibhausgas-Emissionen, kumuliertem Energieaufwand (erneuerbar und nicht erneuerbar), Gesamtumweltbelastung ermittelt mit der Methode der ökologischen Knappheit 2006 und hochradioaktive Abfälle quantifiziert. In einer weitergehenden Betrachtung, in welcher das Reduktionspotenzial von Elektroautos und ausgewählten konventionellen Autos abgeschätzt wird, werden zusätzlich auch individuelle Schadstoffe wie NO<sub>x</sub> oder PM10 quantifiziert.

## Ergebnisse

Der Vergleich der Ökobilanz-Ergebnisse von Elektroautos, Diesel-, Benzin- und Erdgasfahrzeugen zeigt, dass die Treibhausgas-Emissionen des heute durchschnittlichen in Betrieb stehenden fossil betriebenen Fahrzeugs deutlich höher liegen als diejenigen eines Elektroautos der Golf-Klasse (165 bis 198 Gramm pro pkm im Vergleich zu 96 Gramm pro pkm, siehe Tabelle Z. 1). Die Differenz bezüglich kumuliertem Energieaufwand nicht erneuerbar ist hingegen deutlich geringer (3.0 bis 3.3 MJ Öl-eq pro pkm im Vergleich zu 2.7 MJ Öl-eq pro pkm). Die Gesamtumweltbelastung ermittelt mit der Methode der ökologischen Knappheit 2006 liegt beim Elektrofahrzeug leicht höher als beim Erdgas-Auto, aber deutlich tiefer als beim Flottenmix der Diesel- und Benzinautos. Die Erzeugung radioaktiver Abfälle pro pkm

ist beim Elektroauto am höchsten. Das sparsamste Dieselauto emittiert rund 30 % mehr Treibhausgase als das mit Schweizer Strom („Strommix CH“) betriebene Elektroauto, verursacht aber eine um knapp 32 % tiefere Umweltbelastung und benötigt gut 18 % weniger nicht erneuerbare Primärenergie. Der meist verkaufte Golf (ein Benziner) verursacht knapp 80 % höhere Treibhausgas-Emissionen als das Elektroauto und benötigt 8 % mehr nicht erneuerbare Primärenergie. Die Umweltbelastung dieses Autos ist mit derjenigen des Elektroautos vergleichbar. Das Fahren mit den Leichtbaufahrzeugen verursacht rund 50 % bis 65 % tiefere Umweltauswirkungen als das Fahren mit einem sparsamen Dieselauto beziehungsweise einem Elektroauto der unteren Mittelklasse.

Tabelle Z. 1 Kumulierter Energieaufwand (erneuerbar, nicht erneuerbar), Treibhausgas-Emissionen, Umweltbelastung (Methode der ökologischen Knappheit 2006) und radioaktive Abfälle pro pkm mit verschiedenen Personenwagen

|   | Verbrauch                      | KEA, erneuerbar | KEA, nicht erneuerbar | Treibhausgase         | Umweltbelastung | radioaktive Abfälle |
|---|--------------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------|---------------------|
|   | pro 100 km                     | MJ Öl-eq        | MJ Öl-eq              | g CO <sub>2</sub> -eq | UBP'06          | mm <sup>3</sup>     |
| Diesel, Flottendurchschnitt               | 6.9 Liter <sup>2</sup>         | 0.08            | 2.98                  | 177                   | 272             | 0.30                |
| Benzin, Flottendurchschnitt               | 8.7 Liter <sup>2</sup>         | 0.08            | 3.32                  | 198                   | 207             | 0.31                |
| Flottendurchschnitt Schweiz               | -                              | 0.08            | 3.26                  | 194                   | 228             | 0.31                |
| Erdgas, Flottendurchschnitt               | 8 Nm <sup>3</sup> <sup>2</sup> | 0.09            | 3.29                  | 165                   | 140             | 0.35                |
| Diesel, Golf BlueMotion                   | 4.6 Liter <sup>3</sup>         | 0.08            | 2.21                  | 124                   | 111             | 0.30                |
| Benzin, Golf 1.4 TFSI                     | 7.4 Liter <sup>3</sup>         | 0.09            | 2.92                  | 171                   | 159             | 0.31                |
| Elektroauto, CH Strommix <sup>1</sup>     | 20 kWh                         | 0.29            | 2.71                  | 96                    | 163             | 1.10                |
| Diesel, cityCar, Euro5                    | 2 Liter <sup>4</sup>           | 0.03            | 0.94                  | 53                    | 49              | 0.12                |
| Elektro cityCar, CH Strommix <sup>1</sup> | 7 kWh <sup>4</sup>             | 0.10            | 0.93                  | 29                    | 56              | 0.41                |

<sup>1</sup>: Konsummix Schweiz, ohne separat verkaufte zertifizierte Stromprodukte

<sup>2</sup>: Verbrauch gemäss Handbuch für Emissionsfaktoren, HBEFA v2.1

<sup>3</sup>: inklusive Realsituations-Zuschlag von 20 %

<sup>4</sup>: Herstellerangaben, [www.loremo.com](http://www.loremo.com)

Sensitivitätsanalysen bezüglich Strommix, Batterieherstellung und –lebensdauer zeigen, dass das Verwenden von Strom aus erneuerbaren Quellen sowie die Verlängerung der Lebensdauer der Batterie helfen können, die Umweltauswirkungen des Fahrens mit Elektroautos weiter zu senken.

Bezüglich weiterer Umweltauswirkungen kann durch Elektroautos im Bereich Lärmschutz und Luftqualität in Ballungsgebieten eine gewisse Entlastung erwartet werden. Da Elektroautos denselben Strassenraum benötigen wie konventionell angetriebene Autos, bleibt der durch die individuelle Mobilität ausgeübte Druck auf natürliche Landschaften und Landwirtschaftsland unverändert hoch.

Eine Analyse der Ressourcensituation zeigt, dass die Rohstoffverfügbarkeit eher eine Frage begrenzter Produktionskapazitäten und geopolitischer Einschränkungen denn eine der geologischen Knappheit ist. Dies gilt für Lithium wie auch für Neodym, zwei für die Elektromobilität bedeutende Metalle (Batterie beziehungsweise Elektromotor). Bezüglich der Verfügbarkeit von Kupfer spielt die Elektromobilität eine untergeordnete Rolle. Der Bedarf an Platingruppenmetallen wird nur wenig zurückgehen, da geregelte Katalysatoren auch in Hybridfahrzeugen eingesetzt werden.

### Folgerungen

Die Ökobilanzergebnisse des Fahrens mit einem Elektroauto zeigen eine grosse Bandbreite auf. Je nach Studie und Grundlagen variieren beispielsweise die gesamten Treibhausgas-Emissionen eines mit Schweizer Strom (Konsummix) betriebenen Autos zwischen rund 60 Gramm CO<sub>2</sub>-eq und rund 100 Gramm CO<sub>2</sub>-eq pro Personenkilometer (100 bis 160 Gramm CO<sub>2</sub>-eq pro Fahrzeugkilometer). Der wesentliche Grund für diesen Unterschied liegt in der Bilanzierung der Batterie, das heisst in der CO<sub>2</sub>-Intensität ihrer Herstellung.

Vor allem die Wahl des Strommixes hat einen grossen Einfluss auf die Treibhausgas-Emissionen aber auch auf die übrigen Umweltkennwerte. Elektroautos, welche mit Strom aus (mehrheitlich) fossilen Quellen geladen werden, weisen hohe spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen auf, produzieren aber relativ wenig radioaktive Abfälle. Werden die Fahrzeuge mit Strom aus Kernkraftwerken geladen, sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen relativ tief. Dafür werden deutlich mehr radioaktive Abfälle erzeugt. Einzig das Fahren von Elektroautos mit Strom aus erneuerbaren Quellen zeigt in allen fünf Indikatoren tiefe Werte mit Ausnahme des erneuerbaren kumulierten Energieaufwandes.

Es kann erwartet werden, dass die Umweltauswirkungen des Fahrens mit einem Elektroauto durch zukünftige technische Entwicklungen bei den Batterien verringert werden können. Andererseits dürften sich die Umweltauswirkungen von Benzin- und Dieselaautos angesichts der zunehmenden Verknappung der Reserven („Peak Oil“) und dem ansteigenden Abbau von Ölschiefer und Ölsanden in Zukunft eher verschlechtern, da die Förder- und Aufbereitungsaufwendungen für die Treibstoffe eher zunehmen werden.

Die Bilanzen von Leichtbaufahrzeugen mit deutlich reduziertem spezifischem Verbrauch zeigen, dass dadurch eine deutliche Reduktion der Umweltbelastung selbst gegenüber heutigen, verbrauchsarmen Fahrzeugen erreicht werden kann. Die Wahl des Antriebskonzeptes (Elektro, Benzin oder Diesel) kommt erst an zweiter Stelle.

Insgesamt ist die Informationssituation bezüglich Elektroautos verbesserungsfähig. Unsicherheiten bestehen insbesondere im Bereich der Batterieherstellung, Lebensdauer und Leistung sowie im spezifischen Strombedarf von Elektroautos im Alltag.

# Inhalt

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>ZWECK UND INHALT</b>   | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>UMWELTINDIKATOREN</b>  | <b>1</b>  |
| <b>3</b> | <b>ÖKOBILANZ STROMERZEUGUNG</b>   | <b>2</b>  |
| 3.1      | Umweltbelastung und kumulierter Energieaufwand Stromerzeugung .....                 | 2         |
| 3.2      | Potenzial erneuerbare Energien Schweiz 2020-2030.....                               | 4         |
| 3.3      | Flottenbedarf Elektrizität durch Elektroautos .....                                 | 5         |
| 3.4      | Wechselwirkungen zwischen Elektroautos und Stromnetz.....                           | 6         |
| 3.4.1    | Einfluss Mehrbedarf auf Kraftwerkspark und Übertragungsleitungen .....              | 6         |
| 3.4.2    | Autobatterien als mobiler Speicher im Stromnetz.....                                | 6         |
| 3.4.3    | Spezifische Umweltbelastung von Strom aus neu gebauten Kraftwerken .....            | 7         |
| 3.5      | Wissenslücken Ökobilanz Stromerzeugung.....   | 7         |
| <b>4</b> | <b>ÖKOBILANZEN KOMPONENTEN</b>  | <b>8</b>  |
| 4.1      | Übersicht .....   | 8         |
| 4.2      | Ökobilanzen Lithium-Batterie .....  | 8         |
| 4.3      | Ökobilanzen zur Herstellung von Fahrzeugbatterien .....                             | 10        |
| 4.3.1    | Abschätzung der spezifischen Umweltbelastung .....                                  | 10        |
| 4.3.2    | Vergleich mit Emissionen des Benzinbedarfs.....                                     | 11        |
| 4.4      | Wissenslücken Ökobilanzen Batterien.....  | 11        |
| <b>5</b> | <b>VERBRAUCHSMESSUNG UND REALVERBRAUCH BEI ELEKTROFAHRZEUGEN</b>                    | <b>12</b> |
| <b>6</b> | <b>PLUG-IN HYBRID FAHRZEUGE</b>   | <b>12</b> |
| <b>7</b> | <b>VERGLEICH ÖKOBILANZ ELEKTROAUTO MIT FOSSIL BETRIEBENEN FAHRZEUGEN</b>            | <b>14</b> |
| 7.1      | Basisvariante .....   | 14        |
| 7.2      | Sensitivitätsanalyse Strommix .....   | 19        |
| 7.3      | Sensitivitätsanalysen Batteriebilanzierung und Lebensdauer.....                     | 20        |
| 7.4      | Fazit.....  | 21        |
| <b>8</b> | <b>VERMINDERUNGSPOTENZIAL DER UMWELTBELASTUNG DURCH ELEKTROAUTOS</b>                | <b>22</b> |
| 8.1      | Klimagas und Umweltbelastung .....  | 22        |
| 8.2      | Luftschadstoffe .....   | 23        |
| 8.3      | Lärmbelastung.....  | 24        |
| 8.4      | Landinanspruchnahme.....  | 25        |
| 8.5      | Einsatz mineralischer Rohstoffe.....  | 25        |
| 8.5.1    | Übersicht .....   | 25        |
| 8.5.2    | Platingruppenmetalle .....  | 25        |
| 8.5.3    | Kupfer.....   | 26        |
| 8.5.4    | Lithium.....  | 26        |
| 8.5.5    | Kobalt .....  | 27        |
| 8.5.6    | Metalle der Seltenen Erden .....  | 27        |
| 8.5.7    | Fazit .....   | 28        |
| 8.6      | Konflikte zwischen der Öko-Strom-Produktion und verschiedenen Umweltbereichen ..... | 28        |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>9 FOLGERUNGEN</b>  | <b>29</b> |
| <b>10 LITERATUR</b>   | <b>31</b> |
| <b>ANHANG</b>   | <b>33</b> |
| Konzept der Primärenergiefaktoren .....                               | 33        |
| Dominanzanalyse Strombereitstellung .....                             | 35        |
| Produktionsmix Schweiz .....  | 36        |
| Konsummix Schweiz (exkl. Anteil zertifizierter Strom) .....           | 41        |
| Versorgungsmix Schweiz, BFE 2007 .....                                | 46        |
| Zertifizierter Strommix Schweiz .....                                 | 51        |
| GuD Kraftwerk .....   | 55        |
| Steinkohlekraftwerk Schweiz .....                                     | 61        |
| Kernkraftwerk Schweiz .....   | 66        |
| Windkraftwerk Schweiz .....   | 71        |
| Photovoltaik Schweiz .....  | 75        |
| Strommix UCTE .....   | 81        |
| Energiebedarf Batterien-Herstellung,ecoinvent Datenbestand v2.2 ..... | 86        |
| Dominanzanalyse Batterieherstellung .....                             | 87        |
| Li-Ion-Batterie, ESU-services .....                                   | 87        |
| Li-Ion-Batterie,ecoinvent Zentrum .....                               | 92        |
| Basistabelle Verminderungspotenzial der Umweltbelastung .....         | 97        |
| <b>STELLUNGNAHME IFEU HEIDELBERG GMBH</b>                             | <b>98</b> |



## 1 Zweck und Inhalt

Der vorliegende Bericht dient dazu, die Umweltauswirkungen von batteriebetriebenen Elektroautos möglichst umfassend abschätzen zu können. Der Bericht stützt sich auf naturwissenschaftliche Grundlagen und die Expertise des Autors. Er wurde von einem unabhängigen Experten, Dr. Martin Pehnt, ifeu Heidelberg gegengelesen. Seine Kommentare zu einer früheren Fassung dieses Berichts wurden weitgehend berücksichtigt. Der Inhalt dieses Berichts muss nicht in allen Punkten mit den Positionen des BAFU übereinstimmen. In diesem Bericht werden der Kenntnisstand und die aktuellen Erkenntnisse aus der Ökobilanzierung von Elektroautos sowie ausgewählter Komponenten zusammengefasst.

Der Inhalt dieses Argumentariums beschränkt sich auf den Bereich der individuellen Mobilität und schliesst deshalb den Vergleich mit öffentlichen Verkehrsmitteln wie Bahn, Tram oder Bus nicht mit ein. Auch mögliche Rückkopplungseffekte (rebound effects) werden nicht betrachtet.

Die im Bericht enthaltenen Ökobilanzergebnisse beziehen sich auf den heutigen Stand der Technik von rein batterieelektrischen Fahrzeugen. Aus Aufwandgründen wurde darauf verzichtet, andere, heute eingesetzte Antriebskonzepte (Hybride, Agrotreibstoffe) oder zukünftige Antriebskonzepte zu bilanzieren.

Im nachfolgenden Kapitel 2 werden die verwendeten Umweltindikatoren genannt und deren Wahl begründet. In Kapitel 3 wird die Ökobilanz der Stromerzeugung dokumentiert. Danach werden im Kapitel 4 die Umweltauswirkungen der Fahrzeugkomponenten diskutiert. In Kapitel 5 wird die Situation bezüglich der Energieverbrauchsmessung bei Fahrzeugen beschrieben und in Kapitel 6 werden die Besonderheiten von hier nicht bilanzierten Plug-In Hybrid-Fahrzeugen angesprochen. Schliesslich werden in Kapitel 7 die Umweltauswirkungen des Personentransports mit Elektrofahrzeugen mit denjenigen des Personentransports mit fossil betriebenen Fahrzeugen verglichen und in Kapitel 8 das Verminderungspotential der Umweltbelastungen durch den Ersatz der heutigen Flotte durch Elektrofahrzeuge, durch verbrauchsarme Dieselfahrzeuge beziehungsweise durch das heute meist verkaufte Benzinfahrzeug der Golfklasse evaluiert.

## 2 Umweltindikatoren

In diesem Argumentarium werden vier Ökobilanz-Indikatoren verwendet. Der Strassenverkehr ist einer der bedeutenden Emittenten von Treibhausgasen. Die Treibhausgas-Emissionen werden mit den aktuellen Treibhauspotenzialen gemäss dem 4. Bericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2007) gewichtet. Im Zusammenhang mit der Diskussion zur 2000 Watt Gesellschaft spielt die Reduktion des Energiebedarfs eine wichtige Rolle. Deshalb wird der kumulierte Energieaufwand gemäss der im ecoinvent Datenbestand v2.2 implementierten Methode (Frischknecht et al. 2007) und aufgeteilt in erneuerbar und nicht erneuerbar ausgewiesen. Die Methode der ökologischen Knappheit 2006 (Frischknecht et al. 2008) basiert auf den Zielsetzungen der Schweizerischen Umweltpolitik. Die Methode wird hier verwendet, um die Gesamtumweltbelastung der verschiedenen Antriebskonzepte zu beurteilen. Mit dieser Methode werden die wesentlichen Schadstoffemissionen individueller Mobilität bewertet, einschliesslich versauernder und überdüngender Substanzen. Schliesslich wird der Indikator hochradioaktive Abfälle gezeigt, welcher in der Stromdeklaration gemäss EU Direktive (European Commission 2003) neben den CO<sub>2</sub> Emissionen aufgeführt werden muss.

Direkte Einflüsse auf Natur und Landschaft durch Strassen, Brücken, Kühltürme, Windkraftanlagen und Wasserkraft spezifische Aspekte wie Restwassermengen oder Abflussschwankungen (Schwall und Sunk) können mit heutigen Ökobilanzmethoden nicht abgebildet und quantifiziert werden. In den hier gezeigten Ökobilanz-Ergebnissen sind sie deshalb nicht enthalten und werden nur am Rande thematisiert (siehe Unterkapitel 8.6).

### 3 Ökobilanz Stromerzeugung

#### 3.1 Umweltbelastung und kumulierter Energieaufwand Stromerzeugung

Die Strombereitstellung ist ein umweltrelevanter Bereich der Elektromobilität. Je nach Strommix beziehungsweise Kraftwerkstechnologie sind unterschiedliche Umweltauswirkungen mit der Bereitstellung von 1 kWh Strom verbunden. Grundsätzlich wird in Ökobilanzen unterschieden zwischen einer rein beschreibenden Betrachtung und einer Betrachtung, welche die zukünftigen Auswirkungen von (Politik-)Entscheiden abbildet (siehe auch Frischknecht & Stucki 2010). Der Schweizer Konsummix und der Strommix des europäischen Verbundnetzes werden in beschreibenden Analysen eingesetzt. Erdgas befeuerte Gas und Dampf-Kraftwerke, Kernkraftwerke, Windkraftwerke und Photovoltaik sind Beispiele von Technologien, welche zur Abdeckung eines zukünftigen Strommehrbedarfes in Frage kommen. In der Ökobilanz-Datenbank ecoinvent wird beim Strombezug in der Schweiz der Konsummix eingesetzt (Spalten rechts in Tabelle 1: electricity mix ecoinvent). Dieser entspricht dem Verbrauchermix unter Abzug der separat verkauften, zertifizierten Stromprodukte.

Tabelle 1 Verbrauchermix Schweiz, zertifizierter Strommix Schweiz und Konsummix Schweiz exklusive zertifizierte Stromprodukte; domestic: Kraftwerke in der Schweiz; import: Kraftwerke im Ausland

| Category             | Technology     | Origin   | Source | Consumer mix ecoinvent |                 | Certified electricity |                | Electricity mix ecoinvent |                 |
|----------------------|----------------|----------|--------|------------------------|-----------------|-----------------------|----------------|---------------------------|-----------------|
|                      |                |          |        | %                      | GWh             | %                     | GWh            | %                         | GWh             |
| <b>renewable</b>     |                |          |        |                        |                 |                       |                |                           |                 |
| hydro                |                | domestic |        | 32.645%                | 18121.39        | 97.801%               | 4576.80        | 26.647%                   | 13544.59        |
|                      |                | import   |        | 2.458%                 | 1364.56         | 0.000%                | 0.00           | 2.685%                    | 1364.56         |
| other                |                |          |        |                        |                 |                       |                |                           |                 |
|                      | solar          | domestic |        | 0.049%                 | 27.11           | 0.327%                | 15.30          | 0.023%                    | 11.81           |
|                      |                | import   |        | 0.000%                 | 0.00            | 0.000%                | 0.00           | 0.000%                    | 0.00            |
|                      | wind           | domestic |        | 0.029%                 | 16.03           | 0.321%                | 16.03          | 0.000%                    | 0.00            |
|                      |                | import   |        | 0.052%                 | 28.80           | 0.615%                | 28.80          | 0.000%                    | 0.00            |
|                      | biomass        | domestic | wood   | 0.166%                 | 92.39           | 0.430%                | 20.14          | 0.142%                    | 72.25           |
|                      |                |          | biogas | 0.196%                 | 108.58          | 0.506%                | 23.66          | 0.167%                    | 84.92           |
|                      |                | import   |        | 0.000%                 | 0.00            | 0.000%                | 0.00           | 0.000%                    | 0.00            |
| <b>non renewable</b> |                |          |        |                        |                 |                       |                |                           |                 |
| nuclear              |                | domestic |        | 29.007%                | 16101.84        |                       |                | 31.678%                   | 16101.84        |
|                      |                | import   |        | 11.603%                | 6440.74         |                       |                | 12.671%                   | 6440.74         |
| fossil               |                |          |        |                        |                 |                       |                |                           |                 |
|                      | oil            | domestic |        | 0.197%                 | 109.17          |                       |                | 0.215%                    | 109.17          |
|                      |                | import   |        | 0.295%                 | 163.75          |                       |                | 0.322%                    | 163.75          |
|                      | natural gas    | domestic |        | 0.295%                 | 163.75          |                       |                | 0.322%                    | 163.75          |
|                      |                | import   |        | 0.885%                 | 491.24          |                       |                | 0.966%                    | 491.24          |
|                      | coal           | domestic |        | 0.000%                 | 0.00            |                       |                | 0.000%                    | 0.00            |
|                      |                | import   |        | 0.098%                 | 54.58           |                       |                | 0.107%                    | 54.58           |
| waste                |                | domestic |        | 1.967%                 | 1091.65         |                       |                | 2.148%                    | 1091.65         |
|                      |                | import   |        | 0.000%                 | 0.00            |                       |                | 0.000%                    | 0.00            |
| other                | UCTE           |          |        | 18.388%                | 10206.93        |                       |                | 20.081%                   | 10206.93        |
|                      | Pumped storage |          |        | 1.671%                 | 927.50          |                       |                | 1.825%                    | 927.50          |
| <b>Total</b>         |                |          |        | <b>100.000%</b>        | <b>55510.00</b> | <b>100.000%</b>       | <b>4680.73</b> | <b>100.000%</b>           | <b>50829.27</b> |

In Tabelle 2 sind die Kennwerte der Bereitstellung von 1 kWh Strom an eine Niederspannungs-Steckdose aufgeführt. Die Ergebnisse basieren auf den Daten des ecoinvent Datenbestandes v2.2 (ecoinvent Centre 2010), teilweise ergänzt um Stromtransport und -verteilung.

Der Bedarf an nicht erneuerbarer Energie variiert um einen Faktor 100 zwischen dem tiefsten Wert (zertifizierter Strommix) und dem höchsten (Kernkraftwerk). Für die Bereitstellung von 1 kWh Kernenergie-Strom werden 14.6 MJ Öl-eq (beziehungsweise 4.1 kWh Öl-eq) nicht erneuerbare Primärenergie benötigt (tiefer thermischer Wirkungsgrad beim Kraftwerk und hoher Energiebedarf bei der Uran-Anreicherung). Die Technologien auf Basis erneuerbarer Energien benötigen durchwegs deutlich weniger als 1 kWh Öl-eq (entspricht 3.6 MJ Öl-eq) nicht erneuerbare Primärenergie zur Erzeugung und Lieferung einer kWh Strom.

Die spezifischen Treibhausgas-Emissionen der nicht fossilen Technologien (Erneuerbare und Kernenergie) sind mit 15 bis 92 Gramm CO<sub>2</sub>-eq pro kWh deutlich tiefer als diejenigen fossiler Kraftwerke (GuD: 485 Gramm CO<sub>2</sub>-eq pro kWh, Steinkohle-Kraftwerk 1.24 kg CO<sub>2</sub>-eq pro kWh). Bei den Strommischen ist die Höhe der Treibhausgas-Emissionen abhängig vom Anteil fossiler Kraftwerke im Kraftwerkspark. Die Emissionen variieren zwischen knapp 600 Gramm CO<sub>2</sub>-eq pro kWh des Strommixes des Europäischen Netzverbundes UCTE (heute ENTSO-E) bis 15 Gramm CO<sub>2</sub>-eq pro kWh des Schweizer Mixes zertifizierter Elektrizität aus erneuerbaren Energien (mit einem Anteil von 98 % zertifizierter Wasserkraft). Zwei Drittel der Treibhausgas-Emissionen des UCTE-Mixes stammen aus den fossilen Kraftwerken in Deutschland (Braunkohle, Steinkohle), Spanien (Steinkohle, Erdgas), Italien (Erdgas, Steinkohle und Heizöl) und Polen (Steinkohle, Braunkohle). Weitere individuelle Beiträge über 3 % stammen aus den fossilen Kraftwerken in den Niederlanden, Tschechien, Griechenland und Frankreich.

Die Erzeugung von hochradioaktiven Abfällen ist direkt proportional zum Anteil Kernenergie im Strommix. Eine kWh Schweizer Kernenergie erzeugt knapp 10 mm<sup>3</sup> hochradioaktive Abfälle, im Schweizer Konsummix sind es rund 6 mm<sup>3</sup> pro kWh. Die Abfallmenge des Schweizer Konsummixes setzt sich zusammen aus Abfall aus inländischen Kernkraftwerken und Abfall aus französischen Kernkraftwerken, deren Strom in die Schweiz importiert wird. Strom aus Gaskraftwerken und Kraftwerken auf Basis der erneuerbaren Energien erzeugt zwischen 0.02 und 0.25 mm<sup>3</sup> radioaktive Abfälle pro kWh. Diese werden durch den Stromverbrauch in vorgelagerten Prozessen wie Erdgaspipelines, Materialherstellung (Kupfer, Stahl) etc. verursacht.

Die Gesamtumweltbelastung (gemäss Methode der ökologischen Knappheit 2006) liegt zwischen 67 Umweltbelastungspunkten (UBP) pro kWh zertifizierter Elektrizität und 640 UBP pro kWh UCTE Strom. Beim UCTE Strommix verursachen die Kraftwerke Frankreichs, Deutschlands und Spaniens zusammen etwas mehr als die Hälfte der gesamten Umweltbelastung. Im Weiteren sind die Kraftwerke Italiens und Polens mit Anteilen über 7.5 % relevant. Die Kraftwerke in Tschechien, Belgien, Griechenland, der Slowakei und den Niederlanden steuern je zwischen 3.1 % und 2.5 % zur Umweltbelastung bei. Die Umweltbelastung der verschiedenen Schweizer Strommixe liegt bei 272 UBP/kWh (Produktionsmix), 418 UBP/kWh (Verbrauchermix) und 451 UBP/kWh (Konsummix).

Windkraftstrom, Photovoltaikstrom, Strom aus einem GuD-Kraftwerk und Strom aus einem Schweizer Kernkraftwerk verursachen 88, 183, 266 beziehungsweise 552 UBP pro kWh. Im Anhang sind Flussdiagramme abgebildet, auf welchen die wesentlichen Beiträge zu den Gesamtergebnissen ersichtlich sind.

### 3. Ökobilanz Stromerzeugung

Tabelle 2 Kumulierter Energieaufwand (KEA) erneuerbar und nicht erneuerbar, Treibhausgas-Emissionen, Umweltbelastung (bewertet mit der Methode der ökologischen Knappheit 2006) und radioaktive Abfälle der Bereitstellung von 1 kWh Strom (Niederspannung) mit verschiedenen Strommischen beziehungsweise Kraftwerkstechnologien

|   | KEA,<br>erneuerbar | KEA, nicht<br>erneuerbar | Treibhausgase              | Ökologische<br>Knappheit<br>2006 | Hoch radio-<br>aktive Abfälle |
|---|--------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
|   | MJ Öl-<br>eq/kWh   | MJ Öl-<br>eq/kWh         | kg CO <sub>2</sub> -eq/kWh | UBP/kWh                          | mm <sup>3</sup> /kWh          |
| Produktionsmix Schweiz                      | 2.35               | 6.32                     | 0.030                      | 272.4                            | 3.98                          |
| Konsummix Schweiz <sup>1</sup>              | 1.50               | 9.49                     | 0.148                      | 450.6                            | 6.05                          |
| Verbrauchermix BFE 2007                     | 1.74               | 8.70                     | 0.137                      | 418.2                            | 5.55                          |
| Strommix Schweiz, zertifiziert <sup>2</sup> | 4.35               | 0.14                     | 0.015                      | 66.7                             | 0.02                          |
| GuD-Kraftwerk                               | 0.03               | 8.39                     | 0.485                      | 265.6                            | 0.02                          |
| Steinkohle Deutschland <sup>3</sup>         | 0.11               | 14.36                    | 1.237                      | 630.2                            | 0.17                          |
| Kernkraftwerk Schweiz <sup>3</sup>          | 0.02               | 14.64                    | 0.016                      | 552.3                            | 9.62                          |
| Windkraft Schweiz <sup>3</sup>              | 4.39               | 0.36                     | 0.027                      | 87.9                             | 0.04                          |
| Photovoltaik Schweiz <sup>3</sup>           | 4.56               | 1.42                     | 0.092                      | 182.6                            | 0.25                          |
| UCTE Strommix                               | 0.79               | 11.95                    | 0.594                      | 638.9                            | 4.42                          |

<sup>1</sup>: exklusive separat verkaufte, zertifizierte Stromprodukte

<sup>2</sup>: der zertifizierte Strommix besteht zu 97.8 % aus Wasserkraft aus Schweizer Produktion

<sup>3</sup>: Durchschnitt der in Betrieb stehenden Anlagen

Die TEP Energy GmbH hat auf der Basis des Herkunftsnachweises, den verfügbaren Daten zum stündlichen Stromaustausch und einem europäischen Kraftwerksmodell die CO<sub>2</sub>-Emissionen (nur Kohlendioxid-Emissionen am Kamin, nicht alle Treibhausgas-Emissionen) des an Schweizer Steckdosen gelieferten Stroms ermittelt (Jakob et al. 2009). Als Ergebnis resultieren für den heutigen, an den Verbraucher gelieferten Strommix (Jahresmittelwert) zwischen 80 und 110 Gramm CO<sub>2</sub>/kWh und für den zukunftsgerichteten Grenzstrommix (Portfolio der Zubaukapazitäten zwischen 2020 und 2040) von 310 bis 400 Gramm CO<sub>2</sub>/kWh. Beim zukunftsgerichteten Grenzstrommix wird untersucht, mit welchen Kraftwerkstechnologien eine zusätzliche Nachfragesteigerung von 1'500 GWh (von 2010 bis 2030) befriedigt werden kann. Hierzu hat die TEP Energy GmbH 4 mögliche Szenarien modelliert (Referenz; neues KKW in der Schweiz; höherer Erdgaspreis; neue erneuerbare Energien<sup>1</sup> und Energieeffizienz). Die Grenzkraftwerksmixe sind in allen vier Szenarien stark von Gaskombikraftwerken geprägt, woraus sich die relativ hohen spezifischen Treibhausgas-Emissionen ergeben.

### 3.2 Potenzial erneuerbare Energien Schweiz 2020-2030

Gemäss Elektrizitätsstatistik wurden im Jahr 2009 insgesamt 35.5 TWh Strom aus erneuerbaren Energien erzeugt (BFE 2010). Das zukünftige Potenzial der erneuerbaren Energien wurde unter anderem in BFE Szenarien und durch die Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften abgeschätzt (Berg & Real 2006; BFE 2007a, b, siehe Tabelle 3). Gemäss SATW liegen die Potenziale der Stromproduktion mit erneuerbaren Energien für das Jahr 2050 zwischen 48 bis knapp 52 TWh oder 81 % bis knapp 88 % des Stromverbrauchs der Schweiz im Jahr 2008. Gemäss BFE Szenarien liegt das Potential der erneuerbaren Energien bei 52 % (Szenario I, Trend) bis 86 % (Szenario IV, Trend) des Gesamtverbrauchs.

<sup>1</sup> Der Begriff „neue erneuerbare Energien“ umfasst Kleinwasserkraft, Sonne, Wind, Holz, Biomasse, Umweltwärme und Geothermie.

### 3. Ökobilanz Stromerzeugung

Tabelle 3 Stromproduktion heute (2009) und Potenzial Stromproduktion auf Basis erneuerbarer Energien in der Schweiz 2050 (SATW) beziehungsweise 2035 (BFE Szenarien)

|                                  | Produktion 2009   | SATW 2006              | BFE Szenario I   | BFE Szenario II   | BFE Szenario III, Var. E | BFE, Szenario IV, Var. E |
|----------------------------------|-------------------|------------------------|------------------|-------------------|--------------------------|--------------------------|
|                                  | TWh               | TWh                    | TWh              | TWh               | TWh                      | TWh                      |
| Grosswasserkraft                 | 34.2 <sup>4</sup> | 36.0                   | 36.7             | 38.3 <sup>2</sup> | 39.8 <sup>2</sup>        | 38.3 <sup>2</sup>        |
| Kleinwasserkraft                 |                   | 1.3                    |                  |                   |                          |                          |
| Windkraft                        | 0.02              | 1.2                    | 0.1              | 0.8               | 2.3                      | 1.5                      |
| Photovoltaik                     | 0.05              | 1.9 / 5.7 <sup>6</sup> | 0.1              | 0.2               | 1.9                      | 1.0                      |
| Biogas                           | 0.2               | 1.5 <sup>1</sup>       | 0.3 <sup>3</sup> | 1.5 <sup>3</sup>  | 2.6 <sup>3</sup>         | 2.9 <sup>3</sup>         |
| Biomasse                         | 0.1               | 3.8 <sup>5</sup>       | 0.1              | 0.4               | 1.7                      | 1.1                      |
| Tiefe Geothermie                 |                   | 2.1                    | 0.1              | 0.6               | 4.9                      | 2.2                      |
| Abfall, erneuerbar               | 0.9               |                        | 0.8              | 0.9               | 1.7                      | 1.1                      |
| <b>Total erneuerbare Energie</b> | <b>35.5</b>       | <b>47.8 / 51.6</b>     | <b>38.1</b>      | <b>42.6</b>       | <b>54.9</b>              | <b>48.1</b>              |
| <b>Gesamtverbrauch</b>           | <b>57.5</b>       | <b>k.A.</b>            | <b>73.1</b>      | <b>69.4</b>       | <b>64.4</b>              | <b>55.8</b>              |

<sup>1</sup>: Annahme: Potenzial Biogas (ohne Treibstoffe) 5 TWh, 30% Stromwirkungsgrad.

<sup>2</sup>: Nettoproduktion; Bruttoproduktion minus 70 % des Verbrauchs der Speicherpumpen (4.9 TWh).

<sup>3</sup>: Klärgas- und Biogasanlagen.

<sup>4</sup>: Mittlere Produktionserwartung (ohne Speicherpumpen)

<sup>5</sup>: inklusive erneuerbarer Anteil Abfall

<sup>6</sup>: heutige Regelkapazität limitierend / zusätzliche Regelkapazitäten verfügbar

Die BFE Energieszenarien prognostizieren im Szenario IV einen deutlich geringeren Ausbau der Stromproduktion aus neuen erneuerbaren Energiequellen als in Szenario III und bei SATW. Insbesondere wird ein deutlicher Ausbau der Pumpspeicherung von heute ca. 2.5 TWh auf 7 TWh prognostiziert. Mit 7 TWh Pumpenstrom werden 4.9 TWh Elektrizität erzeugt<sup>2</sup>. Diese erzeugte Strommenge muss bei der Stromproduktion der Wasserkraft in Abzug gebracht werden.

Das zukünftige Potenzial der erneuerbaren Energien wird als unterschiedlich beurteilt. Gegenüber der Produktion 2009 reicht es von zusätzlichen 2.6 TWh (BFE Szenario I) bis zu zusätzlichen 19.4 TWh (BFE Szenario III, Var. E) im 2035. Bei der Wasserkraft wird mit zusätzlichen 2.5 bis 5.6 TWh gerechnet (Szenario I beziehungsweise Szenario III, Var. E; jeweils ohne Strom aus neuen Pumpspeicher-Kraftwerken). Die Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften rechnet mit einem Potenzial zwischen zusätzlichen 12.3 und 16.1 TWh Strom aus erneuerbaren Energien bis 2050.

### 3.3 Flottenbedarf Elektrizität durch Elektroautos

Aussagen zum Flottenbedarf Elektrizität durch Elektroautos sind schwierig zu treffen und müssen auf Modellannahmen beruhen. Die Golfklasse kann als Durchschnitt der in der Schweiz gefahrenen Fahrzeuge betrachtet werden. Wir gehen von einem durchschnittlichen Strombedarf an der Steckdose eines Elektroautos (Golfklasse) von 20 kWh pro 100 km aus. Die Kilometerleistung der im Inland immatrikulierten Pkw in der Schweiz betrug im Jahr 2009 48'127 Mio. Fahrzeug-km<sup>3</sup>. Bei einem Bestand von 4'010'000 Personenwagen<sup>3</sup> ergibt

<sup>2</sup> Gesamtwirkungsgrad Speicherpumpen: 70 %, d.h. Verlust 30 %.

<sup>3</sup> [www.bfs.admin.ch](http://www.bfs.admin.ch), Zugriff am 8.12.2010

dies eine Jahresleistung von rund 12'000 Kilometer pro Fahrzeug (siehe auch Fussnoten 11 und 17).

Bei einem Ersatz von 2.5 % der Fahrzeugflotte durch Elektroautos (100'000 Fahrzeuge<sup>4</sup>) beträgt der Strommehrbedarf 240 GWh. Soll der Anteil Elektroautos langfristig auf einen Viertel der Schweizer Flotte gesteigert werden (1 Mio Fahrzeuge), müssen pro Jahr für deren Antrieb zusätzliche 2.4 TWh Elektrizität bereitgestellt werden. Dies entspricht einem Anteil von 17 % des Potenzials neuer erneuerbarer Energien gemäss BFE Szenario III E, rund einem Fünftel der Produktion in einem neuen Kernkraftwerk mit einer elektrischen Leistung von 1'600 MW oder der Produktion eines GuD-Kraftwerks mit einer Leistung von 400 MWe und 6'150 Vollbetriebsstunden (70 % Auslastung).

## 3.4 Wechselwirkungen zwischen Elektroautos und Stromnetz

### 3.4.1 Einfluss Mehrbedarf auf Kraftwerkspark und Übertragungsleitungen

Die Auswirkungen der Markteinführung von Elektroautos auf den Tagesverlauf der Stromnachfrage und auf die Tageshöchstlast sind eher bescheiden. Gemäss WWF Deutschland gibt es bei 20 Mio. Elektroautos (ab 2020) eine Abflachung der Nachtsenke beziehungsweise neu eine Nachtspitze im deutschen Stromnetz (Horst et al. 2009). Ansonsten sind bei moderatem Elektroauto-Anteil die Auswirkungen auf die Höchstlast relativ gering. Gemäss einer VDE-Studie zu E-Mobility (VDE 2010) und Vertretern der Stromwirtschaft (Allwardt 2009) ist ein Netzausbau wegen des Ausbaus der Kraftwerkskapazitäten auf Basis der erneuerbaren Energien erforderlich und zum transnationalen Verbinden der erneuerbaren Energiequellen. Die Marktdurchdringung von Elektroautos spielt hierbei praktisch keine Rolle.

Derzeit werden auch Konzepte diskutiert, bei welchen die Elektroautos als dezentrale Energiespeicher im Stromnetz verwendet werden. Je nach Situation werden die Batterien der ans Netz angeschlossenen Fahrzeuge als Stromproduzenten oder als -konsumenten verwendet, um Lastspitzen auszugleichen. In der Schweiz will die Interessengemeinschaft „Vehicle to Grid“<sup>5</sup> mit ihrem Wissen und Netzwerk Aktivitäten zur Nutzung von Elektrizitätsspeichern in Fahrzeugen für die Bereitstellung von Regelernergie in intelligenten Elektrizitätsnetzen unterstützen.

### 3.4.2 Autobatterien als mobiler Speicher im Stromnetz

Die mit dem Nutzen der Batterien von Elektroautos als dezentrale Energiespeicher verbundenen technischen, gesellschaftlichen und rechtlichen Herausforderungen sind vielfältig. Es stellen sich Fragen der Energieeffizienz, der gesellschaftlichen Akzeptanz und des Verwaltungsaufwandes. Bezüglich der Energieeffizienz ist zu klären, welcher Wirkungsgrad vor dem Hintergrund der Tatsache erreicht werden kann, dass jeweils von Wechselstrom auf Gleichstrom und zurück konvertiert werden muss. Weiter ist zu untersuchen, wie sich die zusätzlichen Lade-/Entladezyklen auf die Lebensdauer und die verbleibende Ladekapazität der Batterien auswirken. Eine forcierte Alterung der Batterien würde die Umweltbilanz der Batterien massgeblich verschlechtern. Die gesellschaftliche Akzeptanz, dass die Batterie eines am Netz angeschlossenen Elektroautos entladen wird, ist bei den Besitzern von Elektroautos nicht per se vorhanden. Es entsteht zudem ein erheblicher Verwaltungsaufwand, da zehntausende von

---

<sup>4</sup> In der Schweiz lag in den letzten zehn Jahren der Ersatzbedarf an Personenwagen bei 260'000 bis 315'000 Fahrzeugen pro Jahr (zwischen 6.5 % und 8 % des gesamten Fahrzeugbestandes der Schweiz).

<sup>5</sup> siehe [www.v2g.ch](http://www.v2g.ch)

Einzelverträgen abgeschlossen und die gespeicherten und gelieferten Strommengen zentral gemessen und abgerechnet werden müssten. Auch eine Nachnutzung ausgedienter Batterien in stationären, grossen Energiespeichern ist nicht einfach, da es technisch schwierig ist, Batterien mit unterschiedlichen Vergangenheiten zusammenzuschalten. Die Leistungsfähigkeit und die Lebensdauer der Batterien sind heute zentrale technische Herausforderungen der Elektromobilität. Bereits heute die zusätzliche Funktion der Autobatterie als Netzpuffer einzuplanen, erachten wir deshalb als verfrüht.

#### 3.4.3 Spezifische Umweltbelastung von Strom aus neu gebauten Kraftwerken

Aus Sicht der Ökobilanz sind bei neu gebauten Kraftwerken (Wasserkraftwerke, Windkraftwerke oder Gaskraftwerke) im Vergleich zu jeweils bestehenden Anlagen keine nennenswerten Unterschiede in den Emissionen pro kWh zu erwarten. Bei Kernkraftwerken dürften erhöhte Sicherheitsanforderungen einerseits und der Uranabbau in Minen mit niedriger Uran-Konzentration zu tendenziell höheren Kennwerten führen. Die lokalen und regionalen Einflüsse neu zu bauender Kraftwerke auf Natur und Landschaft können in Ökobilanzen nicht abgebildet werden. Für neue Kraftwerke auf Basis der erneuerbaren Energien gibt es weitergehende Anforderungen von Zertifizierungssystemen wie beispielsweise das naturemade star Label (siehe auch Unterkapitel 8.6).

### 3.5 Wissenslücken Ökobilanz Stromerzeugung

Die Sachbilanz des Schweizer Strommixes basiert auf der Umfrage Stromkennzeichnung 2007 des BFE. Darin werden 19 % der gelieferten Elektrizität als „nicht überprüfbar“ deklariert. Dieser Anteil wird derzeit mit der Bilanz des UCTE Strommix angenähert. Hier strebt das BFE eine deutliche Verbesserung der Datenlage an.

Da Kunden vermehrt zertifizierte Stromprodukte kaufen (und nicht den vom Elektrizitätsunternehmen gelieferten Durchschnittsmix) verändert sich der Restmix und enthält höhere Anteile Strom aus nicht erneuerbaren Energiequellen. Diesem Umstand sollte auch in technischen Verordnungen der verbesserten Energieetikette Rechnung getragen werden. Die Schweizer Absatzzahlen zertifizierter Elektrizität sind bekannt (AEE 2009).

Mögliche zukünftige Entwicklungen des Schweizer Kraftwerksparks und der Versorgungssituation werden vom BFE derzeit evaluiert. Zukünftig werden Energieeffizienz, erneuerbare Energien und Gaskraftwerke eine wesentliche Rolle spielen. Es ist zum heutigen Zeitpunkt noch verfrüht, einen Strommix zu definieren, der die Elektrizitätsproduktion der Zubaukapazitäten von heute bis beispielsweise 2030 abbildet.

Innerhalb der Wertschöpfungsketten der verschiedenen Kraftwerkstechnologien sind unter anderem die folgenden Wissenslücken bei der Ökobilanzierung erwähnenswert:

- Erdgas: zukünftiger Anteil der Versorgung mit LNG (Liquefied Natural Gas)
- Kernenergie: Umweltauswirkungen der aktuellen Brennelementbereitstellung (Stichworte Wiederaufarbeitungsanlagen Majak, Uranförderung in Kasachstan, Niger, Namibia, etc.)
- Windkraft: Sachbilanzen von Offshore Windparks (Daten ausländischer Studien liegen vor), inklusive Ferntransport in die Schweiz
- Solarstrom: Sachbilanzdaten zur Solarzellen-Produktion in China (derzeit rund 30 % Marktanteil Schweiz)

- Solarthermische Kraftwerke: Sachbilanzen südspanischer oder nordafrikanischer Anlagen (Daten ausländischer Studien liegen vor), inklusive Ferntransport in die Schweiz
- Geothermie: Sachbilanzen auf Basis von gebauten Anlagen fehlen.
- Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ): Sachbilanzdaten für Erstellung und Betrieb.

## 4 Ökobilanzen Komponenten

### 4.1 Übersicht

Autos mit Verbrennungsmotor beziehungsweise Elektromotor unterscheiden sich bezüglich verschiedener Komponenten. Elektroautos benötigen einen Elektromotor, eine Batterie, einen Rekuperator und Leistungselektronik. Autos mit Verbrennungsmotor benötigen demgegenüber einen Verbrennungsmotor, einen Tank und eine Abgasnachbehandlung (Katalysator). Diesen Unterschieden wird in den vorliegenden Bilanzen in vereinfachender Weise Rechnung getragen. Unterschiede im Rohstoffbedarf (wie etwa ein höherer Kupferbedarf), und im Gewicht der Motoren werden berücksichtigt. Das Elektroauto kommt ohne Katalysator (und damit auch ohne Edelmetalle) und ohne Tank aus. Der Einsatz von Seltenen Erden (Neodym) in Hochleistungsmagneten von Elektromotoren wird hier vernachlässigt. Bereits heute sind in Autos viele Elektromotoren (Stellmotoren) im Einsatz, in denen Neodym verwendet wird. Die im Elektroauto zusätzlich benötigte Leistungselektronik ist nicht bilanziert. Da der in Elektroautos eingesetzten Batterie und deren Herstellung eine zentrale Rolle zukommt, fokussieren wir im Folgenden auf Ökobilanzen dieser Komponente.

### 4.2 Ökobilanzen Lithium-Batterie

Ökobilanzen zu Herstellung und Entsorgung von Batterien im Allgemeinen und zu Lithium-Ionen Batterien im Speziellen sind eher rar. Die nachfolgenden Ausführungen beschränken sich auf die Herstellung, inklusive der Gewinnung der erforderlichen Rohstoffe. In der Gesamtbilanz der Elektroautos ist auch die Entsorgung der Batterien enthalten, welche aber bezüglich Umweltauswirkungen des Fahrens mit einem Elektroauto eine marginale Rolle spielt.

Im Jahr 2010 wurde von der Empa eine umfangreiche Bilanz als wissenschaftliche Publikation veröffentlicht (Notter et al. 2010). Diese wird im ecoinvent Datenbestand v2.2 zur Modellierung einer prismatischen Li-Ionen Batterie verwendet. Die Bilanz ist aktuell und vollständig bezüglich der Gewinnung und Aufbereitung von Lithium. Die Bilanz der Batterieherstellung beruht auf einem neuen, zukünftigen Verfahren. Die Energie- und Stoffflüsse basieren auf Expertenschätzungen, welchen physikalische Gesetzmässigkeiten zugrunde liegen (Strombedarf zum Pumpen von Flüssigkeiten, Wärmebedarf zum Verdampfen von Wasser). Die spezifischen Energiebedarfe sind sehr tief (siehe auch Anhang S. 87).

Eine weitere Ökobilanz zu Lithium-Ionen Batterien, erstellt durch ESU-services, basiert auf einem Umweltbericht eines japanischen Herstellers (Maxell 2003). Dieser stellt neben Batterien auch CD-Rohlinge, Linsen, Tapes und Silberbatterien her. In diesem Umweltbericht ist ausgewiesen, welcher Anteil der Einnahmen des betreffenden Standorts auf Batterien entfällt. Mit Angaben zum Einzelverkaufspreis und zum Gewicht von Laptop-Batterien und einer Expertenschätzung zu den Bruttomargen auf Computerzubehör kann das Produktionsvolumen (in Tonnen) des Standorts abgeschätzt werden. Die Aufwendungen und Emissionen am Standort können so auf die Produktionsmenge in Tonnen umgelegt werden.



#### 4. Ökobilanzen Komponenten

In einem dritten Ansatz werden die Ausgaben für Batterien in einer ökologisch erweiterten Input-Output-Bilanz der USA (Suh 2010) eingesetzt<sup>6</sup>. Die Ausgabe (US-\$ 17.2 pro kg Batterie) wird im Sektor „Storage batteries“ getätigt. Daraus lässt sich die Umweltintensität einer in den USA hergestellten (unspezifischen) wieder aufladbaren Batterie abschätzen. Dieser Ansatz dient zur Plausibilisierung der vorliegenden prozessbasierten Ökobilanzen.

Zum Vergleich sind auch die Ökobilanz-Ergebnisse der Herstellung einer Nickel-Metallhydrid-Batterie gezeigt, wie sie im ecoinvent Datenbestand v2.2 modelliert ist.

Die Hauptunterschiede im Primärenergieaufwand, in den Treibhausgas-Emissionen und im radioaktiven Abfall der Li-Ion-Batterien sind im Wesentlichen auf den grossen Unterschied im zugrunde gelegten spezifischen Strom- und Wärmebedarf bei der Batterieherstellung zurückzuführen<sup>7</sup>. Die unterschiedliche Rohstoffzusammensetzung der Batterien in den zitierten Ökobilanzen spielt hingegen bezüglich der vorgenannten Indikatoren kaum eine Rolle. Die ähnlich hohe Gesamtumweltbelastung ist durch zwei gegenläufige Effekte bedingt. Einerseits ist im ecoinvent Datensatz der spezifische Energieaufwand in der Batterieherstellung deutlich tiefer. Andererseits wird dies durch einen deutlich höheren Kupfergehalt der in ecoinvent modellierten Batterie und den mit der Kupferherstellung insbesondere in Südamerika verursachten höheren Umweltbelastung kompensiert. In der Input-Output Tabelle der USA werden radioaktive Abfälle nicht quantifiziert, weshalb hier ein Nullwert ausgewiesen wird.

Die Bilanz der NiMH Batterie ist geprägt durch hohe Umweltbelastungen bei der Gewinnung von Nickel beziehungsweise die Treibhausgas-Emissionen bei der Gewinnung von Mischmetall, der Herstellung der Trennfolien (aus Teflon) und der Gewinnung von Nickel. Auch beim kumulierten Energieaufwand sind die genannten Prozesse von Bedeutung.

Tabelle 4 Kumulierter Energieaufwand (erneuerbar, nicht erneuerbar), Treibhausgas-Emissionen, Umweltbelastung (Methode der ökologischen Knappheit 2006), und radioaktive Abfälle der Herstellung von 1 kg Lithium-Ionen Batterie beziehungsweise 1 kg NiMH Batterie gemäss verschiedenen Studien

|        |                             | KEA er-<br>neuerbar | KEA nicht<br>erneuerbar | Treibhaus-<br>gase     | radioak-<br>tive Ab-<br>fälle | Umweltbe-<br>lastung |
|--------|-----------------------------|---------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------------|----------------------|
|        |                             | MJ Öl-eq            | MJ Öl-eq                | kg CO <sub>2</sub> -eq | mm <sup>3</sup>               | UBP'06               |
| Li-Ion | ecoinvent Datenbestand v2.2 | 8                   | 101                     | 5.8                    | 15.6                          | 17'800               |
| Li-Ion | ESU-services                | 13                  | 252                     | 17.1                   | 23.3                          | 17'500               |
| Li-Ion | Input-Output (USA)          | 0                   | 267                     | 17.8                   | 0                             | 32'300               |
| NiMH   | ecoinvent Datenbestand v2.2 | 25                  | 236                     | 18.3                   | 43.3                          | 39'000               |

In ihrer Publikation über die Ökobilanz von Fahrzeug-Batterien kommen Ishihara et al. (2002) zum Schluss, dass die Treibhausgas-Emissionen pro kWh Batteriekapazität bei Li-Ionen-Batterien bei rund 75 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh und der kumulierte Energieaufwand bei 1'500 MJ/kWh liegt. Die Werte der ebenfalls untersuchten NiMH-Batterie liegen im selben Bereich. Bei einer Energiedichte von 130 Wh pro kg für Li-Ionen-Batterien resultieren spezifische Treibhausgas-Emissionen in der Höhe von knapp 10 kg CO<sub>2</sub>-eq beziehungsweise knapp 200 MJ

<sup>6</sup> In einer ökologisch erweiterten Input-Output-Bilanz sind einerseits die Verflechtungen der Wirtschaftssektoren eines Landes und andererseits die Umweltintensität der einzelnen Sektoren pro Wertschöpfung (beispielsweise kg CO<sub>2</sub> pro US-Dollar) abgebildet. Mit der Input-Output-Bilanz kann man die (direkten und indirekten) Umweltauswirkungen einer Ausgabe (beispielsweise 1'000 US-Dollar) in einem spezifischen Sektor (beispielsweise „storage batteries“) ermitteln.

<sup>7</sup> In beiden Bilanzen wird eine Herstellung in China angenommen und der chinesische Strommix zugrunde gelegt.

Primärenergie pro kg Batterie. Zackrisson et al. (2010) bilanzieren zwei verschiedene Verfahren zur Herstellung einer Li-Ionen-Batterie. Die Treibhausgas-Emissionen liegen bei 15.5 kg CO<sub>2</sub>-eq und rund 25 kg CO<sub>2</sub>-eq pro kg Batterie (Wasser beziehungsweise N-methyl-2-pyrrolidone als Lösungsmittel). In Duleep et al. (2011) werden Ergebnisse weiterer Bilanzen publiziert. Die dort zusätzlich gezeigten Werte schwanken zwischen rund 12 kg CO<sub>2</sub>-eq und rund 25 kg CO<sub>2</sub>-eq pro kg Batterie. Der ebenfalls gezeigte Wert von Notter et al. (Notter et al. 2010) liegt um rund 50 % unter dem nächsthöheren Wert beziehungsweise 80 % unter dem in der Publikation gezeigten Höchstwert.

Die hier diskutierten Veröffentlichungen bestärken die Vermutung, dass in der Empa-Publikation deutlich zu tiefe Treibhausgas-Emissionen ausgewiesen werden.

### 4.3 Ökobilanzen zur Herstellung von Fahrzeugbatterien

#### 4.3.1 Abschätzung der spezifischen Umweltbelastung

Ausgehend von den im vorgehenden Unterkapitel 4.2 gezeigten Ergebnissen lässt sich die Umweltbelastung von Batterien, wie sie in aktuell angebotenen Fahrzeugen eingebaut sind, abschätzen. Die Informationen zu den Gewichten der Batterien stammen aus den technischen Datenblättern der Hersteller oder, im Falle des VW E-Golf, aus einem Zeitungsartikel (z.B. Bartsch 2010).

Die in Tabelle 5 gezeigten Werte wurden errechnet durch Multiplikation des Batteriegewichts mit den Kennwerten der Batterie gemäss Bilanz ESU-services aus Tabelle 4.

Mit Batteriegewichten zwischen rund 150 und 450 kg verursacht die Herstellung der Li-Ionen-Batterie für reine Elektrofahrzeuge Treibhausgas-Emissionen zwischen knapp 2.6 und 7.7 Tonnen CO<sub>2</sub>-eq. Werden die tieferen Batterie-Kennwerte gemässecoinvent Datenbestand v2.2 eingesetzt, sind es zwischen 300 kg und 2.6 Tonnen CO<sub>2</sub>-eq. Bei den Serienfahrzeugen Smart electric drive, Mitsubishi i-MiEV und Opel Ampera liegen die Herstellungsemissionen bei rund 2.5 bis 3 Tonnen CO<sub>2</sub>-eq (beziehungsweise 870 kg bis gut 1'000 kg CO<sub>2</sub>-eq bei Anwendung der tieferen Batterie-Kennwerte).

Tabelle 5 Kumulierter Energieaufwand erneuerbar und nicht erneuerbar, Treibhausgas-Emissionen, Umweltbelastung (Methode der ökologischen Knappheit 2006) und radioaktive Abfälle der Herstellung von Batterien eingesetzt in ausgewählten Fahrzeugen; Basis Batteriebilanz gemäss ESU-services

|                              | Typ      | Batterie-gewicht | KEA erneuerbar | KEA nicht erneuerbar | Treibhausgase          | radioaktive Abfälle | Umweltbelastung |
|------------------------------|----------|------------------|----------------|----------------------|------------------------|---------------------|-----------------|
|                              |          | kg               | MJ Öl-eq       | MJ Öl-eq             | kg CO <sub>2</sub> -eq | mm <sup>3</sup>     | UBP'06          |
| Mitsubishi i-MiEV            | Li-Ionen | 160              | 2020           | 40300                | 2740                   | 3730                | 2'800'000       |
| Smart electric drive         | Li-Ionen | 150              | 1890           | 37800                | 2560                   | 3490                | 2'630'000       |
| Toyota Prius Hybrid          | NiMH     | 39               | 490            | 9800                 | 670                    | 910                 | 683'000         |
| Toyota Prius Plug-In         | Li-Ionen | 52 <sup>1</sup>  | 660            | 13100                | 890                    | 1210                | 911'000         |
| Opel Ampera                  | Li-Ionen | 180              | 2270           | 45400                | 3080                   | 4190                | 3'150'000       |
| Pininfarina Bluecar          | LiMP     | 300              | 3780           | 75600                | 5130                   | 6990                | 5'260'000       |
| Tesla Roadster               | Li-Ionen | 450              | 5670           | 113500               | 7700                   | 10480               | 7'880'000       |
| Protoscar LAMPO <sup>2</sup> | Li-Ionen | 280              | 3530           | 70600                | 4790                   | 6520                | 4'910'000       |
| VW E-Golf                    | Li-Ionen | 315              | 3970           | 79400                | 5390                   | 7340                | 5'520'000       |

<sup>1</sup>: Annahme Energiedichte 100 Wh/kg

### 4.3.2 Vergleich mit Emissionen des Benzinbedarfs

Die vorgehend abgeschätzten Treibhausgas-Emissionen für die Herstellung von Batterien für reine Elektrofahrzeuge entsprechen den Emissionen eines Benzinbedarfs zwischen 300 bis 2'500 Litern (beziehungsweise zwischen 100 und 870 Litern)<sup>8</sup>. Die spezifischen Treibhausgas-Emissionen der Benzin-Bereitstellung und Nutzung gemäss ecoinvent Datenbestand v2.2 betragen 2.98 kg CO<sub>2</sub>-eq pro Liter.

Somit entsprechen die Emissionen für die Batterieherstellung einer Fahrleistung von 7'000 bis 58'000 Kilometer mit einem modernen Benzinfahrzeug (oder 2'300 bis 20'000 km; Referenzfahrzeug Toyota IQ 1.0 ECO mit 4.3 Litern pro 100 km). Für die im Smart electric drive, Mitsubishi i-MiEV und Opel Ampera eingebaute Batterie liegen die entsprechenden Werte zwischen 840 und 1'000 (beziehungsweise 290 bis 335) Litern Benzin was einer Reichweite von 19'500 bis 23'000 km (beziehungsweise 6'800 bis 7'800 km) entspricht. Die durchschnittliche jährliche Fahrleistung eines Personenwagens in der Schweiz liegt bei 12'000 km.<sup>9</sup>

### 4.4 Wissenslücken Ökobilanzen Batterien

Jede der vorgängig beschriebenen Bilanzen hat ihre Vor- und Nachteile. Während die Bilanz von Notter et al. (2010) die Gewinnungs- und Verarbeitungsprozesse von Lithium detailliert modelliert und quantifiziert, basiert die Bilanz von ESU-services auf realen Produktionsdaten eines Herstellers.

Die Input-Output basierte Bilanz wird zur Plausibilisierung der beiden Ökobilanzen verwendet und gibt einen Hinweis auf die Grössenordnung insbesondere der Klimagas-Emissionen aus der Herstellung einer Batterie in den USA. Weitere aktuelle Ökobilanzstudien lassen ebenfalls vermuten, dass die Klimabilanz der Batterieherstellung deutlich höher liegt als in Notter et al. (2010) ausgewiesen.

Schwachpunkte der Bilanzen sind die theoretische Modellierung der Batterieherstellung in Notter et al. (2010), die Unsicherheit in den Abschätzungen zur Ermittlung der spezifischen Aufwendungen pro kg Batterie (ökonomische Allokation) und die Tatsache, dass es sich um einen Hersteller von Laptop-Batterien und anderen elektronischen Gütern handelt in der Bilanz von ESU-services sowie die Eignung des Sektors „Storage batteries“, das Preisniveau pro kg Batterie und die Aktualität der Input-Output-Tabelle in der Input-Output-basierten Modellierung.

Aufgrund der derzeit noch hohen Kosten der Batterien und dem Argument, dass hohe Kosten ein Indiz für einen tendenziell anspruchsvollen und hohen Fertigungsaufwand sind, und aufgrund der Ergebnisse anderer Ökobilanzarbeiten, gehen wir davon aus, dass die Umweltauswirkungen eher im oberen Bereich der in Tabelle 4 aufgeführten Werte liegen. Bei Batterien für Elektroautos gibt es sicherlich noch Entwicklungspotenzial. Allerdings kann man in absehbarer Zukunft gemäss Aussagen von Herstellern nicht mit Technologiesprüngen rechnen<sup>10</sup>.

Für den Vergleich der Umweltbelastung des Autofahrens mit Batterieantrieb einerseits und mit Benzin- oder Dieselmotoren andererseits ist die im realen Fahrbetrieb erreichbare Lebensdauer der Batterien ein weiterer wichtiger Parameter. Dazu fehlen heute noch praktische Langzeiterfahrungen.

---

<sup>8</sup> In diesem Abschnitt beziehen sich die Werte in Klammern auf die Abschätzung auf Basis der tieferen Batterie-Kennwerte gemäss ecoinvent Datenbestand v2.2.

<sup>9</sup> <http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/11.html>, Zugriff am 19.01.2011.

<sup>10</sup> Aussage von B. Richter, Leclanché, am 4. Treffen der Interessensvereinigung „Vehicle to Grid“, 23. Oktober 2009, Bern

## 5 Verbrauchsmessung und Realverbrauch bei Elektrofahrzeugen

Der Verbrauch von Elektrofahrzeugen wird gemäss dem UN/ECE Reglement 101 gemessen. Der Stromverbrauch von reinen Elektrofahrzeugen wird ermittelt, indem der NEFZ mit einem vollen Akku als Ausgangszustand gefahren wird. Nach dem Fahrzyklus wird die Batterie wieder vollständig aufgeladen und die dafür nötige elektrische Leistung gemessen.

Bei Elektrofahrzeugen unterscheiden sich die Daten des NEFZ tendenziell noch stärker vom realen Verbrauch als bei herkömmlichen Fahrzeugen. Beim NEFZ wird der Verbrauch durch Klimaanlage, Heizung und elektrische Zusatzausstattung wie Musikanlagen nicht gemessen. Beim Elektrofahrzeug kann der Strom für die Nebenverbräuche direkt von der Batterie abgezogen werden, was mit einer höheren Effizienz verbunden ist als beim herkömmlichen Fahrzeugen, bei denen der Strom mittels der Lichtmaschine mit einem schlechten Wirkungsgrad erzeugt wird. Im Gegensatz zu den herkömmlichen Fahrzeugen, die mit Abwärme heizen können, brauchen Elektrofahrzeuge aber zusätzliche Energie für die Heizung, was im Winter einen erheblichen Einfluss auf den Verbrauch haben kann, sofern sie nicht mit einem separaten Verbrennungsaggregat zur Wärmegewinnung ausgerüstet sind. Zudem wird eine mögliche Selbstentladung der Batterie von Elektrofahrzeugen im NEFZ nicht gemessen. Ein kürzlich vom TCS durchgeführter Test mit dem Think (Meier 2010) hat gezeigt, dass der Testverbrauch gegenüber dem Normverbrauch gemäss NEFZ um rund 136 % höher lag (28.3 im Vergleich zu 12 kWh/100 km). Die im Think eingesetzte Zebra-Batterie ist keine Li-Ionen-Batterie. Deshalb sind diese Testergebnisse nicht direkt übertragbar. Trotzdem ist es ein Indiz dafür, dass Normverbrauch und Realwerte bei Elektroautos deutlich voneinander abweichen können. Die Auto-Umweltliste 2011 des VCS rechnet mit einem Faktor 1.7 zwischen Verbrauch gemäss NEFZ und Strombedarf im Alltag (VCS 2011). Die Empa Ökobilanz rechnet mit einem Zuschlag von etwa 65 % auf den NEFZ Messwert (Althaus & Gauch 2010).

Bei Elektrofahrzeuge gibt es zudem weitere Unterschiede zwischen dem Energieverbrauch im Realbetrieb und dem NEFZ, die auf die Batterieperformance zurückzuführen sind. Die Batterieperformance wird sowohl durch Herstellungsunterschiede der Batterien als auch durch die Verschlechterung der Ladekapazität durch den Gebrauch beeinflusst. Die Batterieladekapazität verschlechtert sich je nach Batteriemangement durch die Art und Anzahl der Ladevorgänge und nimmt mit dem Alter der Batterie ab. Zudem können die Zellen einer Batterie unterschiedlich altern und mit der Zeit unterschiedliche Kapazitäten aufweisen. Dadurch braucht es mit fortschreitendem Alter der Batterie immer mehr Energie, die dazu gebraucht wird, um die verschiedenen Zellen mit unterschiedlichen Kapazitäten ganz aufzuladen.

Es ist davon auszugehen, dass die Verbrauchsmessung bei Elektrofahrzeugen im Rahmen der Entwicklung eines weltweit harmonisierten Messzyklus den Realverbrauch in Zukunft umfassender und in mit konventionellen Antrieben besser vergleichbarer Form abbilden wird. Bis dahin muss mit einem Korrekturfaktor gerechnet werden, wenn die Messwerte aus dem NEFZ zur Berechnung des Realverbrauchs von Elektrofahrzeugen verwendet werden.

## 6 Plug-In Hybrid Fahrzeuge

Zwischen den reinen Elektrofahrzeugen und den Hybriden stehen die sogenannten Plug-In Hybride. Diese können mit herkömmlichem Treibstoff betankt werden und rekuperieren Energie aus Bremsvorgängen. Zusätzlich kann ihre Batterie aber auch über das Stromnetz

aufgeladen werden. Plug-In Hybride vereinen die Vorzüge von beiden Konzepten. Zum einen verfügen sie über genügend grosse Reichweiten aufgrund des Betriebs mit herkömmlichem Treibstoff. Zum anderen sind es Fahrzeuge, die auf kurzen Strecken rein elektrisch und ohne direkten Emissionsausstoss vor Ort fahren. Es ist wahrscheinlich, dass vor der Einführung von reinen Elektrofahrzeugen im grossen Stil eine beachtliche Anzahl von Plug-In Hybriden verkehren werden.

Unter fahrzeugtechnischen Gesichtspunkten wird unterschieden zwischen Plug-In Hybriden (paralleler oder serieller Hybrid oder Mischformen) und Elektrofahrzeugen mit Range Extender (serieller Hybrid). Letztere verfügen wie ein paralleler Hybrid über einen Verbrennungsmotor, doch wirkt dessen Drehmoment nicht mechanisch auf die Räder, sondern treibt einen Stromgenerator an. Welches Konzept im Einzelfall gewählt wird, hängt von der angestrebten Reichweite und dem realisierbaren Fahrzeuggewicht ab. In diesem Argumentarium wird im Folgenden auf diese Unterscheidung verzichtet, weil die unterschiedlichen Bauweisen in der ökologischen Bewertung mit den Parametern Batteriegewicht, Fahrzeuggewicht und Energieverbrauch abgebildet werden können.

Schlüsse aus der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen können qualitativ auf Plug-In Hybride übertragen werden. In ihrer Umweltbilanz liegen sie, gleiche Fahrzeugklasse vorausgesetzt, zwischen den Elektrofahrzeugen und den verbrauchsoptimierten Dieselfahrzeugen. Die Umweltbelastung aus der Batterieherstellung fällt kleiner aus, da in der Regel kleinere Batterieeinheiten verwendet werden können als bei reinen Elektrofahrzeugen. Andererseits ist der spezifische Treibstoff-Verbrauch in der Tendenz höher, da infolge zusätzlich benötigter Komponenten (Benzin und Elektromotor, Batterie) das Fahrzeug-Gesamtgewicht höher ist. Für eine Ermittlung der Umweltbilanz von Plug-In Hybrid Fahrzeugen im Realbetrieb müssen aber unbedingt die Verbrauchswerte unter Alltagsbedingungen bekannt sein.

Aus der Häufigkeitsverteilung der durchschnittlichen Fahrleistung lässt sich abschätzen, wie gross bei Plug-In-Hybrid Fahrzeugen im Durchschnitt der elektrische Anteil der zurückgelegten Strecken sein dürfte.<sup>11</sup> Die Fahrleistung setzt sich je zur Hälfte aus Strecken kürzer als 30 km und Strecken länger als 30 km zusammen (siehe Abbildung 1). Bei diesem Punkt (30 km, 50 % der Fahrleistung) beginnt die Häufigkeitskurve der Fahrleistung deutlich abzufallen. Das Abdecken grösserer Reichweiten mit rein elektrischem Betrieb wird ab 30 km Reichweite überdurchschnittlich aufwändig. Für eine Reichweite im Elektrobetrieb von 30 km wird bei einem Stromverbrauch von 20 kWh/100 km eine Batterie mit einer Kapazität von 6 bis 8 kWh oder 50 bis 60 kg Gewicht benötigt.

Der Opel Ampera<sup>12</sup> beispielsweise verfügt über eine 180 kg schwere Batterie, die gemäss Werksangaben für eine Reichweite von 40 bis 80 km ausgelegt ist. Somit könnten wohl im Durchschnitt zwei Drittel der Fahrleistung elektrisch erbracht werden<sup>13</sup>. Das Fahrzeug ist ca. 250 kg schwerer als ein vergleichbares konventionelles Fahrzeug<sup>14</sup>. Dies erhöht den Kraftstoffbedarf um etwa 0.9 Liter Benzin auf 100 km (Helms & Lambrecht 2007). Der Kraftstoff-

---

<sup>11</sup> Diese Durchschnittsverteilung wird angenommen, auch wenn man davon ausgehen kann, dass mit Elektrofahrzeugen vorwiegend kurze Strecken zurückgelegt werden.

<sup>12</sup> Der Opel Ampera (und der Chevrolet Volt) ist ein serieller Plug-In Hybrid, ein Elektroauto mit sogenanntem Range-Extender. Er besitzt eine eher grosse Batterie und einen benzingetriebenen Generator, der zur Erweiterung der Reichweite genutzt wird. Der Opel Ampera ist mit einem grossen Benzinmotor ausgerüstet und damit zwar nicht ein typischer Vertreter der Plug-In Hybrid Fahrzeuge mit Range Extender. Allerdings ist der Opel Ampera das erste serienmässig hergestellte Modell dieses Typs.

<sup>13</sup> Rund 70 % der Fahrleistung eines Pkw wird mit Fahrten kürzer als 60 km erbracht.

<sup>14</sup> <http://www.autobild.de/artikel/test-opel-ampera-867203.html>, Zugriff am 22. Februar 2011

Bedarf bei leerer Batterie soll gemäss Werksangabe bei 4.8 Litern Benzin auf 100 km liegen<sup>15</sup>.

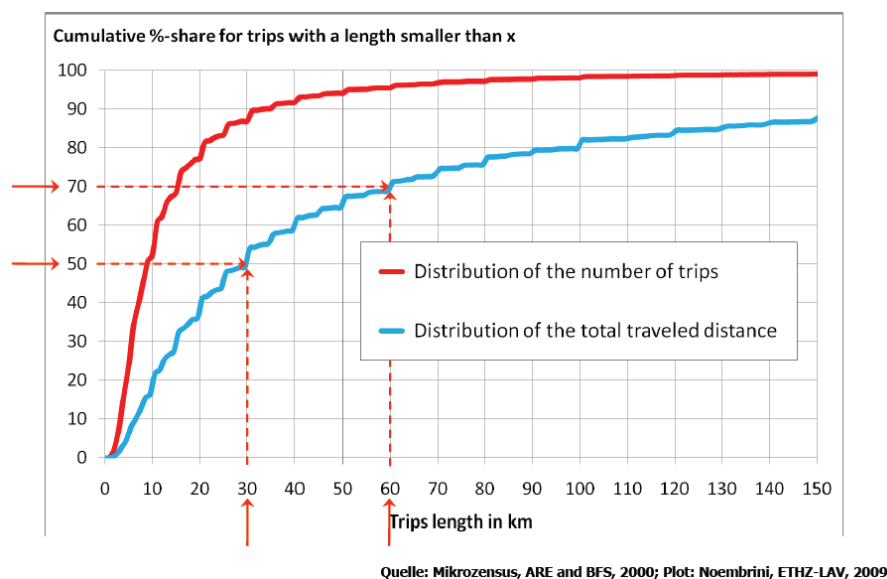


Abbildung 1 Häufigkeitsverteilung der Anzahl Pkw-Fahrten (rot) und der damit erbrachten Fahrleistung (blau), Quelle: Boulouchos 2011

Die Li-Ionen-Batterie des Toyota Prius Plug-In hat eine Kapazität von 5.2 kWh mit einer Reichweite von ca. 20 km<sup>16</sup>. Dieses Fahrzeug könnte somit durchschnittlich rund 30 % der Fahrleistung im reinen Elektrobetrieb zurücklegen. Der spezifische Bedarf an Batterienkapazität (und damit auch Batterie-Mehrgewicht) pro km Fahrleistung im reinen Elektrobetrieb ist also beim Toyota Prius Plug-In Hybrid deutlich günstiger als beim Opel Ampera.

## 7 Vergleich Ökobilanz Elektroauto mit fossil betriebenen Fahrzeugen

### 7.1 Basisvariante

Die nachstehend gezeigten Bilanzen basieren mit Ausnahme der Batterieherstellung und der Modellierung des sparsamsten und des meistverkauften Autos der Golfklasse auf den Daten des ecoinvent Datenbestands v2.2. Die übrigen Fahrzeuge basieren auf den ecoinvent Datensätzen zu Euro 5 Fahrzeugen (Diesel beziehungsweise Benzin), bei denen Treibstoffbedarf und Emissionen an die Werte der hier bilanzierten Fahrzeuge angepasst wurden. Das im ecoinvent Datenbestand v2.2 modellierte Elektroauto hat im Realbetrieb einen spezifischen Strombedarf von 20 kWh/100 km. Dieser Wert stimmt gut mit dem in der Empa Studie verwendeten überein (Althaus & Gauch 2010). Das Auto ist mit einem Satz Lithium-Ionen-Batterien mit einem Gewicht von 312 kg bestückt, der einmal während der Nutzungsdauer des Autos (150'000 km) ersetzt werden muss<sup>17</sup>. Unter Berücksichtigung von Garantien von Autoherstel-

<sup>15</sup> <http://auto-presse.de/autonews.php?action=view&newsid=33742>, Zugriff am 22. Februar 2011

<sup>16</sup> [http://www.toyota.at/innovation/design/concept\\_cars/prius\\_plugin/index.aspx](http://www.toyota.at/innovation/design/concept_cars/prius_plugin/index.aspx), Zugriff am 22. Februar 2011

<sup>17</sup> Diese Annahme ist zentral für die Höhe der Ergebnisse der Ökobilanz. Mitsubishi gibt beispielsweise eine Garantie auf die Batterie von 5 Jahren oder 100'000 km. Im Durchschnitt legt ein Pkw in 5 Jahren 60'000 km

lern wird angenommen, dass während der Nutzungsdauer des Autos zwei komplette Batteriensätze benötigt werden. Neben Durchschnittsfahrzeugen und Autos der unteren Mittelklasse (Golf-Klasse) werden auch Ergebnisse der Ökobilanz von Leichtbaufahrzeugen (City car) gezeigt, welche entweder mit Diesel oder mit Strom angetrieben werden können. Bei diesem Fahrzeug handelt es sich um eine Konzeptstudie, die für Benzin-, Diesel- und Elektromotor ausgelegt ist.<sup>18</sup> Bei den Golf Klasse Fahrzeugen (einerseits das verbrauchsärmste, andererseits das am meisten verkaufte Fahrzeug) wurde auf Basis von Höpfner et al. (2009) der Treibstoff-Normverbrauch um einen Realsituations-Zuschlag von 20 % erhöht.

Als Strommix wird der an Schweizer Steckdosen gelieferte Strom eingesetzt (Konsummix (exklusive zertifizierte Anteile), siehe Tabelle 2, in diesem Kapitel als „Strommix CH“ bezeichnet). Es werden der kumulierte nicht erneuerbare Energieaufwand, die Treibhausgas-Emissionen (IPCC 2007), die Umweltbelastung (bewertet mit der Methode der ökologischen Knappheit 2006, Frischknecht et al. 2008) und die Erzeugung radioaktiver Abfälle verglichen. Die Ergebnisse sind bezogen auf Personenkilometer (pkm). Dadurch können die Ergebnisse mit denjenigen von anderen Verkehrsmitteln, wie beispielsweise der Bahn, verglichen werden. Durch Multiplikation der Ergebnisse mit 1.6 erhält man die Ergebnisse pro Fahrzeugkilometer.

Pro Fahrzeugkilometer emittiert der Flottenmix der Dieselaautos ohne Partikelfilter knapp 24 mg Dieseleruss, der Flottenmix der Dieselaautos mit geregelter Partikelfilter rund 0.04 mg Dieseleruss und der Golf BlueMotion (mit geregelter Partikelfilter) rund 0.01 mg Dieseleruss<sup>19</sup>. Dieseleruss wird in der Methode der ökologischen Knappheit 2006 mit einem deutlich höheren Ökofaktor gewichtet als PM10 Emissionen (17'000 UBP/g Dieseleruss im Vergleich zu 150 UBP/g PM10).

Der Vergleich der Ökobilanz-Ergebnisse von Elektroautos, Diesel-, Benzin- und Erdgasfahrzeugen zeigt, dass die Treibhausgas-Emissionen des heute durchschnittlichen in Betrieb stehenden fossil betriebenen Fahrzeugs deutlich höher liegen als diejenigen eines Elektroautos der Golf-Klasse (165 bis 198 Gramm pro pkm im Vergleich zu 96 Gramm pro pkm). Die Differenz bezüglich kumuliertem Energieaufwand nicht erneuerbar ist hingegen deutlich geringer (3.0 bis 3.3 MJ Öl-eq pro pkm im Vergleich zu 2.7 MJ Öl-eq pro pkm). Die Gesamtumweltbelastung ermittelt mit der Methode der ökologischen Knappheit 2006 liegt beim Elektrofahrzeug leicht höher als beim Erdgas-Auto, aber deutlich tiefer als beim Flottenmix der Diesel- und Benzinautos. Die Erzeugung radioaktiver Abfälle pro pkm ist beim Elektroauto am höchsten. Das sparsamste Dieselaauto emittiert rund 30 % mehr Treibhausgase als das mit Schweizer Strom („Strommix CH“) betriebene Elektroauto, verursacht aber eine um knapp 32 % tiefere Umweltbelastung und benötigt gut 18 % weniger nicht erneuerbare Primärenergie. Der meist verkaufte Golf (ein Benziner) verursacht knapp 80 % höhere Treibhausgas-Emissionen als das Elektroauto und benötigt 8 % mehr nicht erneuerbare Primärenergie. Die Umweltbelastung dieses Autos ist mit derjenigen des Elektroautos vergleichbar.

---

zurück, was unterhalb der hier angenommenen Lebensleistung einer Batterie liegt. Auch die ecoinvent Datensätze zu Elektroautos und mobitool gehen von 2 Batterien während der gesamten Nutzungsdauer des Pkw aus.

Die durchschnittliche Fahrleistung von 150'000 km wird verwendet, auch wenn mit Elektroautos vorwiegend kurze Strecken zurückgelegt werden. Eine tiefere Lebensfahrleistung erhöht die Bedeutung der Fahrzeugherstellung an der Umweltbelastung pro gefahrener Kilometer.

<sup>18</sup> <http://www.loremo.com/>, Technische Informationen zu Loremo LS, Loremo GT und Loremo EV, Zugriff am 25.01.2010

<sup>19</sup> Dieseleruss in den Abgasen von Personenwagen mit Dieselmotor - Ergänzung zum Datensatz in ecoinvent data v2.2 (File PMDR-Bewertung für Diesel-Pw\_v1.xlsx, Bafu, März 2011).

## 7. Vergleich Ökobilanz Elektroauto mit fossil betriebenen Fahrzeugen

Tabelle 6 Kumulierter Energieaufwand (erneuerbar, nicht erneuerbar), Treibhausgas-Emissionen, Umweltbelastung (Methode der ökologischen Knappheit 2006) und radioaktive Abfälle pro pkm mit verschiedenen Personenwagen

|   | Verbrauch                      | KEA, erneuerbar | KEA, nicht erneuerbar | Treibhausgas          | Umweltbelastung | radioaktive Abfälle |
|---|--------------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------|---------------------|
|   | pro 100 km                     | MJ Öl-eq        | MJ Öl-eq              | g CO <sub>2</sub> -eq | UBP'06          | mm <sup>3</sup>     |
| Diesel, Flottendurchschnitt               | 6.9 Liter <sup>2</sup>         | 0.08            | 2.98                  | 177                   | 272             | 0.30                |
| Benzin, Flottendurchschnitt               | 8.7 Liter <sup>2</sup>         | 0.08            | 3.32                  | 198                   | 207             | 0.31                |
| Flottendurchschnitt Schweiz               | -                              | 0.08            | 3.26                  | 194                   | 228             | 0.31                |
| Erdgas, Flottendurchschnitt               | 8 Nm <sup>3</sup> <sup>2</sup> | 0.09            | 3.29                  | 165                   | 140             | 0.35                |
| Diesel, Golf BlueMotion                   | 4.6 Liter <sup>3</sup>         | 0.08            | 2.21                  | 124                   | 111             | 0.30                |
| Benzin, Golf 1.4 TFSI                     | 7.4 Liter <sup>3</sup>         | 0.09            | 2.92                  | 171                   | 159             | 0.31                |
| Elektroauto, CH Strommix <sup>1</sup>     | 20 kWh                         | 0.29            | 2.71                  | 96                    | 163             | 1.10                |
| Diesel, cityCar, Euro5                    | 2 Liter <sup>4</sup>           | 0.03            | 0.94                  | 53                    | 49              | 0.12                |
| Elektro cityCar, CH Strommix <sup>1</sup> | 7 kWh <sup>4</sup>             | 0.10            | 0.93                  | 29                    | 56              | 0.41                |

<sup>1</sup>: Konsummix Schweiz, ohne separat verkaufte zertifizierte Stromprodukte; Diese Modellierung wird in den nachfolgenden Sensitivitätsanalysen als Basisvariante verwendet (jeweils grau hinterlegt).

<sup>2</sup>: Verbrauch gemäss Handbuch für Emissionsfaktoren, HBEFA v2.1 (BUWAL & INFRAS 2004)

<sup>3</sup>: inklusive Realsituations-Zuschlag von 20 % gemäss Informationen aus Höpfner et al. (2009)

<sup>4</sup>: Herstellerangaben, www.loremo.com

Die Treibhausgas-Emissionen treten bei den verschiedenen Fahrzeugen an unterschiedlichen Stellen auf. Während bei den Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor (Diesel, Benzin und Erdgas), die Treibhausgas-Emissionen am Auspuff rund zwei Drittel der Klimawirkung des Autofahrens ausmachen (zwischen 62 und 69 %), stammen die wesentlichen Beiträge zur Klimawirkung des Elektroautos aus der Herstellung der Batterien und des Fahrzeugs (siehe Abbildung 2). Bei der Batterieherstellung ist der Bedarf an Strom und thermischer Energie massgebend für die Höhe der Emissionen beziehungsweise der Umweltbelastung. Bei der Fahrzeugherstellung stammen wesentliche Beiträge vom Energieeinsatz und von der Bereitstellung von Stahl, Kunststoffen und anderen Materialien.

Die Aufwendungen und Emissionen zur Herstellung des Autos und der Batterie werden anteilmässig auf die erwartete Kilometerleistung (Fahrzeug 150'000 km, Batterie: 75'000 km) aufgeteilt. Ebenso werden die Aufwendungen für den Strassenbau entsprechend dem jährlichen Verkehrsaufkommen (ausgedrückt in Brutto-Tonnenkilometern) von Autos und Lastwagen auf einen Fahrzeug- beziehungsweise Personenkilometer umgerechnet. Infolge des deutlich geringeren Fahrzeuggewichts ist deshalb der Anteil Strasseninfrastruktur bei den City-Cars nur halb so gross wie bei den übrigen bilanzierten Autos.

Die hier ermittelten spezifischen Treibhausgas-Emissionen für ein Elektroauto liegen deutlich höher als in Vergleichsstudien. Die PSI-Studie im Auftrag des EKZ (Bauer & Simons 2010)<sup>20</sup> errechnete einen Wert von rund 70 g CO<sub>2</sub>-eq/km, die Empa Studie im Auftrag der AXPO (Althaus & Gauch 2010) einen Wert von umgerechnet 60 g CO<sub>2</sub>-eq/km, jeweils bei Anwendung des Schweizer Strommixes. Der Hauptunterschied liegt in der Bilanzierung der Herstellung der Batterie und in der Batterielebensdauer. In der AXPO Studie liegen andere Daten zur Li-Ionen-Batterie zugrunde und in der PSI-Studie wurde die Zebra-Batterie bilanziert. Unter Verwendung des ecoinvent Datensatzes zur Batterieherstellung resultieren 67 g CO<sub>2</sub>-eq/km (siehe Tabelle 8).

<sup>20</sup> Der Bericht zur Studie ist vertraulich. Ausgewählte Ergebnisse werden gezeigt unter [www.ekz.ch/internet/ekz/de/ueberuns/umwelt/elektromobilitaet/psi/psi\\_ergebnisse.html](http://www.ekz.ch/internet/ekz/de/ueberuns/umwelt/elektromobilitaet/psi/psi_ergebnisse.html)



## 7. Vergleich Ökobilanz Elektroauto mit fossil betriebenen Fahrzeugen

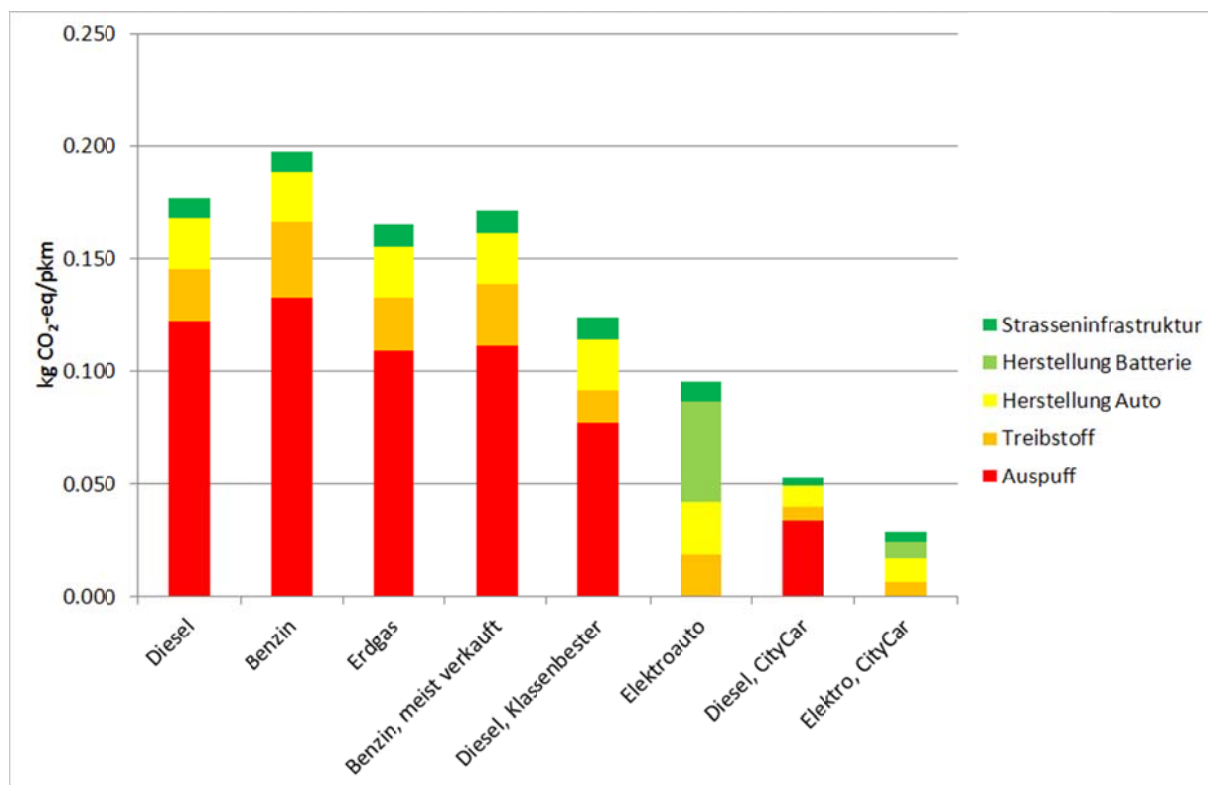


Abbildung 2 Dominanzanalyse der Treibhausgas-Emissionen des Fahrens von 1 pkm mit verschiedenen Personenwagen. Treibstoffverbrauch: Bei „Diesel“, „Benzin“ und „Erdgas“ handelt es sich um den Verbrauch des Flottendurchschnitts gemäss HBEFA v2.1, bei „Benzin, meistverkauft“ und „Diesel, Klassenbester“ um den Realverbrauch bestehender Fahrzeuge, bei „Elektroauto“ um den angenommenen Realverbrauch eines Autos der unteren Mittelklasse.

Die Emissionen am Auspuff der fossil betriebenen Autos sind für rund zwei Drittel und weniger der Gesamtumweltbelastung (ohne Lärm) bewertet mit der Methode der ökologischen Knappheit 2006 verantwortlich (siehe Abbildung 3). Die Treibstoffbereitstellung, die Fahrzeug-Herstellung (inklusive Unterhalt und Entsorgung) sowie die Strasseninfrastruktur steuern namhafte Anteile zur Gesamtbelastung bei. Bei heutigen Elektroautos tragen die Strombereitstellung und die Batterieherstellung mit 35 % respektive 28 % etwa in ähnlichem Umfang zur Gesamtbelastung bei.

## 7. Vergleich Ökobilanz Elektroauto mit fossil betriebenen Fahrzeugen

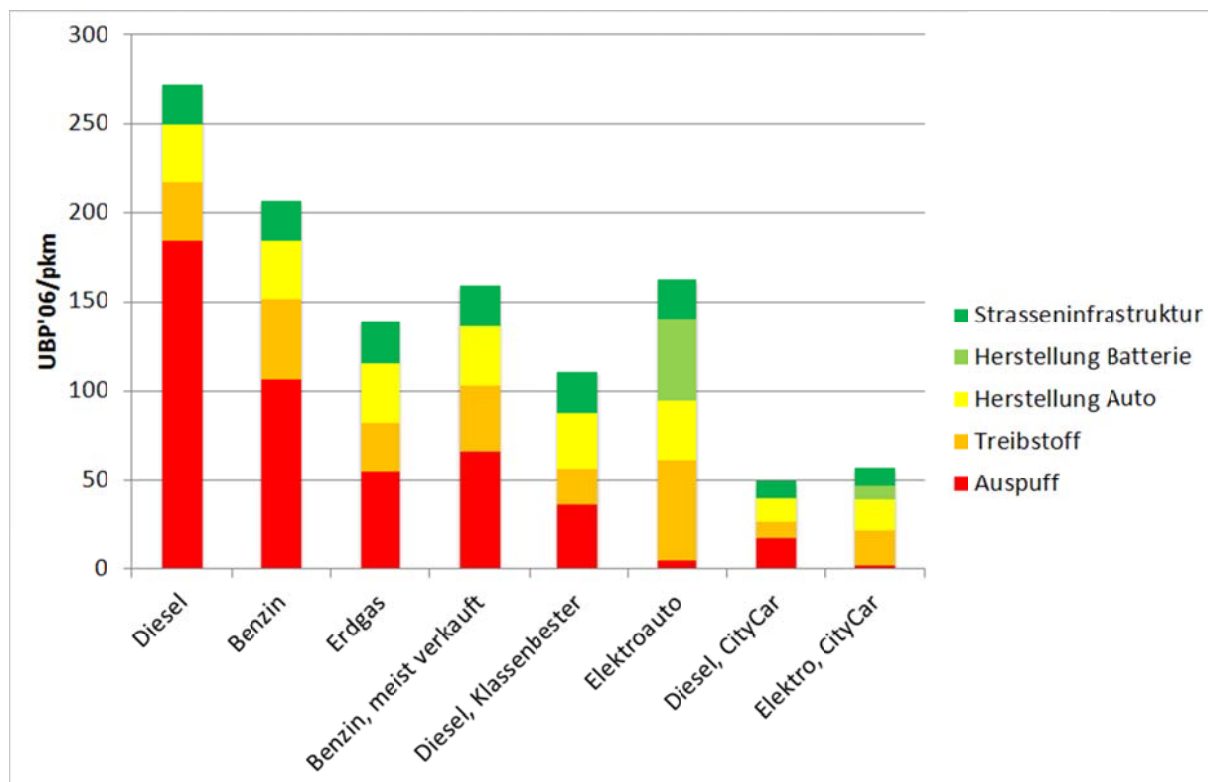


Abbildung 3 Dominanzanalyse der Umweltbelastung (bewertet mit der Methode der ökologischen Knappheit 2006) des Fahrens von 1 pkm mit verschiedenen Personenwagen. Treibstoffverbrauch: Bei „Diesel“, „Benzin“ und „Erdgas“ handelt es sich um den Verbrauch des Flottendurchschnitts gemäss HBEFA v2.1, bei „Benzin, meistverkauft“ und „Diesel, Klassenbester“ um den Realverbrauch bestehender Fahrzeuge, bei „Elektroauto“ um den angenommenen Realverbrauch eines Autos der unteren Mittelklasse.

In Abbildung 4 werden die einzelnen Kategorien (Kompartimente) der Umweltbelastung gezeigt. Für alle Autos steuern die Luftschadstoff-Emissionen den grössten Anteil bei, gefolgt von Emissionen in Oberflächengewässer und dem Verbrauch an Energieressourcen. Bei den Elektroautos sind die Abfälle (hier vor allem radioaktive Abfälle) an zweiter Stelle nach den Luftschadstoffen. Bei den Luftschadstoffen sind vor allem Dieselmotoren (Flottenmix Dieselauto) CO<sub>2</sub> und Stickoxide von Bedeutung. Beim Flottenmix Benzinauto und beim meistverkauften Benzinauto spielt Benzol aufgrund von Emissionen beim Kaltstart und bei der regulären Verbrennung des Benzins eine wichtige Rolle.

## 7. Vergleich Ökobilanz Elektroauto mit fossil betriebenen Fahrzeugen

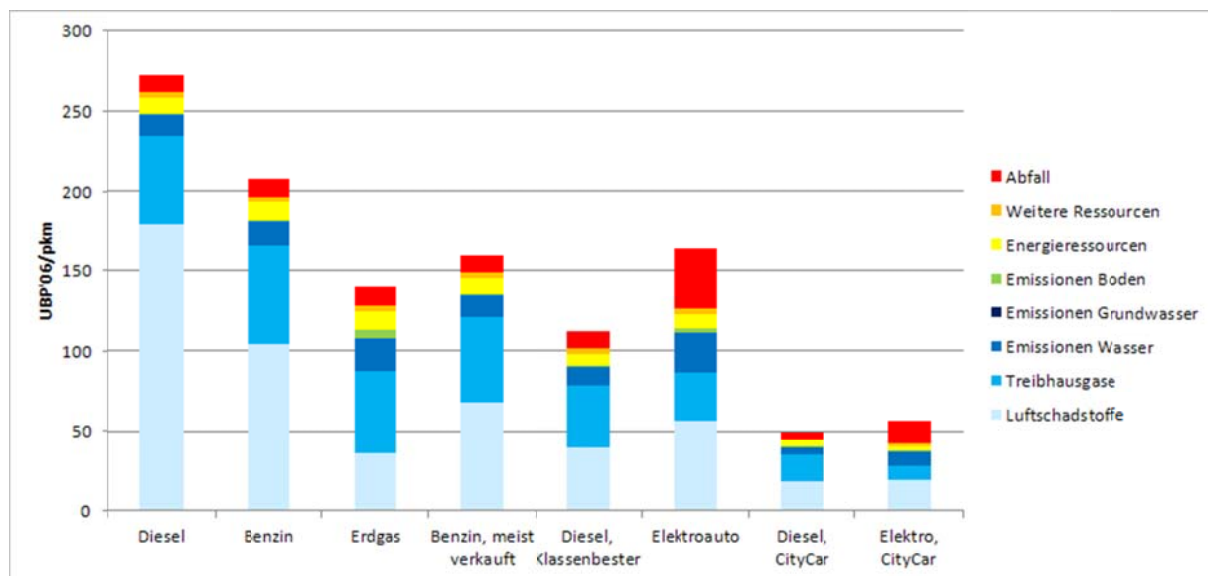


Abbildung 4 Kategorien der Umweltbelastung (bewertet mit der Methode der ökologischen Knappheit 2006) des Fahrens von 1 pkm mit verschiedenen Personenwagen. Treibstoffverbrauch: Bei „Diesel“, „Benzin“ und „Erdgas“ handelt es sich um den Verbrauch des Flottendurchschnitts gemäss HBEFA v2.1, bei „Benzin, meistverkauft“ und „Diesel, Klassenbester“ um den Realverbrauch bestehender Fahrzeuge, bei „Elektroauto“ um den angenommenen Realverbrauch eines Autos der unteren Mittelklasse.

### 7.2 Sensitivitätsanalyse Strommix

Die Strombereitstellung spielt bei der Ökobilanz von Elektrofahrzeugen eine wesentliche Rolle. Es können ein durchschnittlicher Liefermix, Grenzstrommische oder vertraglich vereinbarte Strommische eingesetzt werden (siehe auch Frischknecht & Stucki 2010). Aus diesem Grund werden in diesem Abschnitt die Ergebnisse bei Anwendung der in Kapitel 2 beschriebenen Strommische beziehungsweise Kraftwerkstechnologien gezeigt. Zertifizierter Strom und Strom aus Photovoltaik-, Wind- und Wasserkraftwerken können als vertraglich vereinbarte Strommische gelten. Strom aus Steinkohle-, Gas- und Kernkraftwerken können als Extremszenarien eines Grenzstrommixes interpretiert werden. Für Durchschnittsbetrachtungen stehen die drei Schweizer Strommische und der europäische Strommix zur Verfügung.

Als Basis dient die Batteriebilanz von ESU-services basierend auf dem Umweltbericht der Firma Maxell Corp. Die Treibhausgas-Emissionen liegen zwischen 79 Gramm (zertifizierter Strom; Strom aus Kernkraftwerk) und 232 Gramm CO<sub>2</sub>-eq pro Personenkilometer (Strom aus Steinkohlekraftwerk)<sup>21</sup>. Mit Strom aus erneuerbaren Energien oder aus Kernkraftwerken liegen die Emissionen pro pkm durchwegs unter 100 Gramm CO<sub>2</sub>-eq.

Der nicht erneuerbare kumulierte Energieaufwand liegt zwischen 1.54 (zertifizierter Strom) und 3.36 MJ Öl-eq/pkm (Strom aus Kernkraftwerk). Elektroautos, die mit Strom aus erneuerbaren Energien angetrieben werden, benötigen deutlich weniger als 2 MJ Öl-eq pro pkm.

<sup>21</sup> Gegenüber den Ergebnissen einer Bewertung auf der Basis des Entwurfs der nicht realisierten Umweltetikette für Personenwagen sind die Werte insgesamt höher. Einerseits werden hier Batterie- und Fahrzeugherstellung sowie die Strasseninfrastruktur berücksichtigt (erhöhender Effekt). Andererseits beziehen sich die Ergebnisse auf den Personenkilometer, nicht den Fahrzeugkilometer und der Lärm wird nicht berücksichtigt (reduzierender Effekt).

## 7. Vergleich Ökobilanz Elektroauto mit fossil betriebenen Fahrzeugen

Die Gesamtumweltbelastung eines gefahrenen Personenkilometers variiert zwischen 115 UBP (zertifizierter Strom) und 186 UBP (UCTE Strommix). Angetrieben mit Strom aus erneuerbaren Energien und aus einem Erdgas befeuerten GuD-Kraftwerk verursachen Elektroautos maximal 140 UBP/pkm.

Der Anfall radioaktiver Abfälle ist bei den Strommischen mit Kernenergieanteil erhöht und beim mit Kernkraft betriebenen Elektroauto am höchsten. Strom aus erneuerbaren und fossilen Quellen erzeugt 70 bis 78 % weniger radioaktive Abfälle (bezogen auf den Schweizer Strommix beziehungsweise auf Kernkraft).

Tabelle 7 Kumulierter Energieaufwand, Umweltbelastung (Methode der ökologischen Knappheit 2006), Treibhausgas-Emissionen und radioaktive Abfälle pro pkm mit einem Elektroauto, geladen mit Elektrizität unterschiedlicher Herkunft

|                                     | KEA erneuerbar | KEA, nicht erneuerbar | Treibhausgase         | Umweltbelastung | radioaktive Abfälle |
|-------------------------------------|----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------|---------------------|
| Strom für Elektroauto von ...       | MJ Öl-eq       | MJ Öl-eq              | g CO <sub>2</sub> -eq | UBP'06          | mm <sup>3</sup>     |
| Produktionsmix Schweiz              | 0.40           | 2.32                  | 81                    | 141             | 0.84                |
| Konsummix Schweiz                   | 0.29           | 2.71                  | 96                    | 163             | 1.10                |
| Verbrauchermix BFE 2007             | 0.32           | 2.61                  | 94                    | 159             | 1.03                |
| zertifizierter Strommix             | 0.65           | 1.54                  | 79                    | 115             | 0.34                |
| GuD Kraftwerk                       | 0.11           | 2.57                  | 138                   | 140             | 0.34                |
| Steinkohle Deutschland <sup>1</sup> | 0.12           | 3.32                  | 232                   | 185             | 0.36                |
| Kernkraftwerk Schweiz <sup>1</sup>  | 0.11           | 3.36                  | 79                    | 176             | 1.54                |
| Photovoltaik Schweiz <sup>1</sup>   | 0.67           | 1.70                  | 88                    | 129             | 0.37                |
| Windkraft Schweiz <sup>1</sup>      | 0.65           | 1.57                  | 80                    | 118             | 0.34                |
| UCTE Mix                            | 0.20           | 3.02                  | 151                   | 186             | 0.89                |

<sup>1</sup>: Durchschnitt der in Betrieb stehenden Anlagen.

Würden die CO<sub>2</sub>-Emissionen des von Jakob et al. (2009) modellierten, zukunftsgerichteten Strommixes (Grenzstrommix) anstelle des heutigen Strommixes eingesetzt, so würden die spezifischen Emissionen pro pkm um 20 bis 32 g CO<sub>2</sub>-eq höher liegen. Der von Jakob et al. modellierte Grenzstrommix beinhaltet einen deutlich höheren Anteil an Strom aus fossilen Kraftwerken (siehe auch Unterkapitel 3.1).

### 7.3 Sensitivitätsanalysen Batteriebilanzierung und Lebensdauer

Eine Sensitivitätsanalyse bezüglich der Sachbilanz von Batterien zeigt, dass sich die Ökobilanzen einer Fahrt im Elektroauto insbesondere bezüglich der Treibhausgas-Emissionen unterscheiden. Die Treibhausgas-Emissionen der Ökobilanz unter Verwendung der original ecoinvent Li-Ionen-Batterie-Sachbilanz führt zu Emissionen, die rund 30 % tiefer liegen als diejenigen der Ökobilanz basierend auf Industriedaten beziehungsweise einer Input-Output Modellierung. Wie in Kapitel 4 ausgeführt, erachten wir die Bilanz auf Basis des Umweltberichts eines Batterieherstellers als realitätsnäher. Im Unterkapitel 4.1 werden die wesentlichen Gründe für die Unterschiede in den Batteriebilanzen aufgeführt.

## 7. Vergleich Ökobilanz Elektroauto mit fossil betriebenen Fahrzeugen

Tabelle 8 Kumulierter Energieaufwand (KEA) erneuerbar und nicht erneuerbar, Treibhausgas-Emissionen, Umweltbelastung (Methode der ökologischen Knappheit 2006) und radioaktive Abfälle pro pkm mit einem Elektroauto, verschiedene Sachbilanzen Li-Ionen-Batterie und Sachbilanz mit NiMH-Batterie

|  | KEA, erneuerbar | KEA, nicht erneuerbar | Treibhausgase         | Umweltbelastung | radioaktive Abfälle |
|--|-----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------|---------------------|
| Elektroauto gefahren mit ...               | MJ Öl-eq        | MJ Öl-eq              | g CO <sub>2</sub> -eq | UBP'06          | mm <sup>3</sup>     |
| Li-Ionen-Batterie, Herstellermodellierung  | 0.29            | 2.71                  | 96                    | 163             | 1.10                |
| Li-Ionen -Batterie, I-O-Table Modellierung | 0.27            | 2.73                  | 97                    | 182             | 1.07                |
| Li-Ionen -Batterie, ecoinvent Modellierung | 0.32            | 2.32                  | 67                    | 166             | 1.06                |
| NiMH-Batterie, ecoinvent Modellierung      | 0.33            | 2.79                  | 108                   | 228             | 1.15                |

In der Basisvariante wird mit Ausnahme des CityCars davon ausgegangen, dass die Batterie einmal ersetzt werden muss. In einer Sensitivitätsanalyse wird angenommen, dass im besten Fall die Batterie für die gesamte Nutzungsdauer des Fahrzeugs zur Verfügung steht, im schlechtesten Fall 2 Ersatzbatterien eingesetzt werden müssen (Batterielebensdauer von 150'000 km beziehungsweise 50'000 km, siehe Tabelle 9).

Tabelle 9 Kumulierter Energieaufwand (KEA) erneuerbar und nicht erneuerbar, Treibhausgas-Emissionen, Umweltbelastung (Methode der ökologischen Knappheit 2006) und radioaktive Abfälle pro pkm mit einem Elektroauto, eine, keine, beziehungsweise 2 Ersatzbatterien gemäss Hersteller-Modellierung

|                                  | Betriebsdauer Batterie | KEA erneuerbar | KEA nicht erneuerbar | Treibhausgase         | Umweltbelastung | radioaktive Abfälle |
|----------------------------------|------------------------|----------------|----------------------|-----------------------|-----------------|---------------------|
| Elektroauto gefahren mit ...     | in km                  | MJ Öl-eq       | MJ Öl-eq             | g CO <sub>2</sub> -eq | UBP'06          | mm <sup>3</sup>     |
| 1 Ersatzbatterie (Basisvariante) | 75'000                 | 0.29           | 2.71                 | 96                    | 163             | 1.10                |
| keine Ersatzbatterie             | 150'000                | 0.27           | 2.38                 | 73                    | 140             | 1.07                |
| 2 Ersatzbatterien                | 50'000                 | 0.31           | 3.04                 | 118                   | 186             | 1.13                |

Die Variation der Batterie-Lebensdauer wirkt sich am stärksten auf die Höhe der Treibhausgas-Emissionen aus. Hier ist eine Veränderung um +/- 23 % zu beobachten. Der kumulierte Energieaufwand nicht erneuerbar variiert um +/- 12 %, die Gesamtumweltbelastung um +/- 14 %. Die Variation der Erzeugung radioaktiver Abfälle ist mit weniger als +/-3 % eher gering.

### 7.4 Fazit

Die Ökobilanzergebnisse des Fahrens mit einem Elektroauto zeigen eine grosse Bandbreite auf. Je nach Studie und Grundlagen variieren beispielsweise die gesamten Treibhausgas-Emissionen eines mit Schweizer Strom (Konsummix) betriebenen Autos zwischen rund 60 Gramm CO<sub>2</sub>-eq und rund 100 Gramm CO<sub>2</sub>-eq pro Personenkilometer (100 bis 160 Gramm CO<sub>2</sub>-eq pro Fahrzeugkilometer). Der wesentliche Grund für diesen Unterschied liegt in der Bilanzierung der Batterie, das heisst in der CO<sub>2</sub>-Intensität ihrer Herstellung.

Vor allem die Wahl des Strommixes hat einen grossen Einfluss auf die Treibhausgas-Emissionen aber auch auf die übrigen Umweltkennwerte. Elektroautos, welche mit Strom aus (mehrheitlich) fossilen Quellen geladen werden, weisen hohe spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen auf, produzieren aber relativ wenig radioaktive Abfälle. Werden die Fahrzeuge mit Strom aus Kernkraftwerken geladen, sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen relativ tief. Dafür werden deutlich mehr radioaktive Abfälle erzeugt. Einzig das Fahren von Elektroautos mit Strom aus erneuerbaren

Quellen zeigt in allen fünf Indikatoren tiefe Werte mit Ausnahme des erneuerbaren kumulierten Energieaufwandes.

Es kann erwartet werden, dass die Umweltauswirkungen des Fahrens mit einem Elektroauto durch zukünftige technische Entwicklungen bei den Batterien verringert werden können. Andererseits dürften sich die Umweltauswirkungen von Benzin- und Dieselaautos angesichts der zunehmenden Verknappung der Reserven („Peak Oil“) und dem ansteigenden Abbau von Ölschiefer und Ölsanden in Zukunft eher verschlechtern, da die Förder- und Aufbereitungsaufwendungen für die Treibstoffe eher zunehmen werden.

Auf Seiten der Bilanzierung besteht Handlungsbedarf bezüglich Datenverfügbarkeit der Aufwendungen und Emissionen der Herstellung von Li-Ionen-Batterien. Auch bestehen noch grosse Unsicherheiten bezüglich der Lebensdauer der Batterien und dem Strombedarf der Elektroautos im Alltag.

## 8 Verminderungspotenzial der Umweltbelastung durch Elektroautos

Die Verminderungspotenziale werden unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus den Kapiteln 2 und 6 ausgewiesen. Als Referenz wird das Schweizer Durchschnittsauto für das Jahr 2009 gewählt (Flottenmix Diesel und Benzin, siehe Tabelle 6). Die Verkehrsleistung der inländischen Pkw in der Schweiz betrug in diesem Jahr insgesamt 48'127 Mio. Fahrzeugkilometer. Die Ersatzrate schwankte in den letzten zehn Jahren zwischen 6.5 und 8 %. Das Reduktionspotenzial wird auf Basis von 7 % der jährlichen Fahrleistung (5'390 Mio. Personenkilometer oder rund 280'000 Fahrzeuge) ermittelt, unter der Annahme, dass ein durchschnittlicher Pkw (siehe „Flottendurchschnitt Schweiz“ in Tabelle 6) durch ein Elektroauto (mit einem spezifischen Strombedarf von 20 kWh/100 km, siehe Tabelle 6, grau hinterlegte Zeile), durch ein verbrauchsarmes Dieselauto vom Typ VW Golf BlueMotion (mit einem Verbrauch von 4.6 l Diesel/100 km<sup>22</sup>, Kennwerte ebenfalls aus Tabelle 6) beziehungsweise durch das meistverkaufte Benzinauto vom Typ VW Golf 1.4 TFSI (mit einem Verbrauch von 7.4 l Benzin/100 km<sup>22</sup>) ersetzt wird.

### 8.1 Klimagase und Umweltbelastung

Falls alle erstmals in Verkehr gesetzten Neuwagen Elektroautos sind, können die Klimagas-Emissionen um 530'000 Tonnen CO<sub>2</sub>-eq pro Jahr reduziert werden. Sind alle Neuwagen verbrauchsarme Dieselfahrzeuge beziehungsweise entsprechen sie dem meistverkauften VW Golf, können die Emissionen um 380'000 Tonnen beziehungsweise um 125'000 Tonnen CO<sub>2</sub>-eq pro Jahr reduziert werden. Der nicht erneuerbare Primärenergiebedarf der heutigen Neuwagenflotte kann mit Elektroautos um 3'000 TJ, mit verbrauchsarmen Dieselfahrzeugen um 5'700 TJ und mit dem beliebtesten VW Golf um 1'800 TJ Öl-Äquivalente reduziert werden. Mit Elektroautos werden andererseits zusätzlich etwas mehr als 1'100 TJ erneuerbare Primärenergie benötigt. Die Gesamtumweltbelastung der heutigen Mobilität mit Personenwagen kann durch Ersatz mittels Elektroautos um 350 Mia. UBP verringert werden, um 630 Mia. UBP beim Einsatz von verbrauchsarmen Dieselfahrzeugen beziehungsweise um 370 Mia. UBP mit dem beliebtesten VW Golf. Der jährliche Anfall radioaktiver Abfälle wird durch den Einsatz von Elektroautos um etwas mehr als 4 m<sup>3</sup> erhöht, während beim Einsatz verbrauchsarmer Dieselfahrzeuge eine Reduktion um 0.1 m<sup>3</sup> zu beobachten ist. Auch die Emission von

---

<sup>22</sup> Normverbrauch plus 20 % Realsituations-Zuschlag.

## 8. Verminderungspotenzial der Umweltbelastung durch Elektroautos

radioaktivem C-14<sup>23</sup> wird durch den Einsatz von Elektrofahrzeugen um rund 19 GBq erhöht, durch den Einsatz verbrauchsarmer Dieselfahrzeuge hingegen um 180 MBq reduziert. Diese – vergleichsweise geringe – Reduktion ist auf einen reduzierten Strombedarf in der Treibstoffbereitstellung zurückzuführen, da für das verbrauchsarme Dieselfahrzeug weniger Treibstoff bereitgestellt werden muss als für den heutigen Durchschnitts-Pkw. Zudem muss nur Diesel bereitgestellt werden, der in der Herstellung deutlich weniger aufwendig ist als Benzin. Der gegenüber Diesel erhöhte Aufwand zur Herstellung von Benzin ist auch der Grund, weshalb die C-14 Emissionen durch den Einsatz des meist verkauften VW Golf (Benziner) geringfügig höher sind.

Tabelle 10 Reduktionspotenzial kumulierter Energieaufwand (KEA) erneuerbar und nicht erneuerbar, Treibhausgas-Emissionen, Umweltbelastung (Ökologische Knappheit 2006) und radioaktive Abfälle pro Jahr durch den Ersatz von rund 280'000 herkömmlichen Autos durch Elektroautos, durch verbrauchsarme Dieselfahrzeuge des Typs VW Golf BlueMotion beziehungsweise durch den meistverkauften VW Golf.

|                           | KEA, erneuerbar | KEA, nicht erneuerbar | Treibhausgas               | Umweltbelastung | radioaktive Abfälle | C-14    |
|---------------------------|-----------------|-----------------------|----------------------------|-----------------|---------------------|---------|
|                           | TJ Öl-eq        | TJ Öl-eq              | 1'000t CO <sub>2</sub> -eq | Mia. UBP'06     | m <sup>3</sup>      | MBq     |
| Elektroauto <sup>1)</sup> | -1'140          | 2'980                 | 533                        | 353             | -4.3                | -18'700 |
| VW Golf BlueMotion        | 8               | 5'660                 | 379                        | 602             | 0.1                 | 180     |
| VW Golf 1.4 TFSI          | -5              | 1'850                 | 125                        | 372             | 0.0                 | -76     |

<sup>1)</sup>: Für diese Berechnungen werden die Ergebnisse der Basisvariante des Elektroautos (grau hinterlegt in Tabelle 6) verwendet.

### 8.2 Luftschadstoffe

Das Reduktionspotenzial an Luftschadstoffen liegt bei jährlich 900 Tonnen NO<sub>x</sub> für Elektroautos, 850 Tonnen für verbrauchsarme Dieselfahrzeuge beziehungsweise gut 1'000 Tonnen für den meist verkauften VW Golf. Dies liegt im Wesentlichen am deutlich tieferen Verbrauch und am höheren Emissionsstandard (Euro 5) im Vergleich zum heutigen Durchschnittsfahrzeug. Die NO<sub>x</sub>-Emissionen des Elektroautos stammen vorwiegend aus der Batterieherstellung (Kohlekraftwerke in China und Japan), dem Einsatz von europäischem Strom im Betrieb (Importanteil des Schweizer Strommixes) und aus der Herstellung von Materialien wie Elektrostahl.

Durch die Wertschöpfungskette der Li-Ionen-Batterie betragen die Partikel-Mehremissionen beim Elektroauto knapp 100 Tonnen pro Jahr. Diese Erhöhung der Partikelemissionen beim Wechsel auf Elektroautos ist auf hohe Partikelemissionen chinesischer Kohlekraftwerke (rund 30 % der Gesamtemissionen, Strombedarf in der Batterieherstellung) und die Emissionen Europäischer Kraftwerke (rund 20 % der Gesamtemissionen, Importanteil im Schweizer Strommix, Strombedarf in der Materialherstellung) zurückzuführen. Die Informationen zum Strombedarf der Batterieherstellung sind unsicher (siehe auch Unterkapitel 4.1). Der Anteil der Partikel-Emissionen durch Brems- und Reifenabrieb beträgt beim Elektroauto 12 %. Das Minderungspotenzial der Bremsabrieb-Emissionen durch Rekuperation ist deshalb gering und wurde hier vernachlässigt.

<sup>23</sup> C-14 ist neben Rn-222 das bezüglich Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit wichtigste Isotop der Kernenergie-Prozesskette. Es wird von Kraftwerken und von Wiederaufarbeitungsanlagen emittiert und kann aufgrund seiner Strahlung zu tödlichen und nicht tödlichen Krebserkrankungen sowie zu Erbgutveränderungen führen.

Beim Benützen eines verbrauchsarmen Dieselaautos mit Euro5 Emissionsstandard und geregtem Partikelfilter beziehungsweise des meist verkauften VW Golf (1.4 TFSI) kann hingegen eine Partikel-Reduktion von 63 Tonnen beziehungsweise 21 Tonnen erzielt werden. Der Unterschied zwischen Diesel- und Benzinauto ist hauptsächlich durch die unterschiedlich hohen Aufwendungen und Emissionen in der Treibstoffbereitstellung begründet.<sup>24</sup> Die jährlichen Partikel-Emissionen am Auspuff der Autos können mit allen drei Autotypen insgesamt um mehr als 50 Tonnen reduziert werden. Die Emissionsmenge der hier bilanzierten Neufahrzeuge ist viel tiefer als diejenige des Flottendurchschnitts, sodass es kaum noch einen Unterschied zum Elektroauto gibt. Rund 70 % oder mindestens 35 Tonnen dieser Partikel Emissionen sind Dieseldruck-Emissionen. Die Reduktion der Dieseldruck-Emissionen mit dem verbrauchsarmen Dieselauto ist nicht ein Verdienst dieses Fahrzeugs sondern eine Folge der Verschärfung des Emissionsgrenzwerts für Partikel, der einen geregelten Dieselfilter bei allen neu in Verkehr gesetzten Dieselaautos erforderlich macht. Der meist verkaufte VW Golf ist mit einem Benzinmotor mit Direkteinspritzung (TFSI: Turbo Fuel Stratified Injection) ausgestattet, was dazu führt, dass dieses Fahrzeug mehr Partikel emittiert als der verbrauchsarme VW Golf mit Dieselmotor und geregtem Partikelfilter.

Tabelle 11      Reduktionspotenzial Luftschadstoffe durch den Einsatz von Elektroautos, durch verbrauchsarme Dieselfahrzeuge des Typs VW Golf BlueMotion beziehungsweise durch den meistverkauften VW Golf.

|                    | <b>Stickoxide</b> | <b>Partikel</b> | <b>Partikel, Auspuff</b> | <b>Dieseldruck, Auspuff</b> |
|--------------------|-------------------|-----------------|--------------------------|-----------------------------|
|                    | Tonnen            | Tonnen          | Tonnen                   | Tonnen                      |
| Elektroauto        | 894               | -94             | 56.3                     | 39.4                        |
| VW Golf BlueMotion | 845               | 63              | 56.2                     | 39.4                        |
| VW Golf 1.4 TFSI   | 1019              | 21              | 51.5                     | 35.4                        |

Gemäss Mikrozensus sind 12 % der Fahrten mit Pkw kürzer als 1 km und 30 % kürzer als 3 km. Das bedeutet für die Luftschadstoffe: Die Autos fahren mit kaltem Motor, was signifikant höhere Luftemissionen verursacht, weil die Luftreinigungssysteme noch nicht auf Betriebstemperatur erwärmt sind. Die Fahrten unter 3 km machen allerdings lediglich rund 7 bis 8 % der gesamten zurückgelegten Distanzen (Kilometerleistung) aus (siehe Abbildung 1). Rund 30 % der zurückgelegten Kilometer (nicht der Anzahl Fahrten) stammen von Fahrten von 15 km Länge und weniger.

Elektroautos können somit in Zonen mit hoher Luftschadstoff-Belastung in begrenztem Masse zur Senkung der Immissionen (Luftschadstoffe, bei tiefer Geschwindigkeit auch Lärm) beitragen.

### 8.3 Lärmbelastung

Die technischen Spezifikationen der in Tabelle 4 aufgeführten Elektroautos enthalten keine Angaben zum Lärm-Typenprüfwert. Gemäss der Auto Umweltliste 10 des VCS (VCS 2010) liegen alle dort aufgeführten Elektroautos unterhalb des Lärm-Typenprüfwerts von 65 dB(A), welcher in der VCS-Skala eine Maximalbewertung von 10 Punkten ergibt. Gegenüber dem Grenzwert von 74 dB(A) (beziehungsweise 75 dB(A) für Direkteinspritzer und bis zu 77 dB(A) für Geländefahrzeuge über 2 t Leergewicht) entspricht dies mindestens einer Halbierung des wahrgenommenen Lärms. Der mittlere Lärm-Typenprüfwert von heute angebotenen

<sup>24</sup> Dieseltreibstoff wird in Raffinerien mit einem deutlich geringeren Aufwand hergestellt als Benzin.



Neuwagen liegt bei knapp 72 dB(A)<sup>25</sup> liegen. Der Lärm-Typenprüfwert des VW Golf BlueMotion liegt bei 70 dB(A), derjenige des VW Golf 1.4 TFSI bei 68 dB(A). Der Lärmwert des Mitsubishi i-MiEV liegt gemäss den Prüfwerten für die schweizerische Typengenehmigung bei 66 dB(A).

Es ist davon auszugehen, dass die Lärmbelastung in bewohnten Gebieten deutlich reduziert wird, wenn ein grosser Anteil der Fahrzeugflotte aus Elektrofahrzeugen besteht. Bei den tiefen Geschwindigkeiten die in Wohngebieten gefahren werden, ist bei Personenwagen vor allem das Antriebsgeräusch wichtig. Dieses ist bei Elektrofahrzeugen deutlich tiefer als bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor.

### 8.4 Landinanspruchnahme

Die Landinanspruchnahme durch die Verkehrsinfrastruktur ist in der Ökobilanz für mehr als zwei Drittel der durch Autofahren verursachten Landnutzung verantwortlich. Sie wird durch den Einsatz von Elektroautos anstelle von Benzin- oder Dieselfahrzeugen kaum beeinflusst. Es ist keine namhafte Reduktion der direkten Flächennutzung pro gefahrenen Kilometer zu erwarten. Lediglich die indirekte Landinanspruchnahme (in der Treibstoff- beziehungsweise der Strom- Bereitstellung und in der Batterieherstellung) ist leicht unterschiedlich.

Die Landinanspruchnahme durch den Bau neuer Kraftwerkskapazitäten wird in der Ökobilanz nicht anders beurteilt als diejenige von bereits bestehenden Kraftwerken<sup>26</sup>. In diesem Sinne führt ein Kraftwerkszubau nicht zu einer Erhöhung der spezifischen Landinanspruchnahme pro gefahrenen Kilometer.

### 8.5 Einsatz mineralischer Rohstoffe

#### 8.5.1 Übersicht

Sowohl bei Benzin- und Dieselaautos als auch bei Elektroautos werden Rohstoffe eingesetzt, deren heute bekannte Reserven<sup>27</sup> oder deren Produktionskapazitäten begrenzt sind. In den nachfolgenden Abschnitten wird die heutige und mögliche zukünftige Situation von einzelnen für Pkw relevanten Rohstoffen beleuchtet.

#### 8.5.2 Platingruppenmetalle

Heutige Abgas-Katalysatoren verwenden Platin, Palladium und Rhodium. Es gehen 42 %, 51 % beziehungsweise 86 % des weltweiten Bedarfs dieser drei Platingruppenmetalle in die Kfz-Katalysatoren-Herstellung (Angerer et al. 2009). Die weltweite jährliche Produktion liegt bei je rund 230 Tonnen Platin und Palladium und knapp 75 Tonnen der übrigen Platinmetalle (Angerer et al. 2009, S.291). Von den übrigen geförderten Platinmetallen entfällt rund ein Drittel auf Rhodium. Die bekannten Reserven liegen bei 71'000 Tonnen, die wirtschaftlich ausbeutbaren Weltressourcen bei 100'000 Tonnen (Angerer et al. 2009, S.290). Mit einer statischen Reichweite von knapp 200 Jahren handelt es sich um keine geologisch knappe Res-

---

<sup>25</sup> Auszug TARGA, Februar 2011, Persönliche Mitteilung N. Egli, 28.03.2011

<sup>26</sup> Die durch das Kraftwerk während einem Jahr genutzte Fläche wird auf die Jahresproduktion des Kraftwerks aufgeteilt.

<sup>27</sup> Unter *Reserve* wird diejenige Menge eines Rohstoffs verstanden, die technisch und wirtschaftlich gewonnen oder produziert werden könnte. Unter *Ressource* wird die grösstmöglich zur Verfügung stehende Menge eines Rohstoffs verstanden. Sie entspricht somit der Konzentration eines Erzes oder einer sonstigen mineralisch-fossilen Zielfraktion in der Erdkruste und ist unabhängig von der Gewinnbarkeit.

source. Aufgrund der hohen Preise dieser Metalle sind Recyclingsysteme und -prozesse etabliert. Allerdings geht in der Betriebsphase ein Teil des Platins infolge mechanischer, thermischer und Säurebelastungen verloren.

Einzig bei Elektroautos, die mit Brennstoffzellen ausgerüstet sind, wird ein namhafter zukünftiger Bedarf an Platin von knapp 350 Tonnen im Jahr 2030 vorausgesagt (Angerer et al. 2009). Brennstoffzellenautos sind in der vorliegenden Studie nicht bilanziert.

In den Ökobilanzen der Benzin- und Dieselaautos sind die Aufwendungen und Umweltbelastungen durch die Gewinnung der Platingruppenmetalle berücksichtigt.

### 8.5.3 Kupfer

Der Kupferbedarf der heutigen Autos liegt bei rund 20 kg pro Fahrzeug (Angerer et al. 2009, S.38). Der Bedarf kann durch eine weitere Steigerung des Ausrüstungsgrades mit Autoelektronik auf 40 kg pro Fahrzeug steigen. Bei Elektro- und Hybridautos ist mit zusätzlichen 15 bis 25 kg Kupfer zu rechnen. Hochrechnungen zeigen, dass Hybrid- und Elektroautos einen Mehrbedarf an Kupfer in der Grössenordnung von 220'000 Tonnen pro Jahr verursachen können. Dies ist relativ wenig im Vergleich zur heutigen Jahresproduktion von 15.1 Millionen Tonnen. Das Recycling von Kupfer ist etabliert.

Derecoinvent Datensatz zur Herstellung eines Autos enthält einen Bedarf von gut 10 kg Kupfer, das Elektroauto weist einen zusätzlichen Bedarf von etwa 10 kg auf (Elektromotor und Batterie). Der Kupferbedarf, wie er im ecoinvent Datensatz modelliert ist, liegt somit deutlich unter den vorgenannten Erfahrungswerten und damit zu tief. Der relative Mehrbedarf an Kupfer für Elektroautos im Vergleich mit konventionellen Autos (plus 100 %) stimmt mit den Angaben in der vorgenannten Quelle überein.

Die Kupfergewinnung und -verhüttung ist in der ecoinvent Datenbank relativ detailliert modelliert. Insbesondere die Herstellung in Südamerika ist gemäss ecoinvent Modellierung aufgrund fehlender Rückhaltetechniken deutlich umweltbelastender als die Produktion in anderen Weltregionen.

### 8.5.4 Lithium

Lithium wird in den Sektoren Keramik, Glas, Aluminium, Fette, Gummi und Batterien verwendet. Rund 20 % des Lithiumbedarfs geht zu Lasten der Herstellung von wiederaufladbaren Batterien.

Die globalen Lithium Reserven werden auf etwas mehr als 4 Millionen Tonnen geschätzt, die Ressourcen auf rund 17 Millionen Tonnen (Meridian International Research 2008). Die Jahresproduktion lag im Jahr 2007 bei 81'000 Tonnen  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  oder 15'300 Tonnen Lithium-Metall. Durch geplante Inbetriebnahmen weiterer Minen kann im optimalen Fall mit einer Ausdehnung der Jahresproduktion auf knapp 310'000 Tonnen  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  oder 58'000 Tonnen Lithium-Metall im Jahr 2020 gerechnet werden. Davon stehen rund 45'000 Tonnen  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  oder 8'500 Tonnen Lithium-Metall für den Automobilsektor zur Verfügung (Meridian International Research 2008).

Der Lithiumbedarf für eine Li-Ionen-Batterie liegt je nach Technologie zwischen 120 Gramm pro kWh (Eisenphosphat) und 180 Gramm pro kWh (Kobalt, Angerer et al. 2009, S.171). Bei einer Energiedichte von 105 beziehungsweise 170 Wh pro kg sind in einem kg Li-Ionen-Batterie 13 beziehungsweise 31 Gramm Lithium enthalten. Basierend auf einem durchschnittlichen Bedarf von 20 g Li pro kg Batterie und einem Gewicht der Fahrzeugbatterie von 300 kg resultiert ein Lithiumbedarf pro Fahrzeug von 6 kg.

Die 8'500 Tonnen Lithium, die 2020 jährlich für den Automobilsektor voraussichtlich zur Verfügung stehen, können somit für Li-Ionen-Batterien von rund 1.4 Millionen Fahrzeugen (Neuausrüstung und Ersatz) pro Jahr verwendet werden, was weniger als der Hälfte der Neuzulassungen von Pkw in Deutschland in den letzten Jahren entspricht.

Das Recycling von Lithium wird aufgrund der relativ einfachen Gewinnung von Primärlithium und der grossen Reserven noch nicht kommerziell betrieben.

### 8.5.5 Kobalt

Die Verfügbarkeit von Kobalt wird im Zusammenhang mit Li-Ionen-Batterien als kritischer beurteilt als Lithium. Hier wird bis 2030 mit einem zusätzlichen jährlichen Bedarf von etwas mehr als 20'000 Tonnen für Li-Ionen-Batterien gerechnet, was rund 30 % der Jahresproduktion 2006 entspricht (Angerer et al. 2009, S.258 ff.). Die Reserven und Ressourcen betragen rund 7 beziehungsweise 15 Millionen Tonnen, weshalb dieses Metall als geologisch nicht knapp klassifiziert werden kann.

### 8.5.6 Metalle der Seltenen Erden

Metalle der Seltenen Erden werden insbesondere in Hochtechnologieprodukten wie Lasern, Mobiltelefonen, LCD-Bildschirmen oder Touchscreens eingesetzt. Sie finden auch Anwendung in Batterien von Elektroautos und in den Permanentmagneten von Elektromotoren (Angerer et al. 2009, S.314; Zajec 2010). In einem Elektro- beziehungsweise Hybridauto sind mit den Elektromotoren rund 0.5 bis 1 kg Neodym verbaut (Angerer et al. 2009, S.38).

Die globalen Reserven beziehungsweise Ressourcen betragen 88 beziehungsweise 150 Millionen Tonnen. Die Produktion von Seltene Erden Oxiden betrug 2006 rund 125'000 Tonnen. Cer (8'000 - 20'000 Tonnen), Lanthan (7'000 - 10'000 Tonnen), Neodym (7'300 Tonnen), und Yttrium (7'000 Tonnen) werden als Einzelmetalle in grösseren Mengen hergestellt. China ist heute mit 97 % der Hauptproduzent von Metallen der Seltenen Erden, wobei es die Produktion erst Mitte der achtziger Jahre aufgenommen hat (Angerer et al. 2009, S.305).

Ein wesentlicher Grund dafür ist, dass die Umweltstandards in China weniger anforderungsreich sind und sich daher die Produktion von Metallen der Seltenen Erden weitestgehend dorthin verlagert hat.

Von den Metallen der Seltenen Erden spielt Neodym bezüglich Verfügbarkeit und Anwendungspotenzial eine zentrale Rolle. Es wird in Permanentmagneten von Elektromotoren und Windkraftturbinen eingesetzt. Zukunftstechnologien können im Jahr 2030 zu einem Jahresbedarf von knapp 28'000 Tonnen Neodym führen<sup>28</sup>, wovon Elektro- und Hybridfahrzeuge einen Anteil von rund 7'000 Jahrestonnen ausmachen werden. Dies entspricht knapp der heutigen Produktion dieses Metalls von 7'300 Tonnen (Angerer et al. 2009).

Permanentmagnete werden bereits heute teilweise rezykliert, weshalb das in diesen Produkten eingesetzte Neodym zurückgewonnen werden kann.

Entgegen ihrem historisch bedingten Namen sind die entsprechenden Elemente in der Erdkruste reichlich zu finden. Weil sie jedoch in unterschiedlichsten Mineralien als jeweils niedrigkonzentrierte Beimischungen vorkommen, ist deren Gewinnung aufwändig und umweltbelastend. Beim Abbau von Metallen der Seltenen Erden fallen unter anderem radioaktive

---

<sup>28</sup> Heute liegt der Neodym-Bedarf in Nd-Fe-B-Permanentmagneten bei ca. 4000 Tonnen.

Rückstände an<sup>29</sup>. Im ecoinvent Datenbestand v2.2 ist ein Datensatz zur Gewinnung von Metallen der Seltenen Erden enthalten. Dieser basiert im Wesentlichen auf Analogieschlüssen, abgeleitet aus dem Abbau und der Raffination anderer Metalle. In den ecoinvent Batterie-Datensätzen ist kein Bedarf an Metallen der Seltenen Erden ausgewiesen. Dies gilt auch für den Datensatz zum Elektromotor, der im Elektro- und Hybridauto eingesetzt wird.

### 8.5.7 Fazit

Die Rohstoffverfügbarkeit ist eher eine Frage begrenzter Produktionskapazitäten und geopolitischer Einschränkungen denn eine der geologischen Knappheit. Dies gilt für Lithium wie auch für Neodym, zwei für die Elektromobilität bedeutende Metalle (Batterie beziehungsweise Elektromotor). Bezüglich der Verfügbarkeit von Kupfer spielt die Elektromobilität eine untergeordnete Rolle. Da der Verbrennungsmotor auch in Zukunft eine wichtige Rolle spielen wird (teilweise kombiniert mit Elektromotoren in Hybridfahrzeugen), wird sich am Bedarf an Platingruppenmetallen nicht viel ändern. Weiterhin wird ein Grossteil der Produktion dieser Metalle in Abgaskatalysatoren eingesetzt.

Die Umweltauswirkungen der Rohstoffgewinnung sind für Kupfer, die Platingruppenmetalle und Lithium ausreichend bis gut bilanziert. Die Bilanz der Metalle der Seltenen Erden beruht weitgehend auf Analogieschlüssen und ist deshalb mit grossen Unsicherheiten behaftet. Zudem werden in den Sachbilanzen der Batterie- und Elektromotor-Herstellung keine Metalle der Seltenen Erden berücksichtigt, da in den verfügbaren Unterlagen zur Materialzusammensetzung der beiden Komponenten keine Angaben gemacht werden.

## 8.6 Konflikte zwischen der Öko-Strom-Produktion und verschiedenen Umweltbereichen

In einer Ökobilanz werden die Umweltauswirkungen der Stromerzeugung in Bezug gesetzt zur erzeugten Menge Elektrizität. Das Ergebnis einer Ökobilanz ist also bezogen auf eine Produktionseinheit (zum Beispiel 1 kWh Strom) und macht keine Aussage über das absolute Ausmass der Umweltauswirkungen, wie dies für die nationalen Schutzgüter Natur und Landschaft erforderlich wäre.

Lokale Auswirkungen auf Natur und Landschaft durch den Bau neuer Kraftwerkskapazitäten (neue Kernkraftwerke, Neu- oder Ausbau von Pumpspeicherkraftwerken, Kleinwasserkraftwerke, Windparks) können zudem mit der Methode der Ökobilanzierung kaum sinnvoll quantifiziert werden. Das Zertifizierungssystem „naturemade star“ beispielsweise hat aus diesem Grund neben einem Ökobilanzkriterium auch lokale, Technologie spezifische Kriterien festgelegt, die eingehalten werden müssen. Diese Kriterien umfassen beispielsweise Aspekte wie Restwassermengen, Fischdurchgängigkeit oder kraftwerksbedingte Abflussschwankungen (Schwall und Sunk) bei Wasserkraftanlagen, zulässige Gebiete für Windkraftanlagen, Anforderungen an landwirtschaftliche Betriebe (Strom aus landwirtschaftlichem Biogas), keine Photovoltaikanlagen auf un bebauten Flächen, und so weiter. Für eine projektspezifische Beurteilung der lokalen Umweltauswirkungen von neuen Kraftwerken oder Übertragungsleitungen steht mit der Umweltverträglichkeitsprüfung ein geeignetes Instrument zur Verfügung. Darin werden auch Aspekte wie landschaftliche Beeinträchtigung (durch Windturbinen, Kühltürme und dergleichen), Lärm, Vogelschlag, Restwassermengen etc. beschrieben und beurteilt.

---

<sup>29</sup> <http://www.actu-environnement.com>; Interview mit Christian Hocquard vom 2. Juni 2010, Zugriff am 22. Februar 2011.

## 9 Folgerungen

Ob der Einsatz von Elektroautos zu einer Reduktion der Treibhausgas-Emissionen im Vergleich zum heutigen Durchschnittsauto führt, ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Die Folgerungen zu möglichen Emissionsreduktionen von Elektroautos in diesem Bericht basieren auf einem Strombedarf von 20 kWh pro 100 km eines Elektroautos der unteren Mittelklasse („Golf“-Klasse), einer CO<sub>2</sub>-Intensität des Schweizer Strommixes von knapp 150 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh einer Lebensleistung der rund 300 kg schweren Batterie von 75'000 km und einer Emissionsintensität der Batterieherstellung von rund 17 kg CO<sub>2</sub>-eq pro kg Batterie. Unter diesen Annahmen können die Treibhausgas-Emissionen durch die Benützung eines Elektroautos um rund 40 % stärker reduziert werden, als durch die Benützung eines verbrauchsarmen Dieselaautos derselben Klasse. Die Emissionen können durch die Benützung eines Elektroautos sogar um mehr als 300 % stärker gesenkt werden im Vergleich zum Benützen des heute meist gekauften VW Golf Modells (1.4 TFSI). Das Reduktionspotenzial liegt zwischen 125'000 und 533'000 Tonnen CO<sub>2</sub>-eq pro Jahr, was rund 0.25 bis 1.0 % der jährlichen Schweizer Treibhausgas-Emissionen entspricht.

Unter gewissen Bedingungen können die spezifischen Treibhausgas-Emissionen des Elektroautos pro zurückgelegten Kilometer deutlich reduziert werden. Der Kauf von zertifizierter Elektrizität auf Basis von erneuerbaren Energiequellen, das Senken des spezifischen Stromverbrauchs, die Verlängerung der Lebensdauer und eine deutlich effizientere Herstellung der Batterie verringern die klimaschädigenden Emissionen des Elektroautos massgeblich. Von zentraler Bedeutung für die spezifischen Klimagasemissionen des Elektroautos sind aber in erster Linie der spezifische Verbrauch und die Art der Erzeugung des verwendeten Stroms; diese Faktoren sind vom Fahrzeuglenker individuell beeinflussbar. Der spezifische Verbrauch ist wesentlich abhängig vom erforderlichen Fahrzeuggewicht, den gestellten Komfortansprüchen (v.a. Klimatisierung des Innenraums), der gewünschten Reichweite (grosse Reichweite bedingt grosse, schwere Batterien) und dem Fahrstil.

Die Gesamtumweltbelastung, ausgedrückt in UBP bezogen auf die Ökofaktoren 2006<sup>30</sup>, und der kumulierte nicht erneuerbare Energieaufwand können durch den Einsatz eines sparsamen Dieselaautos der unteren Mittelklasse (Golf-Klasse) stärker reduziert werden als durch den Einsatz eines Elektroautos derselben Klasse.

Werden Elektrofahrzeuge mit Strom aus Kernkraftwerken betrieben, erhöht sich die Menge des anfallenden hochradioaktiven Abfalls gegenüber einem sparsamen Dieselfahrzeug um einen Faktor 5, bei einem um 36 % tieferen Ausstoss an Klimagasen.

Die Vorteile von Elektrofahrzeugen zeigen sich vor allem bei einer differenzierten Betrachtung der Umweltauswirkungen. Die Lärmbelastung verursacht durch Personenwagen kann durch den Ersatz von Benzin- und Dieselaautos durch Elektroautos deutlich reduziert werden. In den dicht besiedelten Ballungsgebieten bringen Elektroautos als Ersatz von Benzin- und Dieselaautos zudem in begrenztem Mass eine Verbesserung bei der Belastung mit Luftschadstoffen, da beim Betrieb lokal keine Emissionen entstehen. Andererseits ermöglichen Elektroautos aber keine Reduktion des Bedarfs an Strassenflächen.

Die Bilanzen von Leichtbaufahrzeugen mit deutlich reduziertem spezifischem Verbrauch zeigen, dass auch im Bereich der Verbrennungsmotoren grosse Potentiale zur Reduktion der Umweltbelastung gegenüber dem heutigen Flottendurchschnitt bestehen. Die Unterschiede

---

<sup>30</sup> Auswirkungen auf Natur und Landschaft in der Schweiz durch den Bau neuer Kraftwerkskapazitäten (neue Kernkraftwerke, Neu- oder Ausbau von Pumpspeicherkraftwerken, Kleinwasserkraftwerke, Windparks) sind in der mit Ökobilanzen ermittelten Gesamtumweltbelastung nicht enthalten.

## 9. Folgerungen

---

zwischen verschiedenen Antriebskonzepten (Diesel oder Elektro) bei den Leichtbaufahrzeugen sind gering. Erste Priorität hat die deutliche Reduktion des spezifischen Verbrauchs durch den Bau von kleineren und leichteren Fahrzeugen. Die Wahl des geeigneten und umweltfreundlichen Antriebskonzeptes kommt erst an zweiter Stelle.

Insgesamt ist die Informationssituation bezüglich Elektroautos verbesserungsfähig. Unsicherheiten bestehen insbesondere im Bereich der Batterieherstellung, Lebensdauer und Leistung sowie im spezifischen Strombedarf von Elektroautos im Alltag.

## 10 Literatur

- AEE 2009 AEE (2009) Ökostrom in der Schweiz - der Marktanteil erneuerbarer Stromprodukte im Jahr 2008, Ergebnisse einer Umfrage bei Schweizer Energieversorgungsunternehmen. Agentur für erneuerbare Energien und Energieeffizienz, Zürich.
- Allwardt 2009 Allwardt C. (2009) Der Ausbau des Übertragungsnetzes - Die Bewertung der Herausforderung aus technischer Sicht. In proceedings from: Forum für Zukunftsenergien, Berlin, 24. November 2010.
- Althaus & Gauch 2010 Althaus H.-J. and Gauch M. (2010) Vergleichende Ökobilanz individueller Mobilität - Elektromobilität versus konventionelle Mobilität mit Bio- und fossilen Treibstoffen. Technologie und Gesellschaft, Empa, Dübendorf.
- Angerer et al. 2009 Angerer G., Erdmann L., Marscheider-Weidemann F., Scharp M., Lüllmann A., Handke V. and Marwede M. (2009) Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe.
- Bartsch 2010 Bartsch C. (2010) E-Golf geht Ende 2013 ans Netz. In: VDI nachrichten, 10. Dezember 2010, Nr. 49, pp. 15.
- Bauer & Simons 2010 Bauer C. and Simons A. (2010) Ökobilanz der Elektromobilität - Analyse des e-Twingos der EKZ. Labor für Energiesystem-Analysen, Paul Scherrer Institut (PSI), Villigen.
- Berg & Real 2006 Berg M. and Real M. (2006) Road Map Erneuerbare Energien Schweiz. SATW-Schrift Nr. 39. Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften, SATW, Zürich, retrieved from: [www.satw.ch](http://www.satw.ch).
- BFE 2007a BFE (2007a) Die Energieperspektiven 2035 – Band 1. Bundesamt für Energie, Bern, CH, retrieved from: [www.bfe.admin.ch/themen/00526/00538/index.html?lang=de&dossier\\_id=01100](http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00538/index.html?lang=de&dossier_id=01100).
- BFE 2007b BFE (2007b) Die Energieperspektiven 2035 – Anhang zu den Bänden 2 und 5. Bundesamt für Energie, Bern, CH, retrieved from: [www.bfe.admin.ch/themen/00526/00538/index.html?lang=de&dossier\\_id=01100](http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00538/index.html?lang=de&dossier_id=01100).
- BFE 2010 BFE (2010) Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2009. Bundesamt für Energie, Bern, CH, retrieved from: [http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00541/00542/00630/index.html?lang=de&dossier\\_id=04840](http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00541/00542/00630/index.html?lang=de&dossier_id=04840).
- Boulouchos 2011 Boulouchos K. (2011) Mobilität der Zukunft: Herausforderungen, Optionen und Transformationspfade. In: 2. Schweizer Forum Elektromobilität (ed. Mobilitätsakademie), Verkehrshaus Luzern.
- BUWAL & INFRAS 2004 BUWAL and INFRAS (2004) HBEFA Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs, Version 2.1. BUWAL, Bern.
- Duleep et al. 2011 Duleep G., van Essen H., Kampman B. and Grünig M. (2011) Assessment of electric vehicle and battery technology. CE Delft, Delft.
- ecoinvent Centre 2010 ecoinvent Centre (2010) ecoinvent data v2.2, ecoinvent reports No. 1-25. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Switzerland, retrieved from: [www.ecoinvent.org](http://www.ecoinvent.org).
- European Commission 2003 European Commission (2003) Directive 2003/54/EC of the European Parliament and of the Council of 26 June 2003 concerning common rules for the internal market in electricity and repealing Directive 96/92/EC. European Commission; Commission of the European Communities, Brussels.
- Frischknecht et al. 2007 Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.-J., Bauer C., Doka G., Dones R., Hellweg S., Hischier R., Humbert S., Margni M. and Nemecek T. (2007) Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. ecoinvent report No. 3, v2.0. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH, retrieved from: [www.ecoinvent.org](http://www.ecoinvent.org).

- Frischknecht et al. 2008 Frischknecht R., Steiner R. and Jungbluth N. (2008) Methode der ökologischen Knappheit - Ökofaktoren 2006. Umwelt-Wissen Nr. 0906. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern, retrieved from: [www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01031/index.html?lang=de](http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01031/index.html?lang=de).
- Frischknecht & Stucki 2010 Frischknecht R. and Stucki M. (2010) Scope-dependent modelling of electricity supply in life cycle assessments. In: *Int J LCA*, 15(8), pp. 806-816, retrieved from: DOI: 10.1007/s11367-010-0200-7.
- Helms & Lambrecht 2007 Helms H. and Lambrecht U. (2007) The Potential Contribution of Light-Weighting to Reduce Transport Energy Consumption. In: *Int J LCA*, 1(Special Issue 12), pp. 58-64.
- Höpfner et al. 2009 Höpfner U., Hanusch J. and Lambrecht U. (2009) Abwrackprämie und Umwelt - eine erste Bilanz. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, ifeu, Heidelberg.
- Horst et al. 2009 Horst J., Frey G. and Leprich U. (2009) Auswirkungen von Elektroautos auf den Kraftwerkspark und die CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland. WWF Deutschland, Frankfurt am Main.
- IPCC 2007 IPCC (2007) The IPCC fourth Assessment Report. Cambridge University Press., Cambridge.
- Ishihara et al. 2002 Ishihara K., Kihira N., Terada N., Iwahori T. and Nishimura K. (2002) Life cycle analysis of large-size lithium-ion secondary batteries developed in the Japanese national project. In proceedings from: 5th Ecobalance conference, November 2002, Tsukuba.
- Jakob et al. 2009 Jakob M., Volkart K. and D. W. (2009) CO<sub>2</sub>-Intensität des Stromabsatzes an Schweizer Kunden. TEP Energy GmbH, Zürich.
- Maxell 2003 Maxell (2003) Annual Report 2003. Hitachi Maxell Ltd., Tokyo, retrieved from: <http://biz.maxell.com/corporate/library/annual2003.html>.
- Meier 2010 Meier H. (2010) Fahrzeugtest Elektromobil Think City / Alpmobil touring club suisse schweiz svizzera, Emmen/Luzern.
- Meridian International Research 2008 Meridian International Research (2008) The trouble with Lithium 2. Under the Microscope. Meridian International Research, Martainville, retrieved from: [www.meridian-int-res.com/Projects/Lithium\\_Microscope.pdf](http://www.meridian-int-res.com/Projects/Lithium_Microscope.pdf).
- Notter et al. 2010 Notter D., Gauch M., Widmer R., Wäger P., Stamp A., Zah R. and Althaus H.-J. (2010) Contribution of Li-Ion Batterie to the Environmental Impact of Electric Vehicles. In: *Environ Sci. Technol.*, online, pp., DOI: 10.1021/es903729a.
- Suh 2010 Suh S. (2010) CEDA 4.0 User's Guide. Bren School of Environmental Science and Management, University of California, Santa Barbara.
- VCS 2010 VCS (2010) Auto Umweltliste 2010. Verkehrs-Club der Schweiz, Bern.
- VCS 2011 VCS (2011) Auto Umweltliste 2011. Verkehrs-Club der Schweiz, Bern.
- VDE 2010 VDE (2010) Elektrofahrzeuge - Bedeutung, Stand der Technik, Handlungsbedarf. Energietechnische Gesellschaft im Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., Frankfurt am Main.
- Zackrisson et al. 2010 Zackrisson M., Avellán L. and Orlenius J. (2010) Life cycle assessment of lithium-ion batteries for plug-in hybrid electric vehicles - Critical issues. In: *Journal of Cleaner Production*, 18(15), pp. 1517-1527.
- Zajec 2010 Zajec C. (2010) China - Herr über die seltenen Erden. In: *Le Monde Diplomatique*, Nr. 9342, 12.11.2010, pp. 1, 6-7.



## Anhang

### Konzept der Primärenergiefaktoren

Die Primärenergiefaktoren sind ein Maß für die Menge an Energiere Ressourcen, die erforderlich sind, um ein Produkt, beispielsweise 1 kWh Strom, bereitzustellen. Bei Kernenergie gehen beispielsweise zwei Drittel der in den Brennstäben enthaltenen Energie über die Kühltürme verloren. Zudem wird in der Bereitstellungskette zusätzlich weitere Energie benötigt. Deshalb liegt der Primärenergiefaktor von Kernenergiestrom bei 4.1 kWh (14.6 MJ) Öl-<sub>eq</sub> pro kWh Strom.

Beim Konzept des Primärenergieaufwandes wird die aus der Natur geerntete Energie bewertet. Das sind die den Minen entnommenen Mengen an Rohsteinkohle, spaltbarem Uran oder Rohöl einerseits und die in technischen Anlagen verfügbaren Energiemengen bei den Kraftwerken auf Basis erneuerbarer Energien andererseits (siehe Poster auf der nächsten Seite). Diese Vorgehensweise wurde in der Expertengruppe desecoinvent Zentrums im Jahr 2007 diskutiert und einstimmig verabschiedet.

# Renewable Energy Assessment within the Cumulative Energy Demand Concept: Challenges and Solutions



Rolf Frischknecht<sup>1</sup>, Hans-Jörg Althaus<sup>2</sup>, Roberto Dones<sup>3</sup>, Roland Hischier<sup>2</sup>, Niels Jungbluth<sup>4</sup>, Thomas Nemecek<sup>3</sup>, Alex Primas<sup>5</sup>, Gregor Wernet<sup>7</sup>

<sup>1</sup>ecoinvent Centre, Empa, Überlandstrasse 129, 8600 Dübendorf, Switzerland  
<sup>2</sup>Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research (Empa), <sup>3</sup>Paul Scherrer Institute (PSI),  
<sup>4</sup>ESU-services Ltd., <sup>5</sup>Agroscope Reckenholz-Tänikon Research Station (ART),  
<sup>6</sup>Basler & Hofmann, <sup>7</sup>Swiss Federal Institute of Technology Zürich (ETHZ)



## Problem setting and Thesis

Cumulative Energy Demand (CED) lacks sound and consistent foundation. Different concepts exist:

- resource conservation: only non renewable energy
- climate change oriented: only fossil energy
- proxy indicator: non renewable plus hydro energy
- "total energy demand": all energy sources

CED sometimes even considered as part of LCI!  
 How to account for renewable energy sources?

### Thesis:

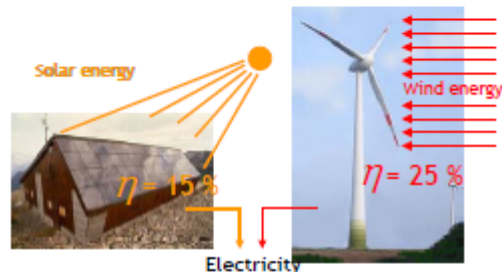
Renewable energy *harvested* is the key information from a total energy demand perspective leading to best achievable consistency.

## Weighting factors in CED

The weighting factors of Cumulative Energy Demand are determined based on the following concept:

- energy resources do have an intrinsic value
- intrinsic value of energy resource is determined by the energy extractable with today's technology
- no other aspects (such as substitutability, suitability for storage) add to this intrinsic value

## Harvesting efficiencies of energy resources



System boundaries are not the same. Conversion efficiency of solar energy to electricity via photovoltaics is different from the conversion efficiency of kinetic energy in wind to electricity from wind power. To be consistent with photovoltaics, the solar energy required to "produce" kinetic energy would be the appropriate input to calculate the wind power conversion efficiency. The same would apply on fossil energy sources as well. This is neither sensible from a resource protection perspective (sun energy is unlimited in a human time scale) nor practical.

## Harmonisation: amount harvested

Life cycle inventories of processes harvesting renewable and non renewable energy resources need harmonisation. The amount of energy *harvested*, not the amount of solar irradiation ultimately required is more suited and thus registered in the inventory:

|  |   |
|--|---|
| <p>IN: energy in lignite extracted</p> <p>OUT: lignite fuel</p> <p>Harvesting efficiency: 100 %</p>                  | <p>IN: energy in Uranium extracted and finally burnt-up in LWR</p> <p>OUT: nuclear fuel</p> <p>Harvesting efficiency: 100 %</p> |
| <p>IN: energy in wood felled</p> <p>OUT: round, industrial and residual wood</p> <p>Harvesting efficiency: 100 %</p> | <p>IN: rotation energy transmitted to gearbox</p> <p>OUT: electricity</p> <p>Harvesting efficiency: 93 %</p>                    |
| <p>IN: electric energy transmitted to inverter</p> <p>OUT: electricity</p> <p>Harvesting efficiency: 93.5 %</p>      | <p>IN: rotation energy transmitted to generator</p> <p>OUT: electricity</p> <p>Harvesting efficiency: 95 %</p>                  |

The CED factor of the renewable energy IN is weighted with  $1 \text{ MJ-eq/MJ}_{IN}$

## Conclusions

- Consistent modelling of energy resource input
- "Amount harvested" is most sensible and practical

## **Dominanzanalyse Strombereitstellung**

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen in %-Anteilen die wesentlichen Beiträge des kumulierten Energieaufwandes (erneuerbar und nicht erneuerbar), der Treibhausgas-Emissionen, der Gesamtumweltbelastung in Umweltbelastungspunkten (Ökologische Knappheit 2006) und der radioaktiven Abfälle. Die Bilanzen beziehen sich jeweils auf 1 kWh geliefert an die Niederspannungs-Steckdose des Kunden.

Wo nicht anders vermerkt, ist in den Flussdiagrammen ein Abschneidekriterium von 5 % angewendet worden.

Die Graphiken sind im Ausdruck teilweise schlecht lesbar. Auf dem Bildschirm sollten sie jedoch bei angemessener Vergrößerung lesbar sein.

Produktionsmix Schweiz

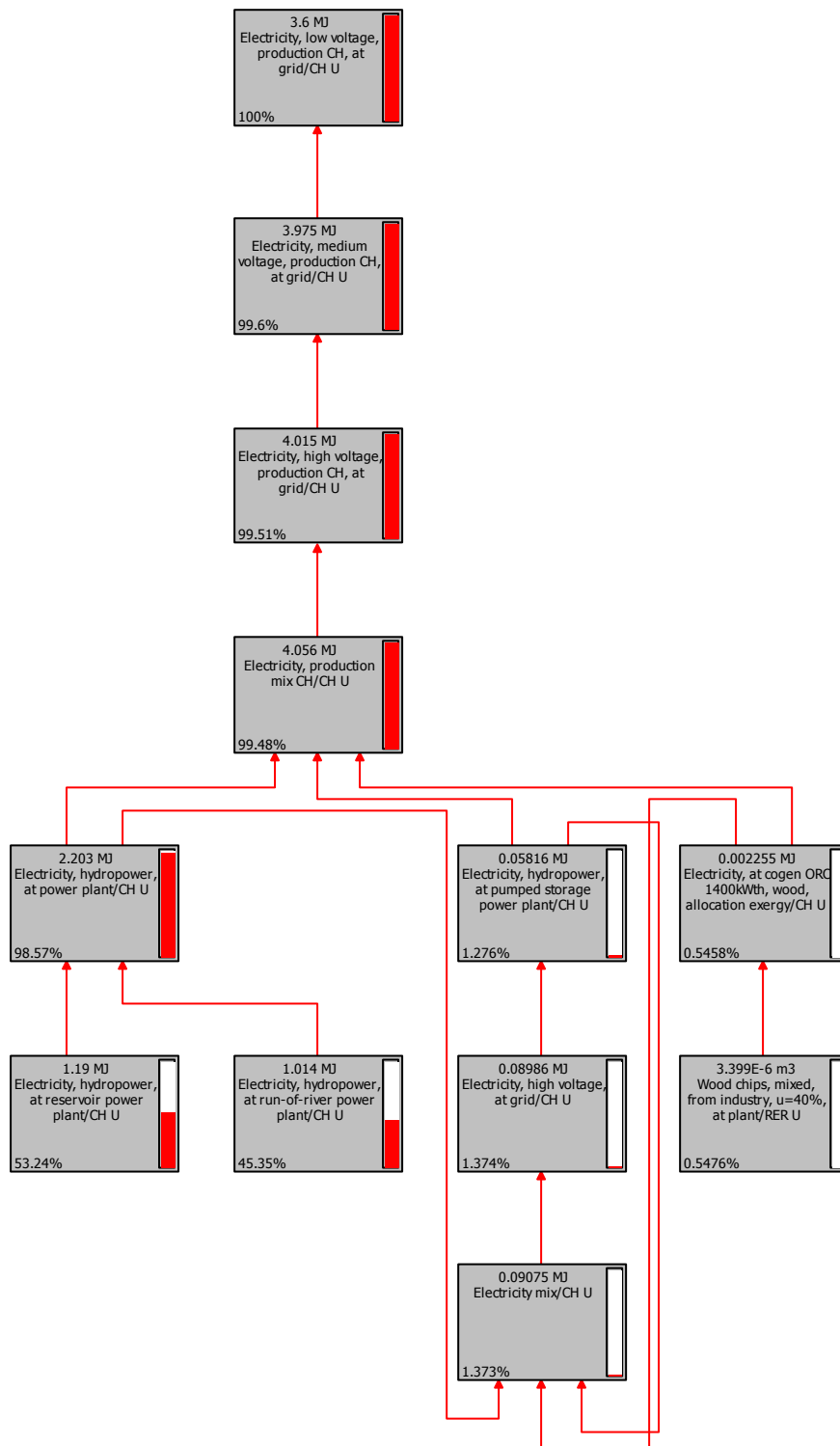


Abbildung A 1 Herkunft Kumulierter Energieaufwand, erneuerbar, Produktionsmix Schweiz

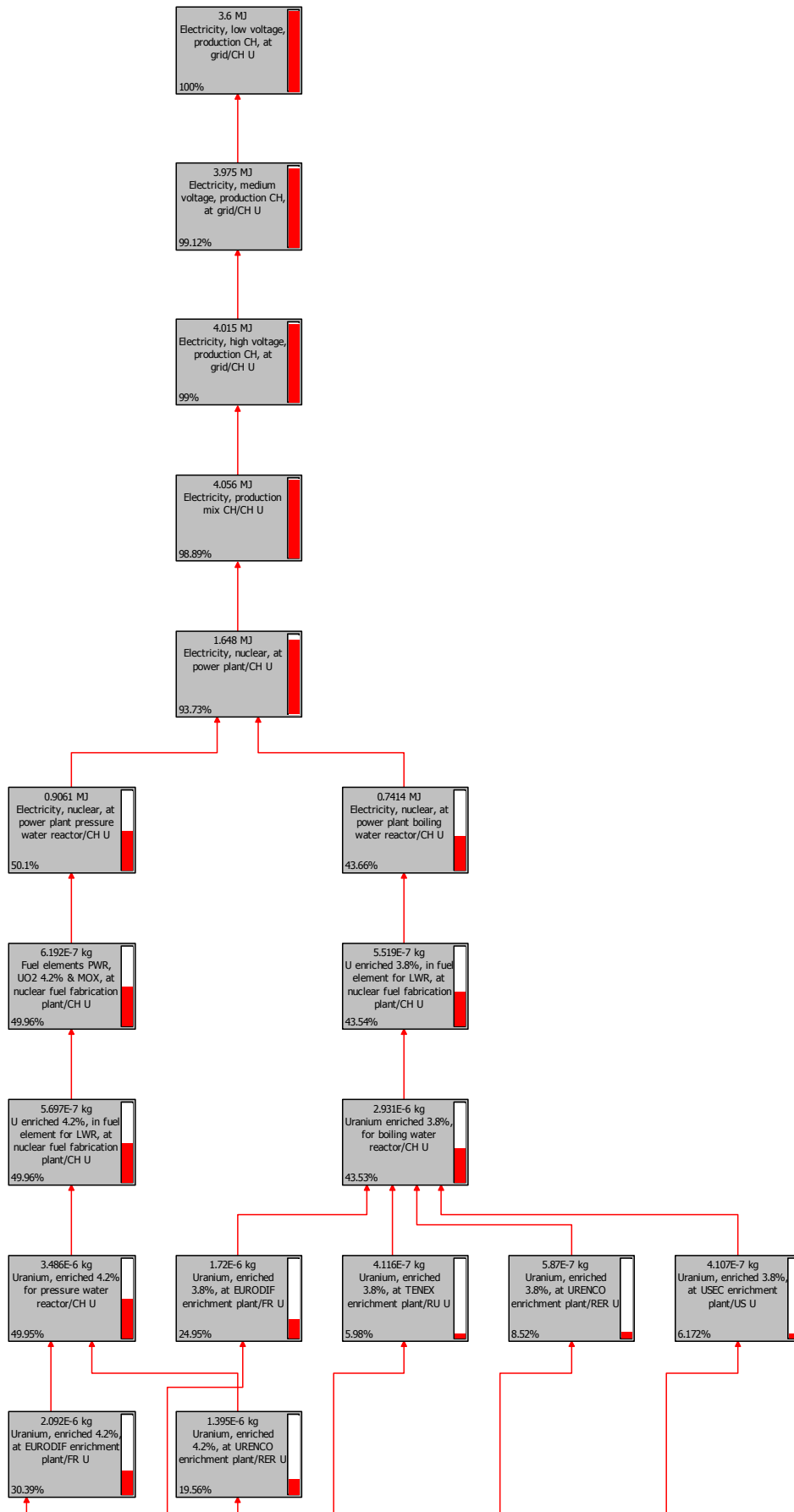


Abbildung A 2 Herkunft Kumulierter Energieaufwand, nicht erneuerbar, Produktionsmix Schweiz

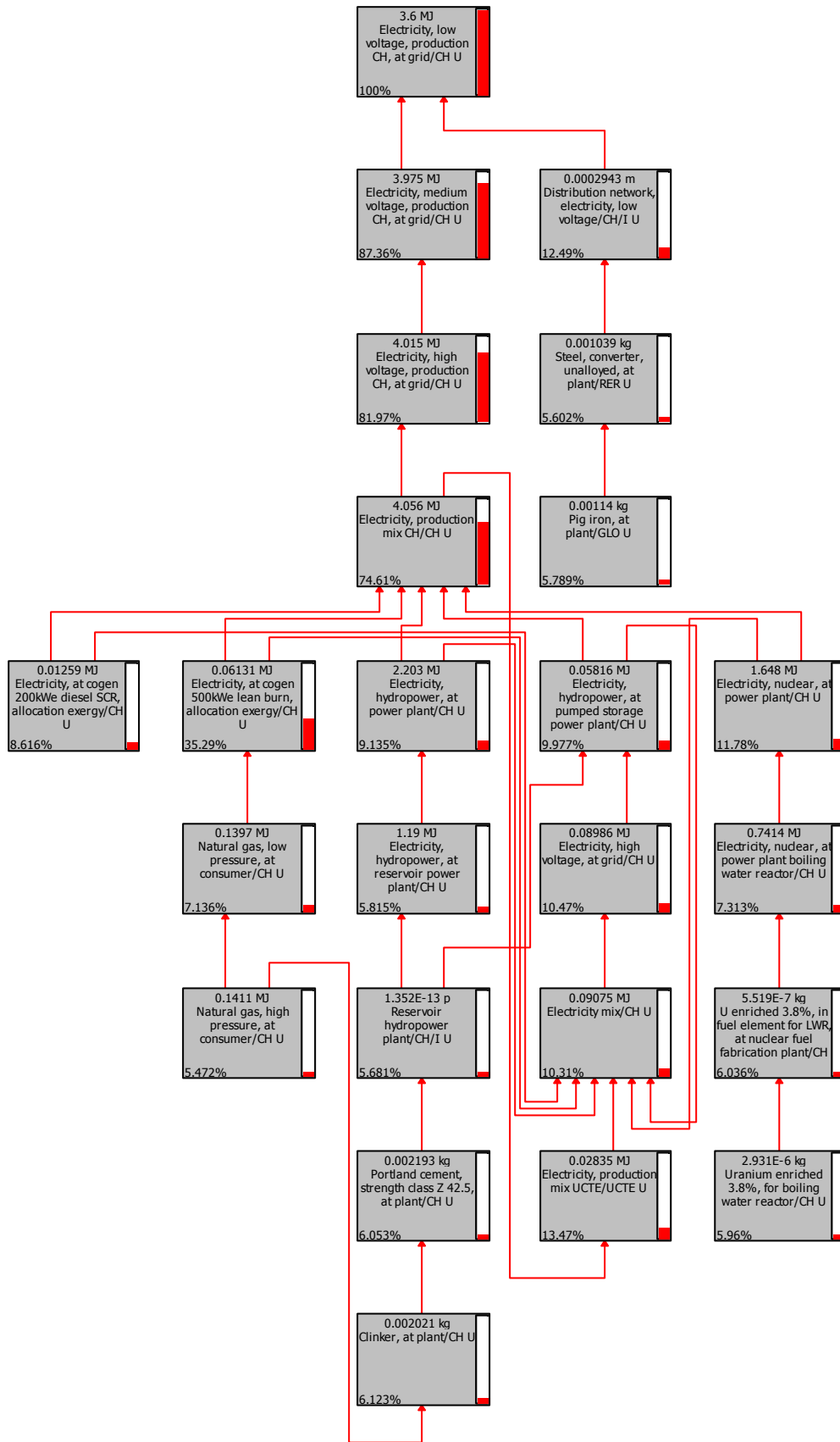


Abbildung A 3 Herkunft Treibhausgas-Emissionen, Produktionsmix Schweiz

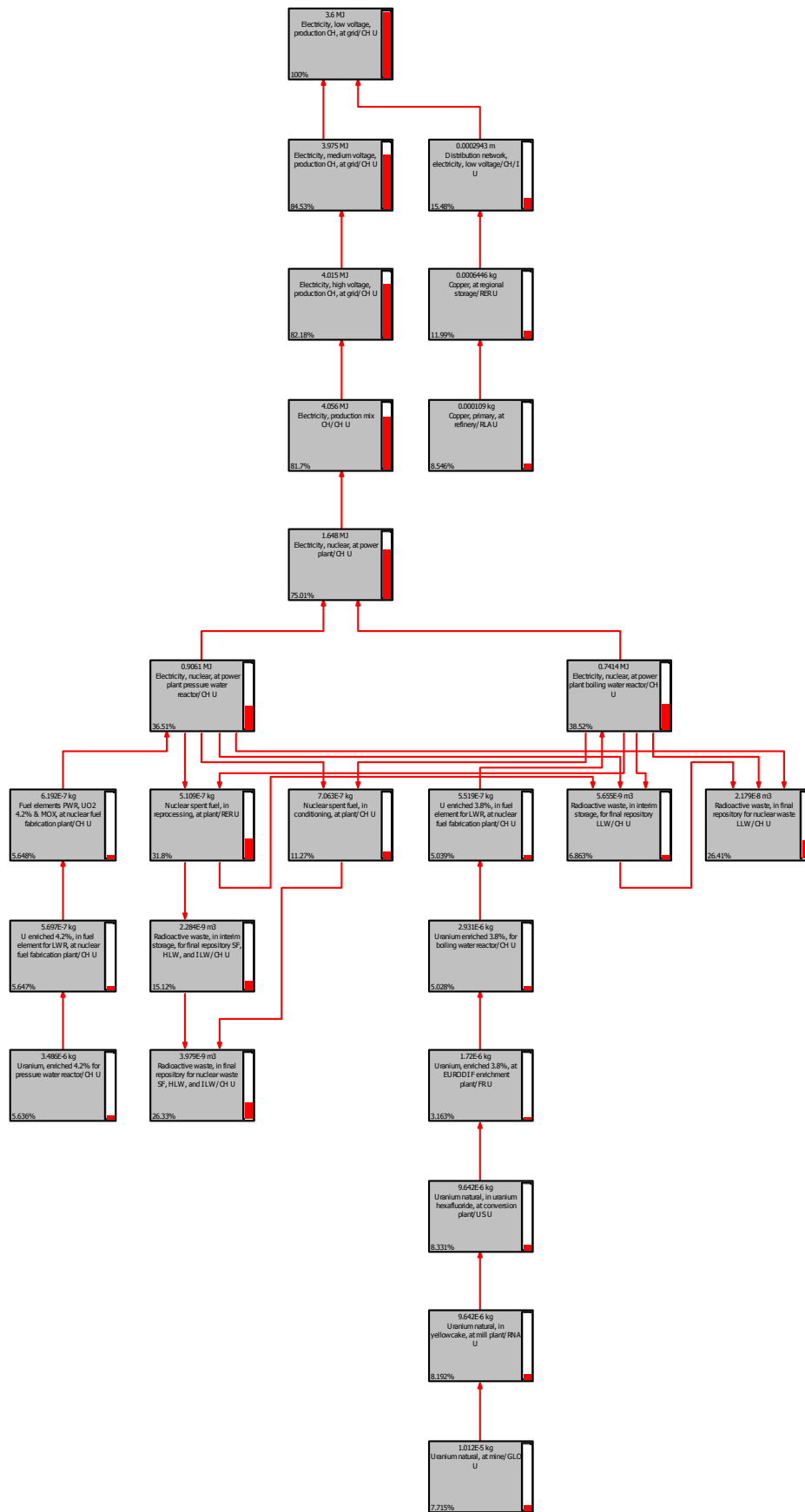


Abbildung A 4 Herkunft Umweltbelastung (Methode der ökologischen Knappheit 2006), Produktionsmix Schweiz

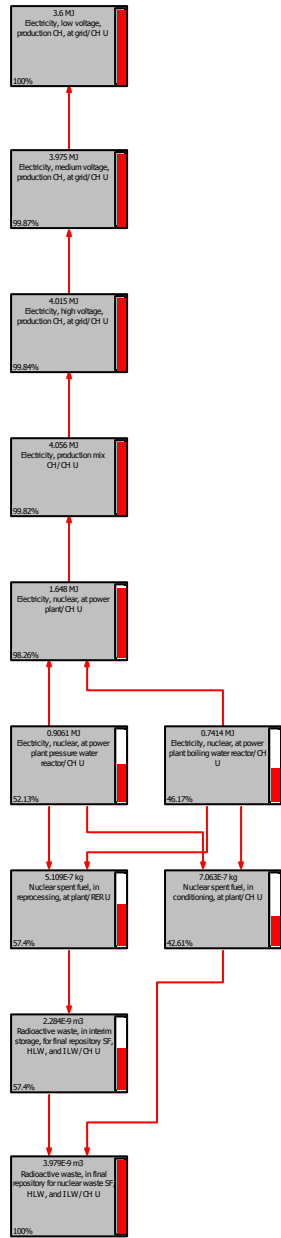


Abbildung A 5 Herkunft radioaktive Abfälle, Produktionsmix Schweiz



Konsummix Schweiz (exkl. Anteil zertifizierter Strom)

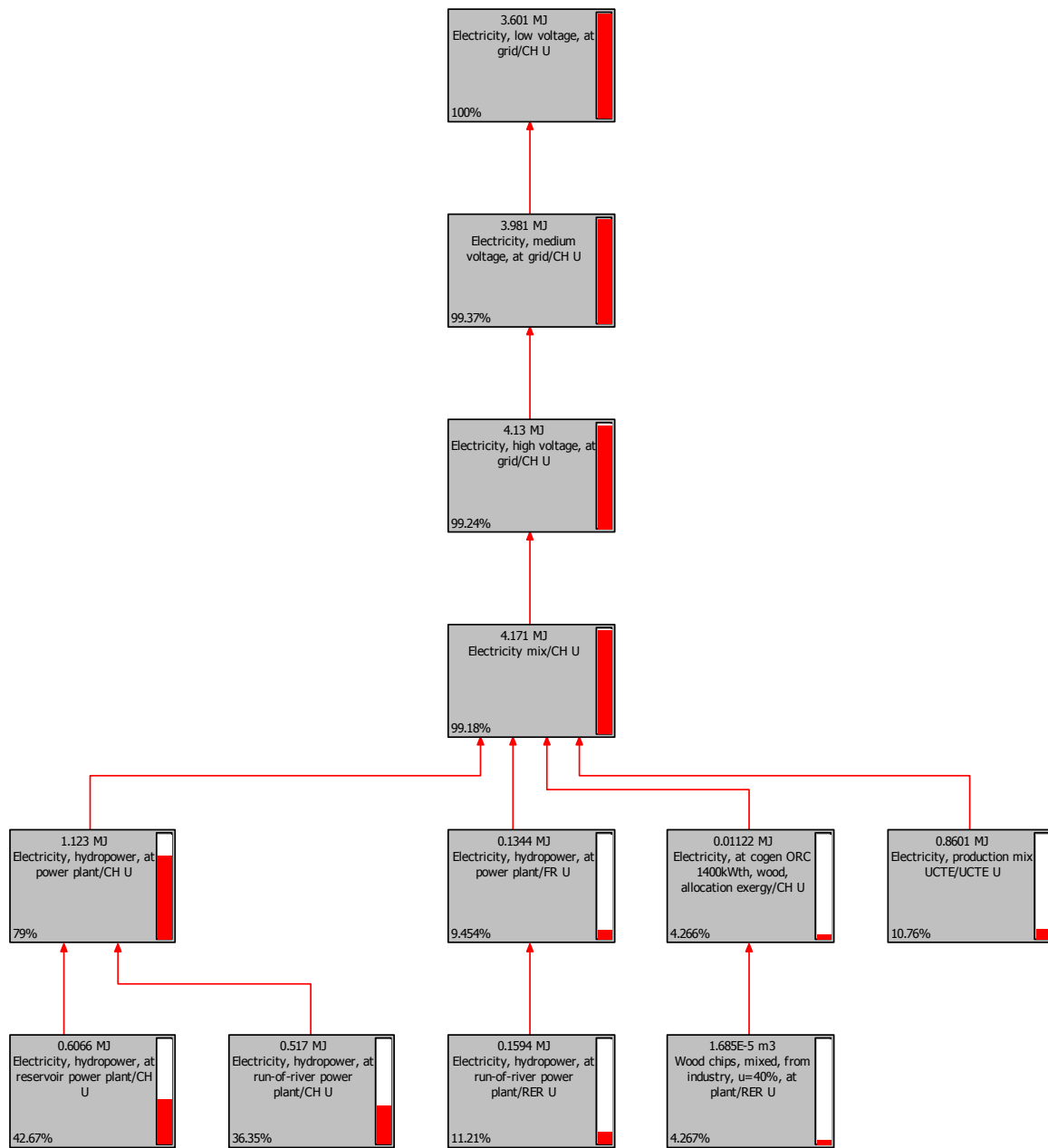


Abbildung A 6 Herkunft Kumulierter Energieaufwand, erneuerbar, Konsummix Schweiz

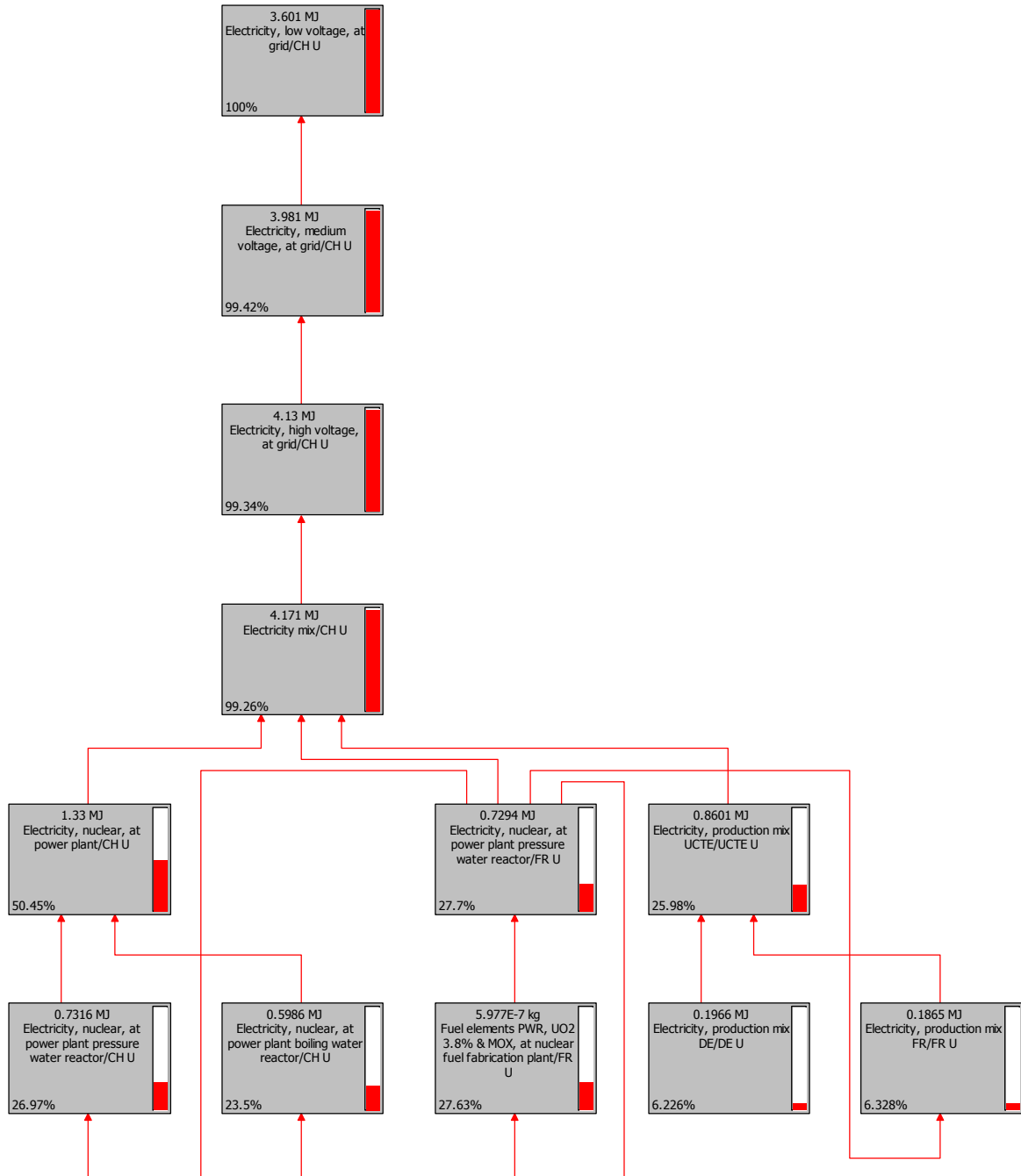


Abbildung A 7 Herkunft Kumulierter Energieaufwand, nicht erneuerbar, Konsummix Schweiz

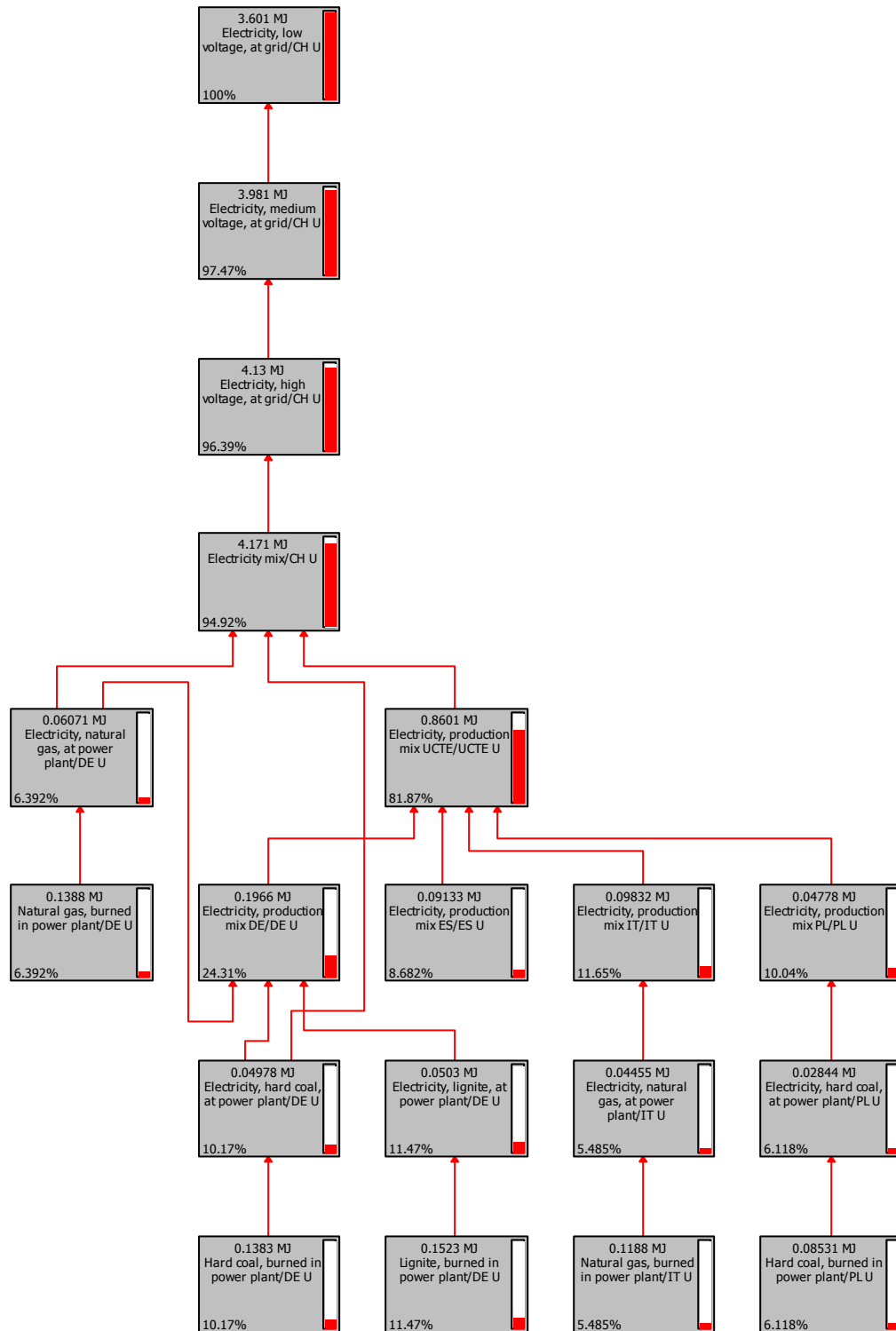


Abbildung A 8 Herkunft Treibhausgas-Emissionen, Konsummix Schweiz

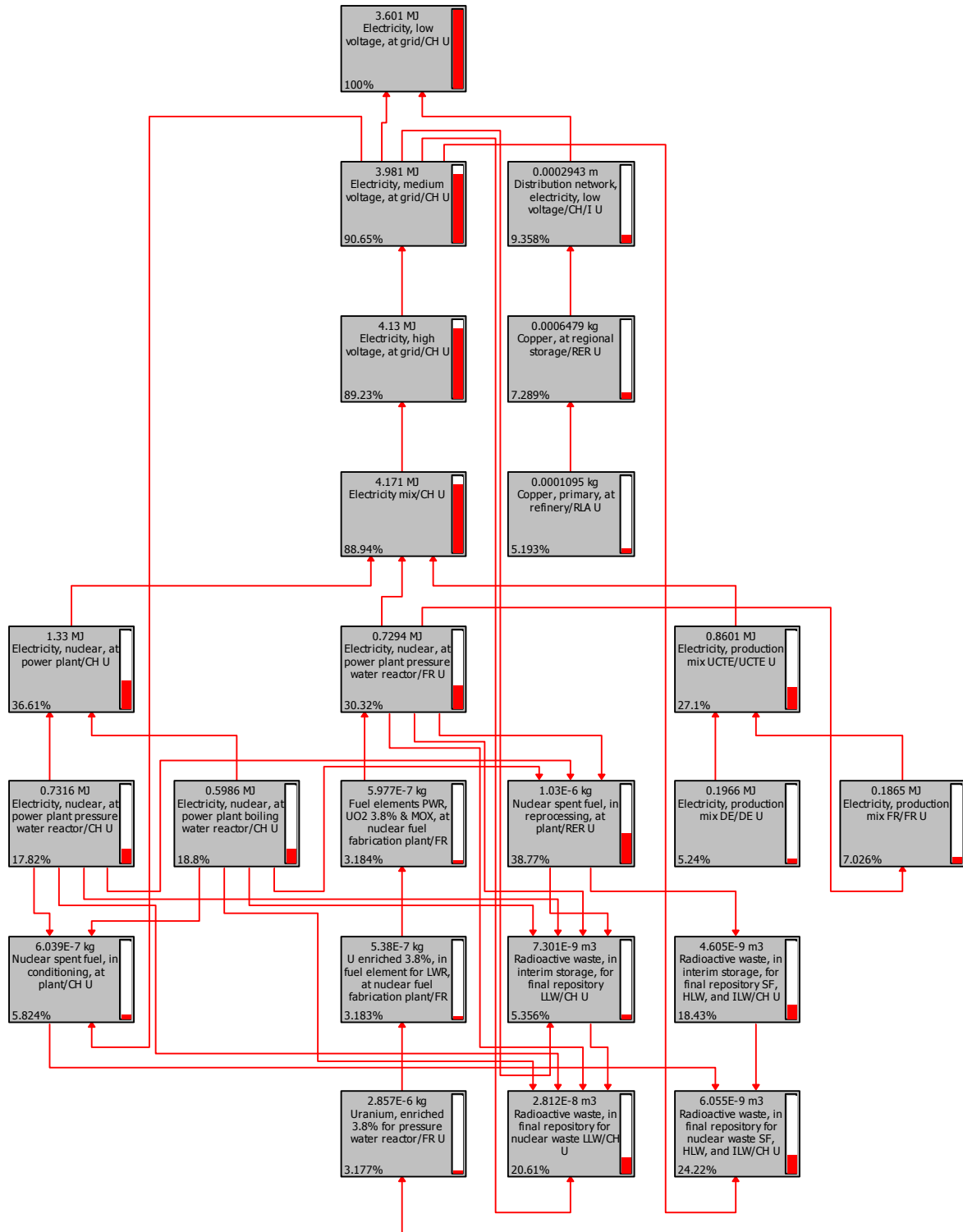


Abbildung A 9 Herkunft Umweltbelastung (Methode der ökologischen Knappheit 2006), Konsummix Schweiz

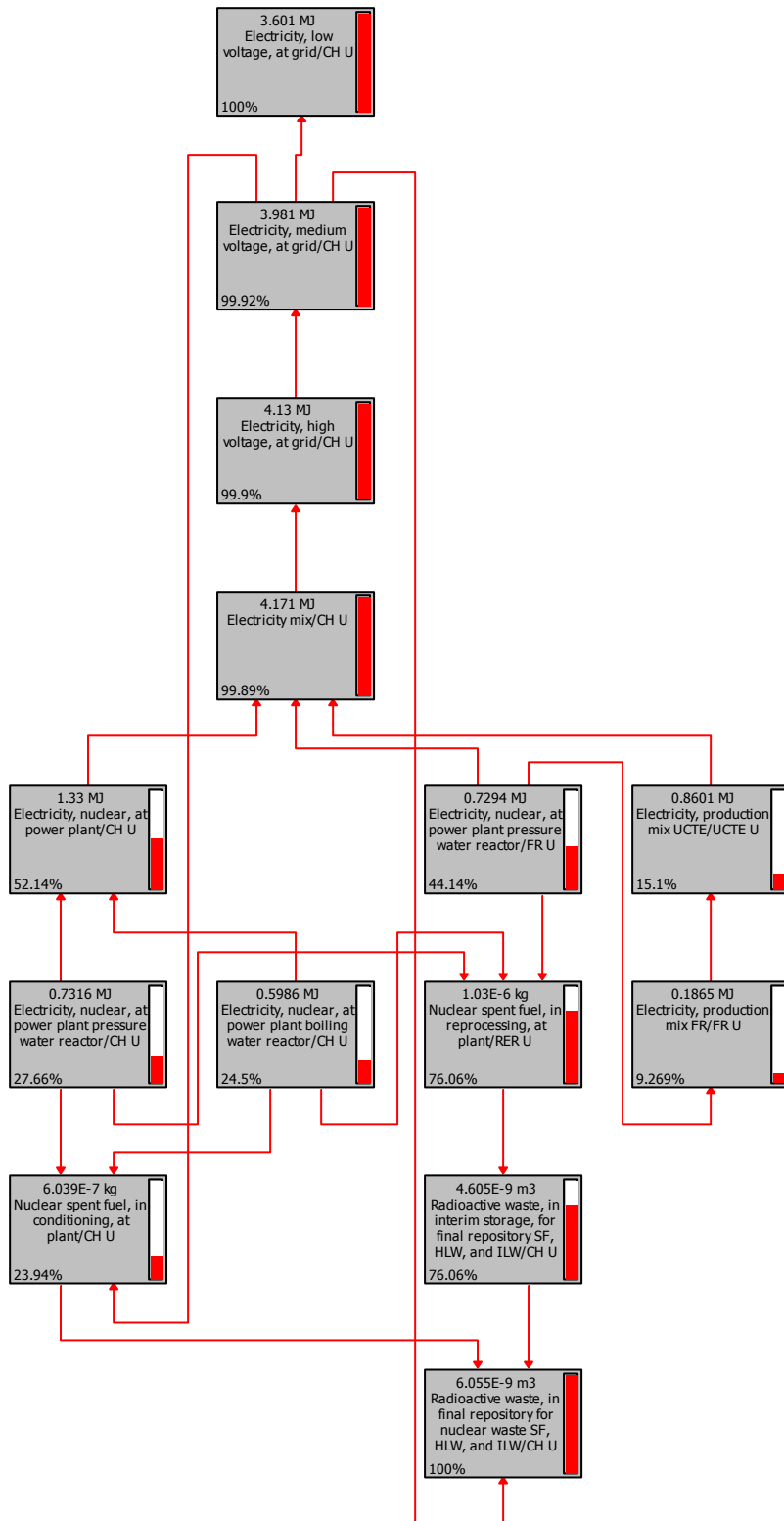


Abbildung A 10 Herkunft radioaktive Abfälle, Konsummix Schweiz

Versorgungsmix Schweiz, BFE 2007

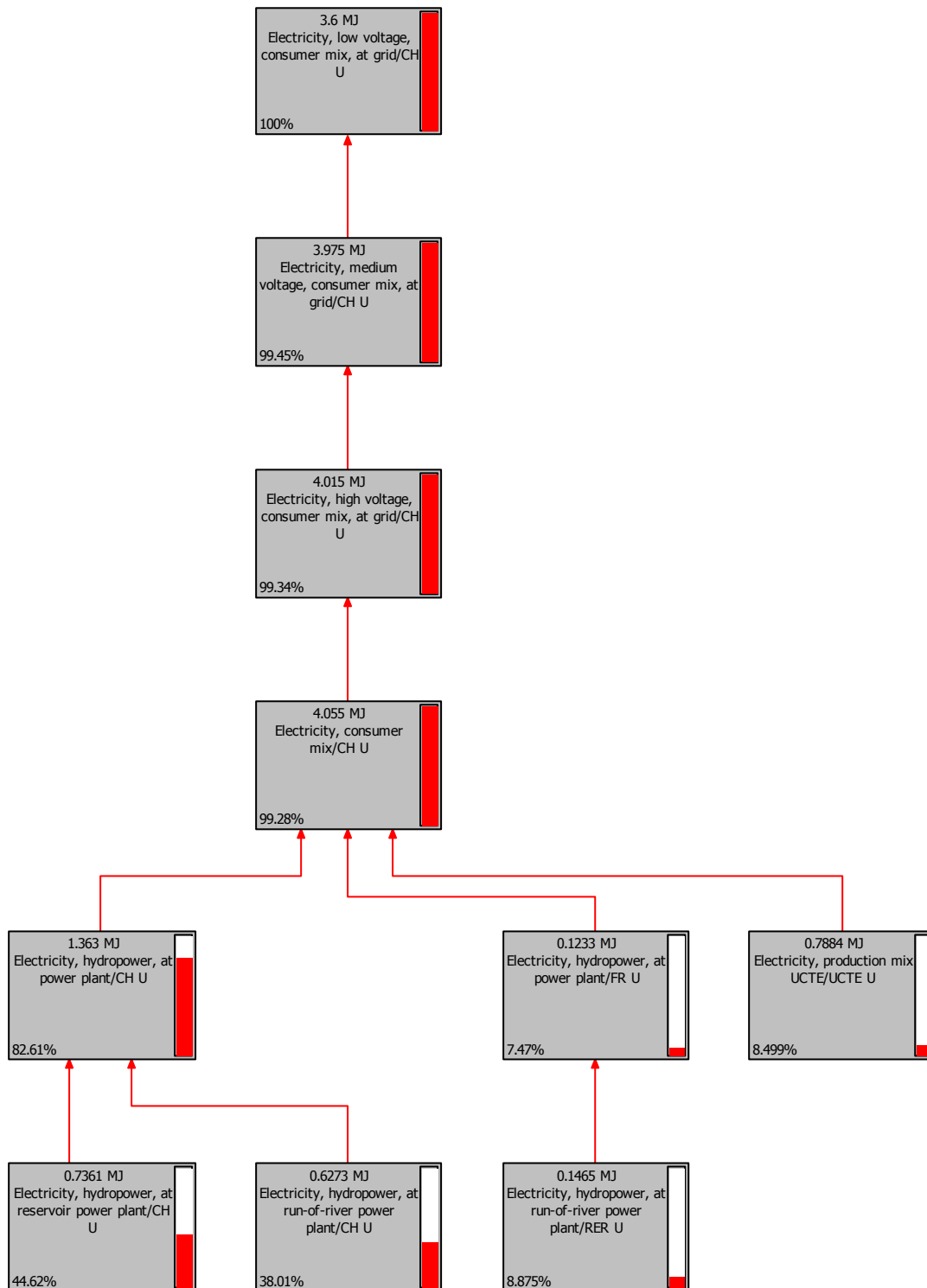


Abbildung A 11 Herkunft Kumulierter Energieaufwand, erneuerbar, Versorgungsmix Schweiz BFE 2007

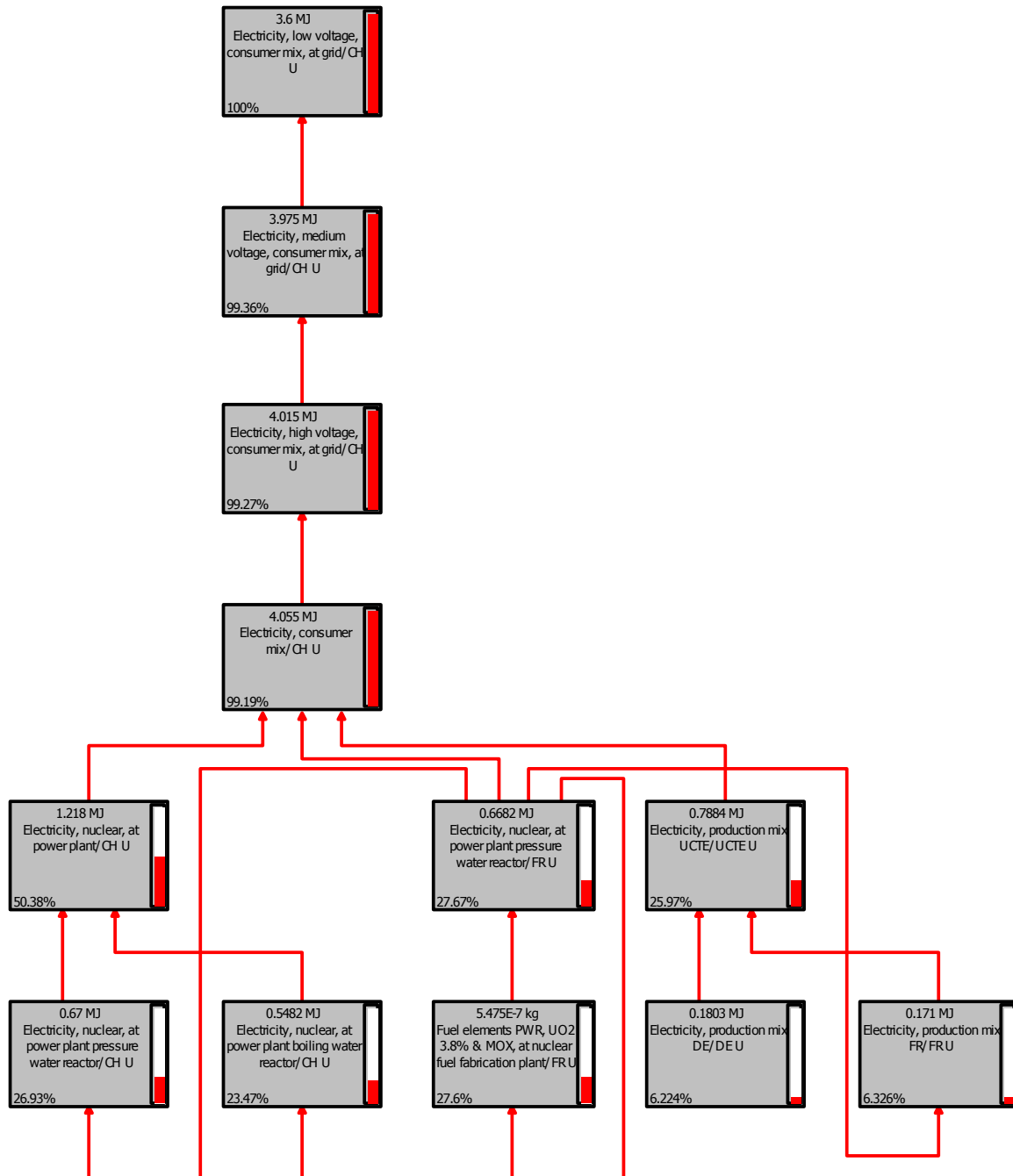


Abbildung A 12 Herkunft Kumulierter Energieaufwand, nicht erneuerbar, Versorgungsmix Schweiz BFE 2007

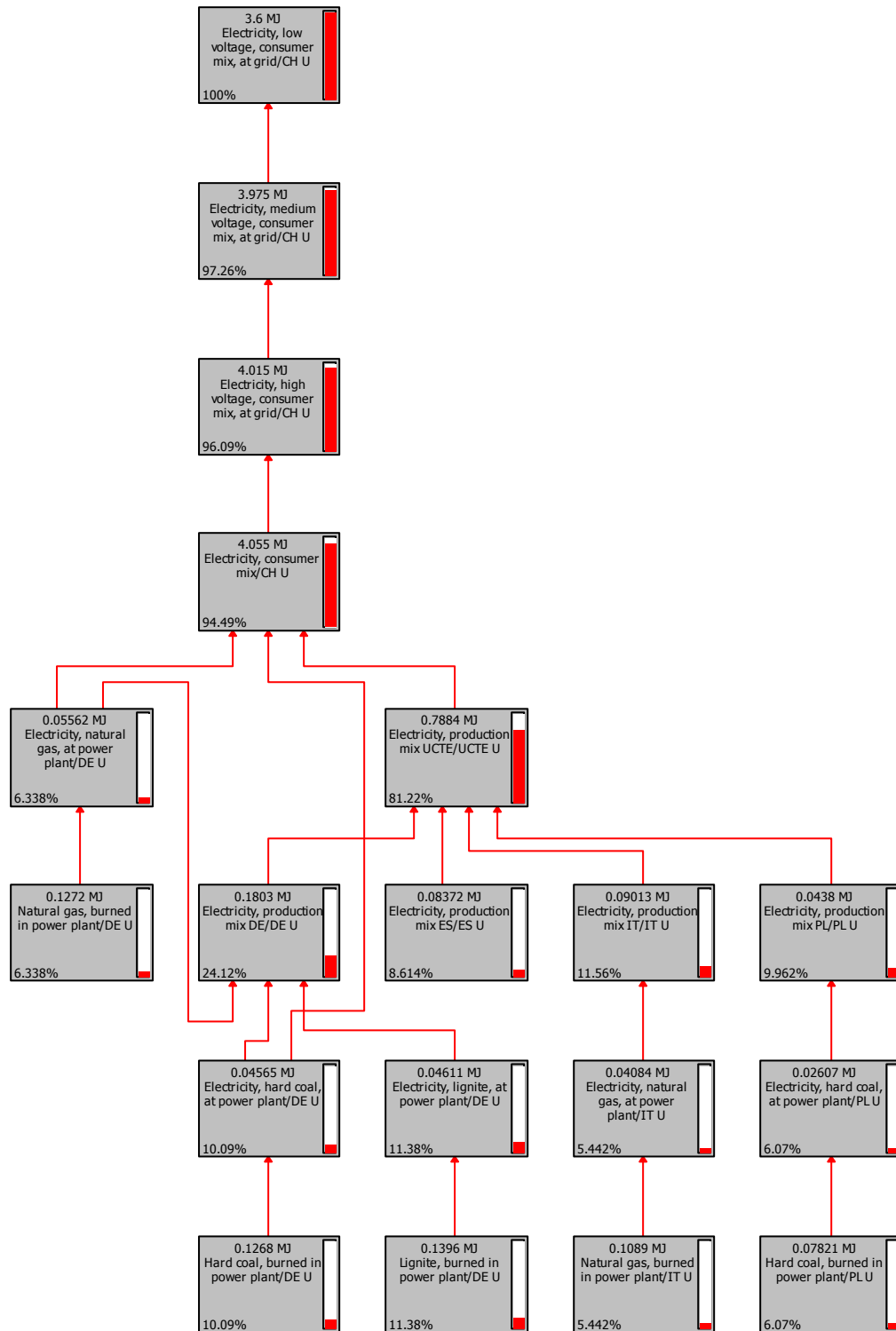


Abbildung A 13 Herkunft Treibhausgas-Emissionen, Versorgungsmix Schweiz BFE 2007



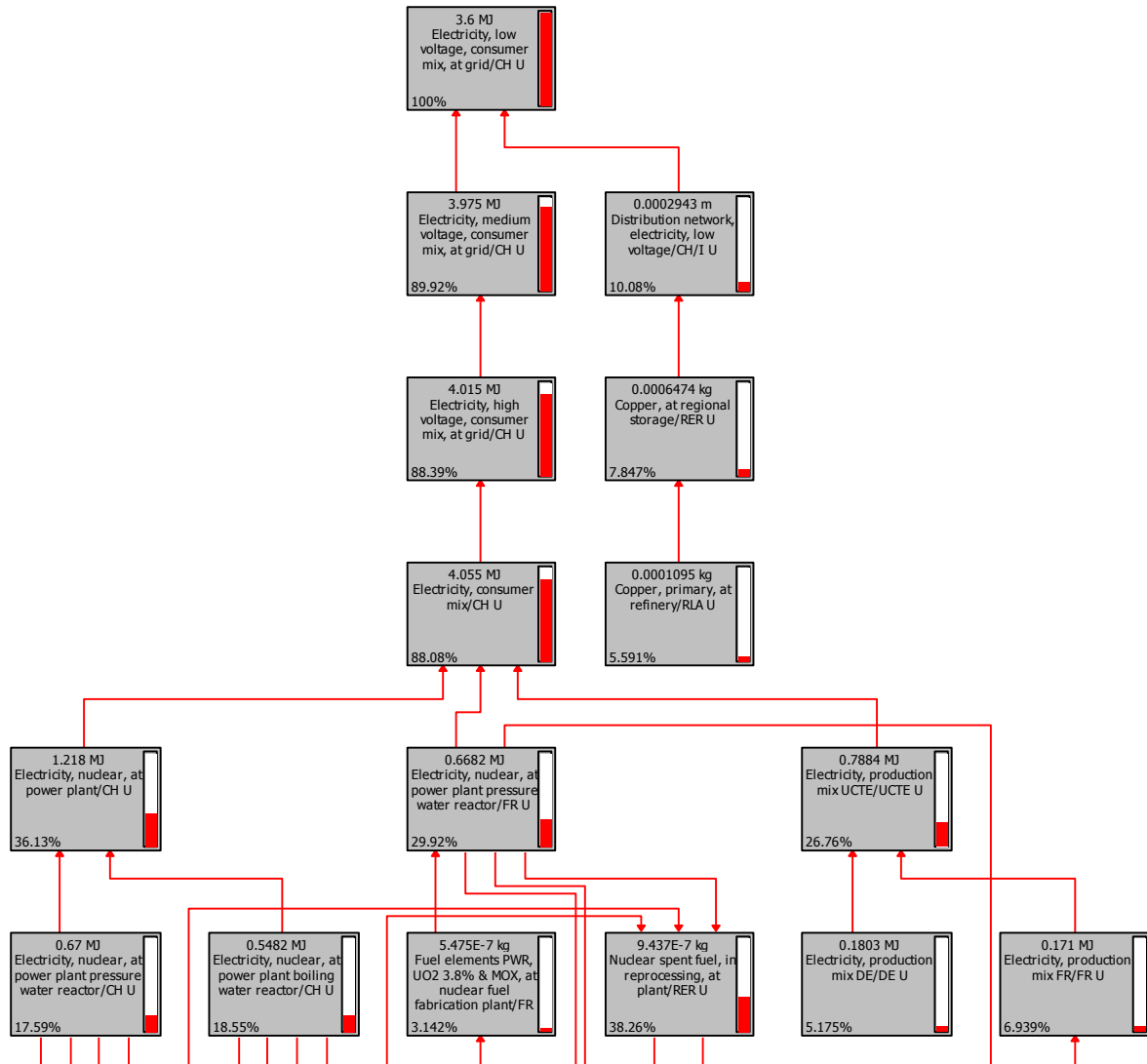


Abbildung A 14 Herkunft Umweltbelastung (Methode der ökologischen Knappheit 2006), Versorgungsmix Schweiz BFE 2007

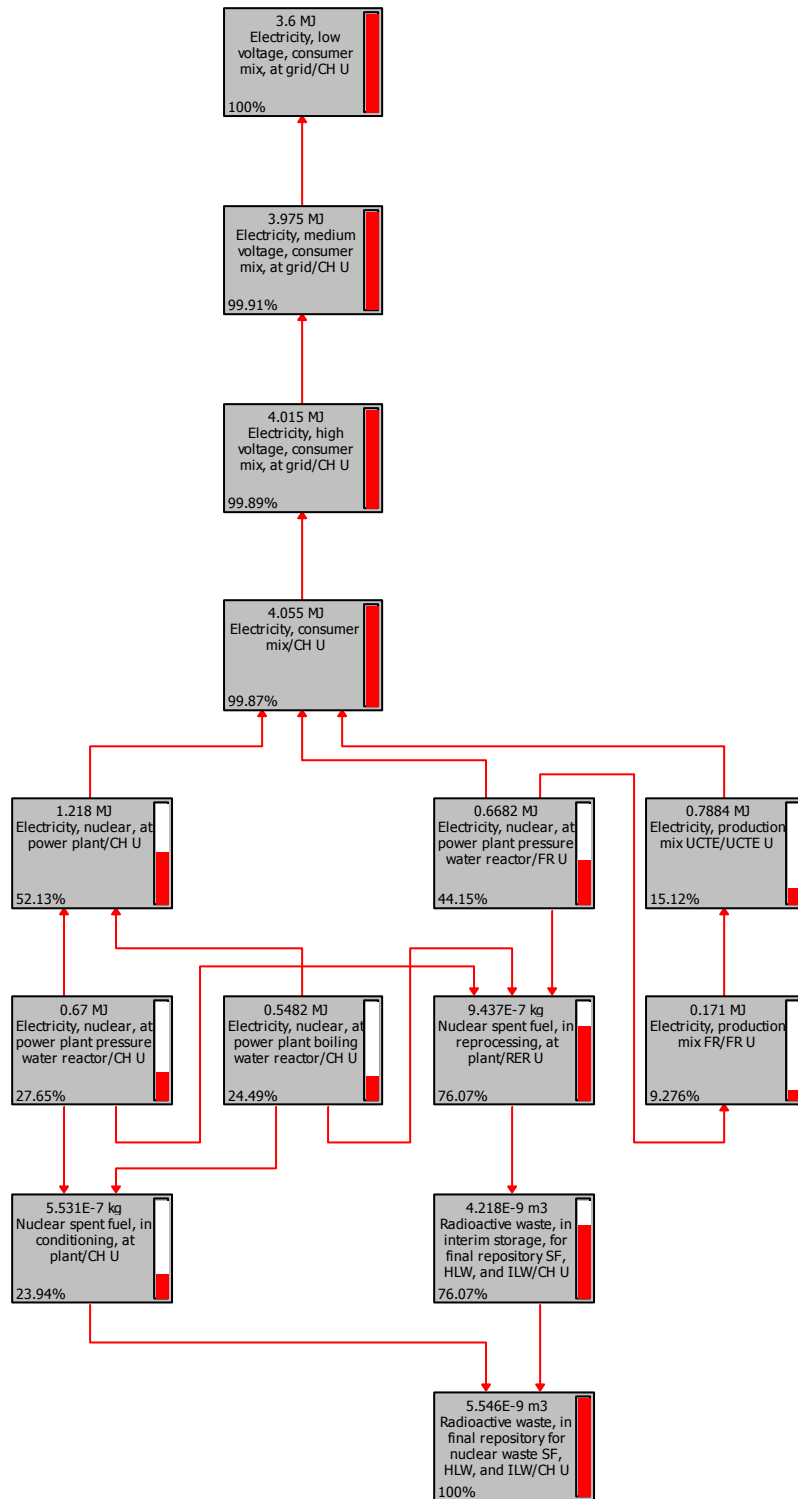


Abbildung A 15 Herkunft radioaktive Abfälle, Versorgungsmix Schweiz BFE 2007

Zertifizierter Strommix Schweiz

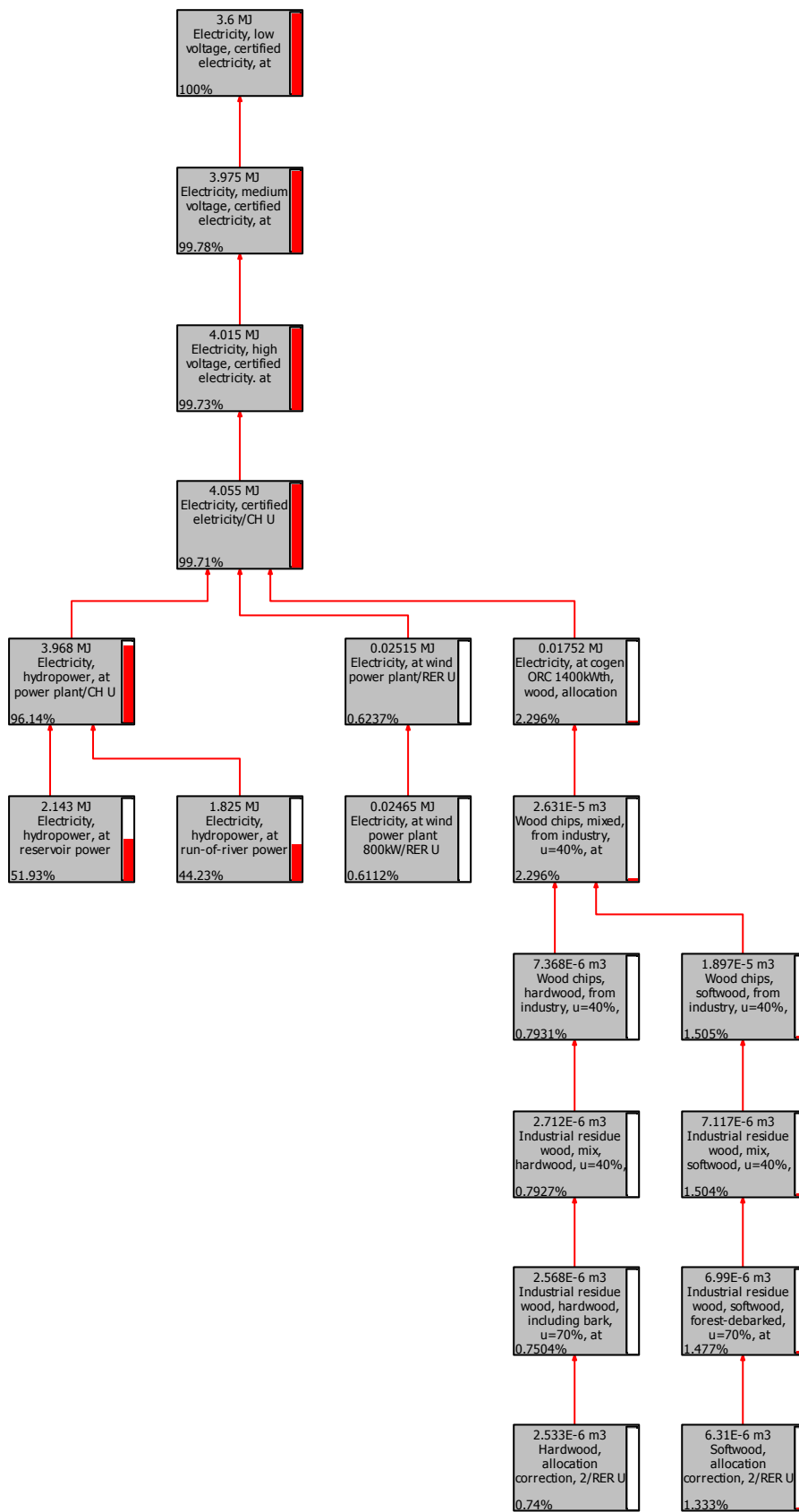


Abbildung A 16 Herkunft Kumulierter Energieaufwand, erneuerbar, Zertifizierter Strommix Schweiz, Abschneidekriterium 0.5 %

# Anhang

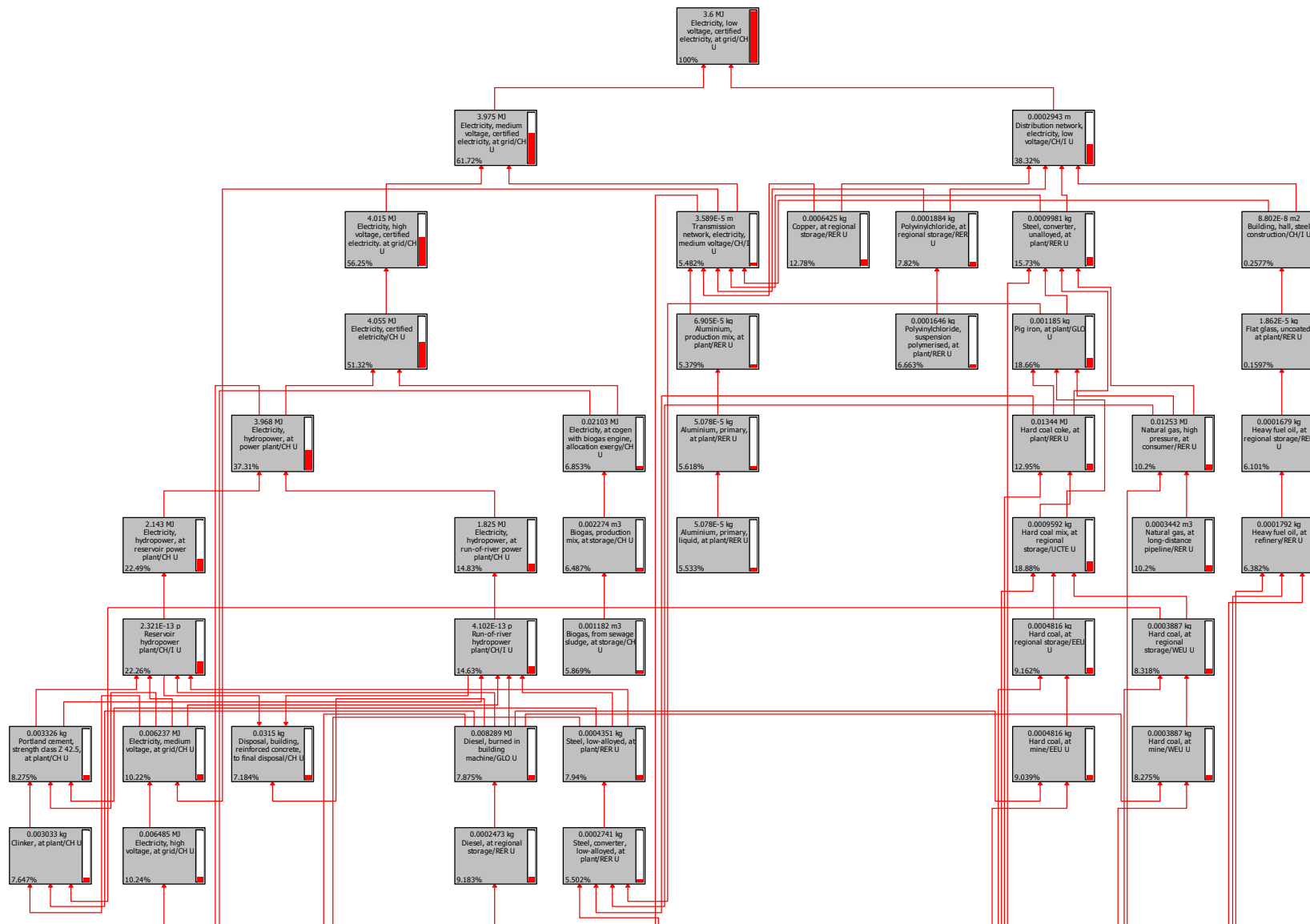


Abbildung A 17 Herkunft Kumulierter Energieaufwand, nicht erneuerbar, Zertifizierter Strommix Schweiz

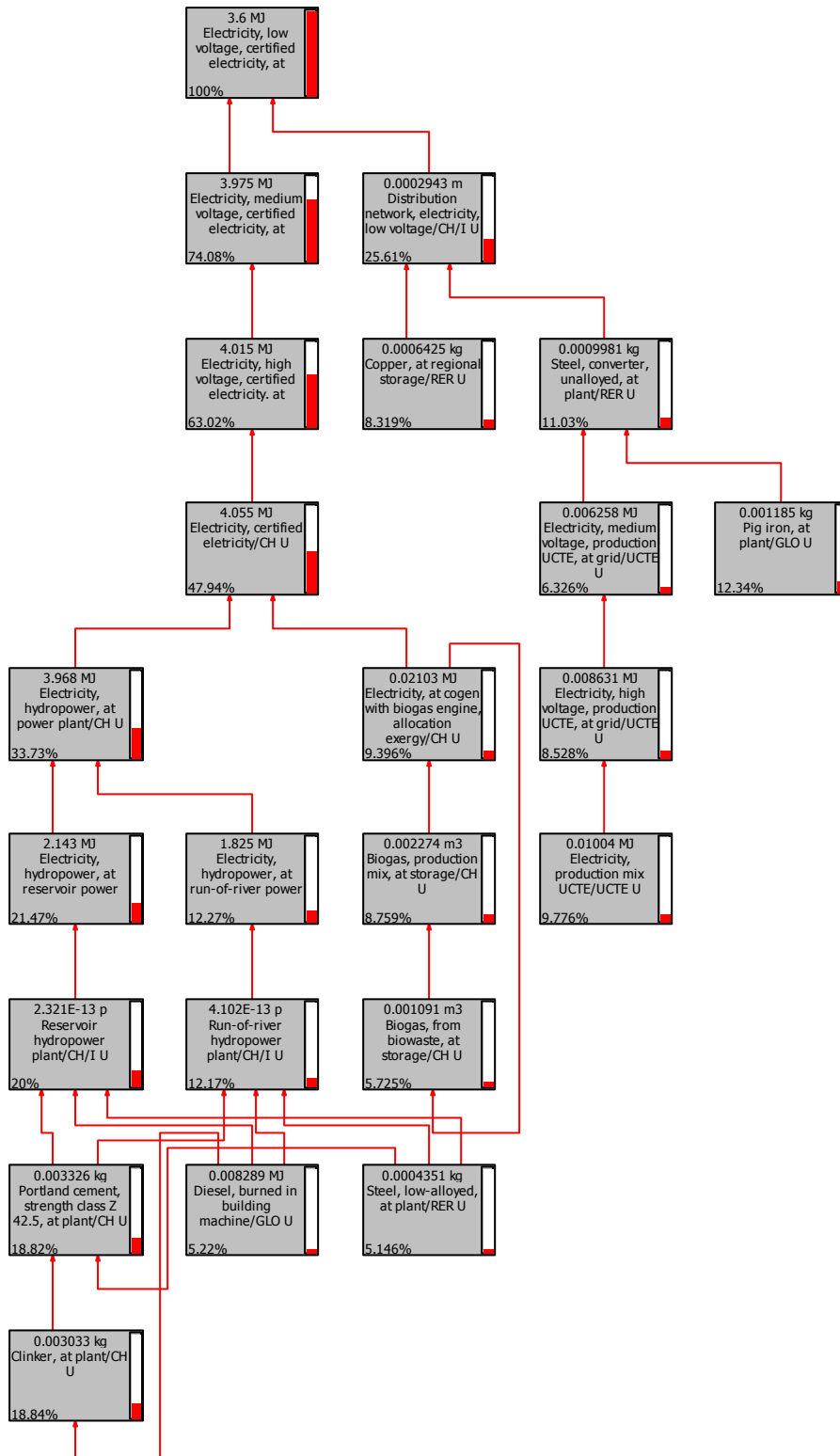


Abbildung A 18 Herkunft Treibhausgas-Emissionen, Zertifizierter Strommix Schweiz

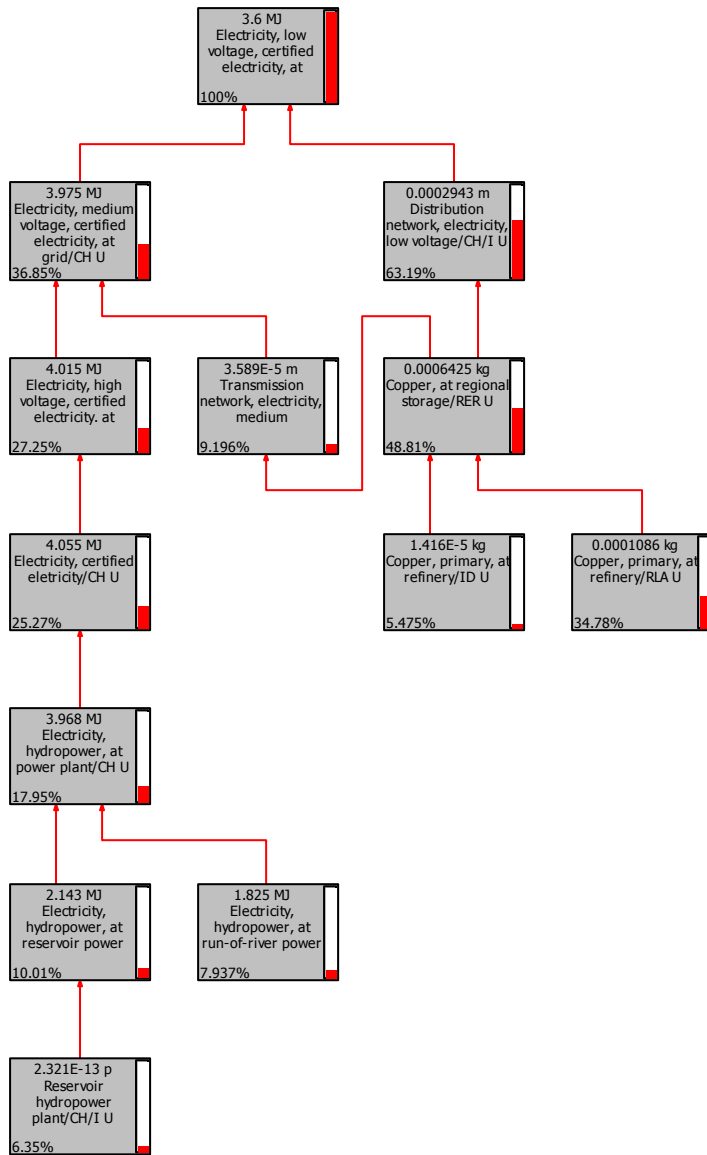


Abbildung A 19 Herkunft Umweltbelastung (Methode der ökologischen Knappheit 2006), Zertifizierter Strommix Schweiz

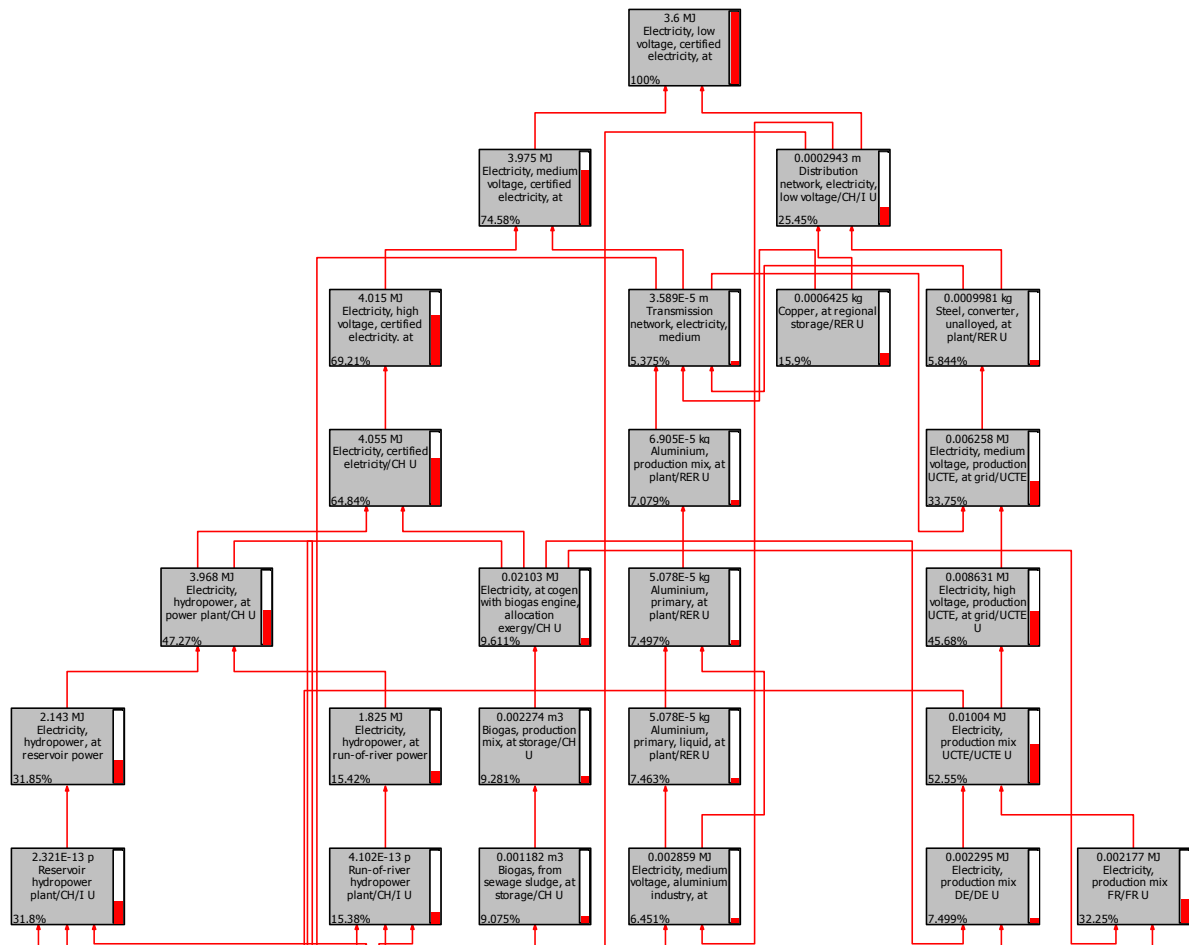


Abbildung A 20 Herkunft radioaktive Abfälle, Zertifizierter Strommix Schweiz

## GuD Kraftwerk

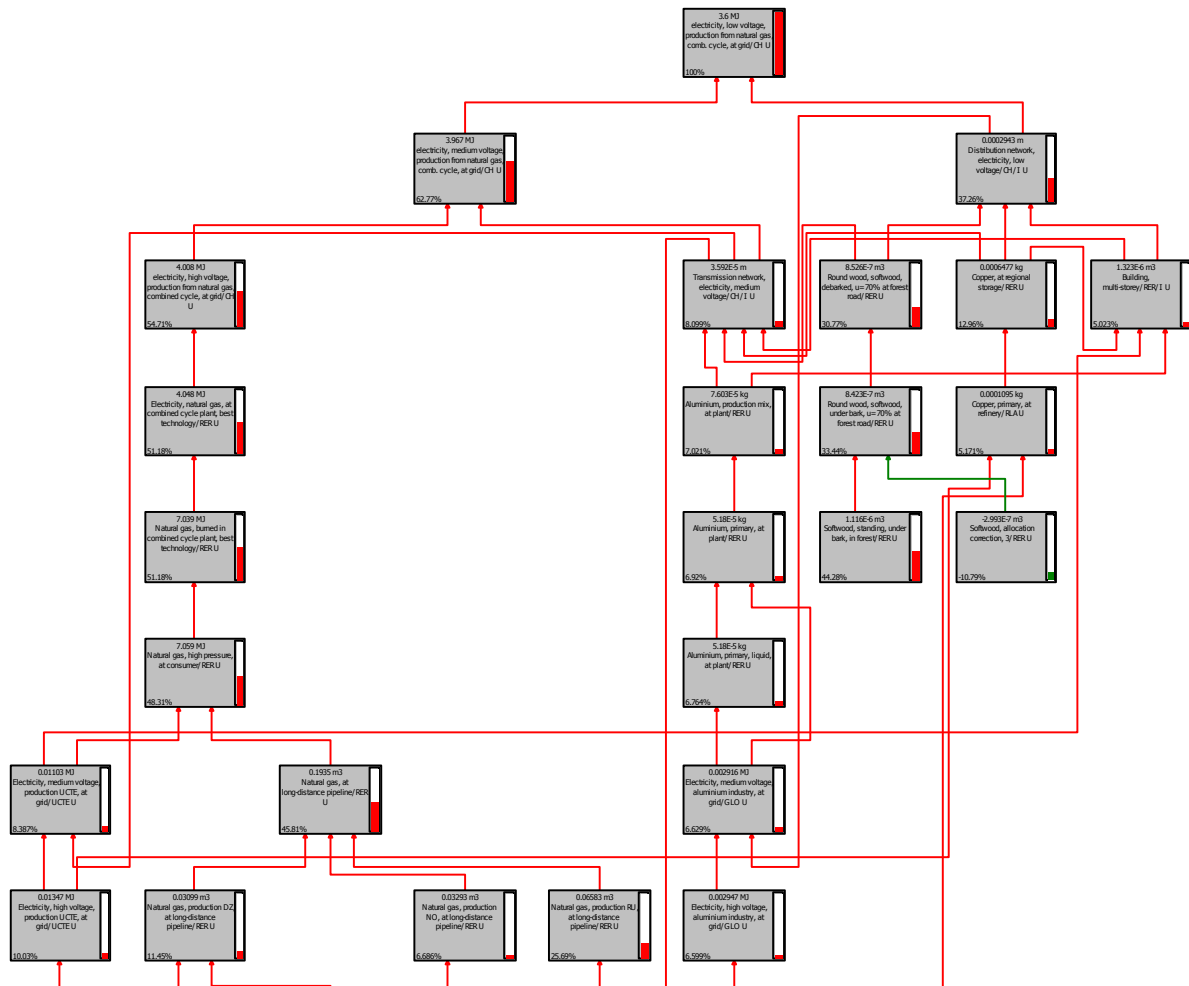


Abbildung A 21 Herkunft Kumulierter Energieaufwand, erneuerbar, GuD Kraftwerk



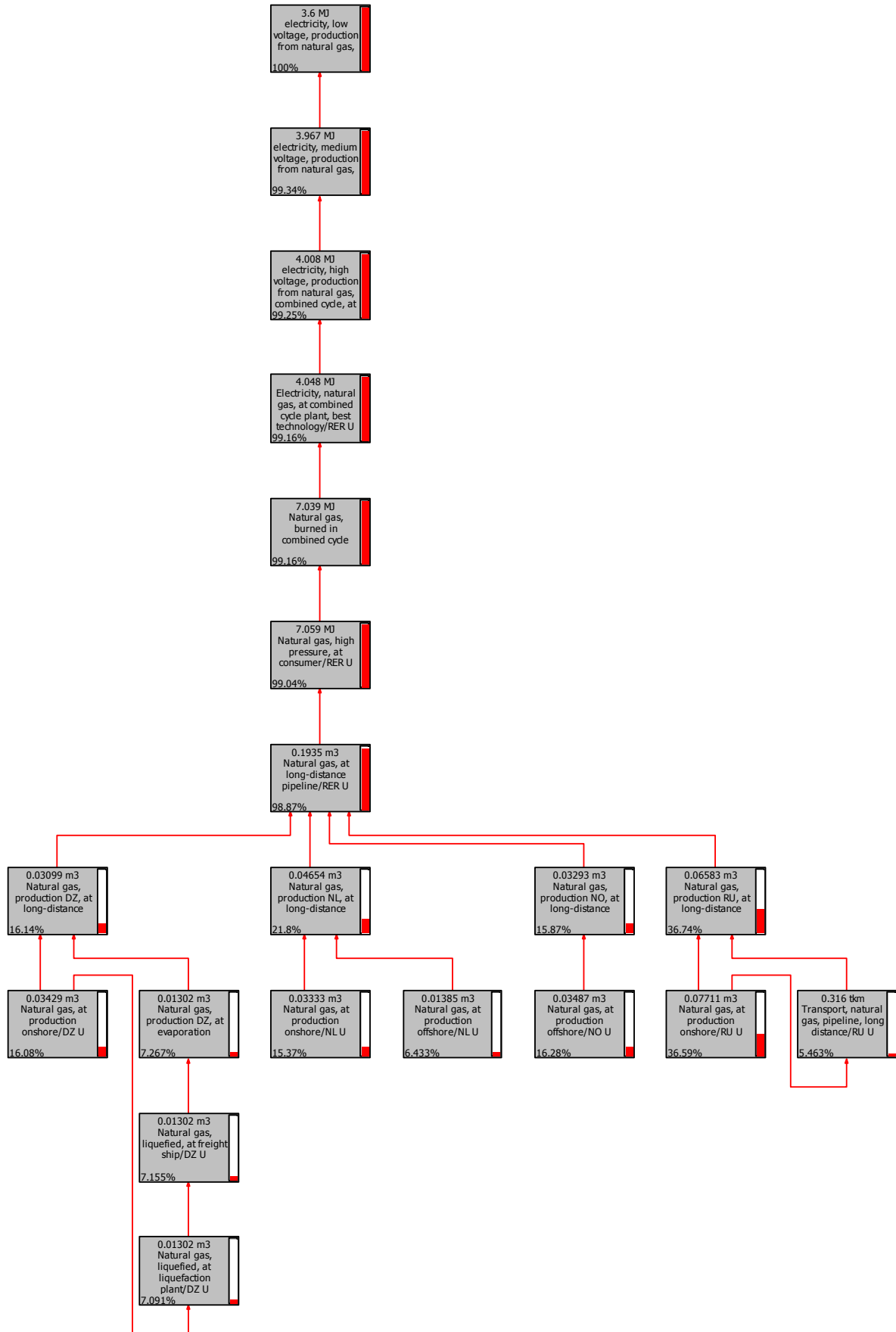


Abbildung A 22 Herkunft Kumulierter Energieaufwand, nicht erneuerbar, GuD Kraftwerk

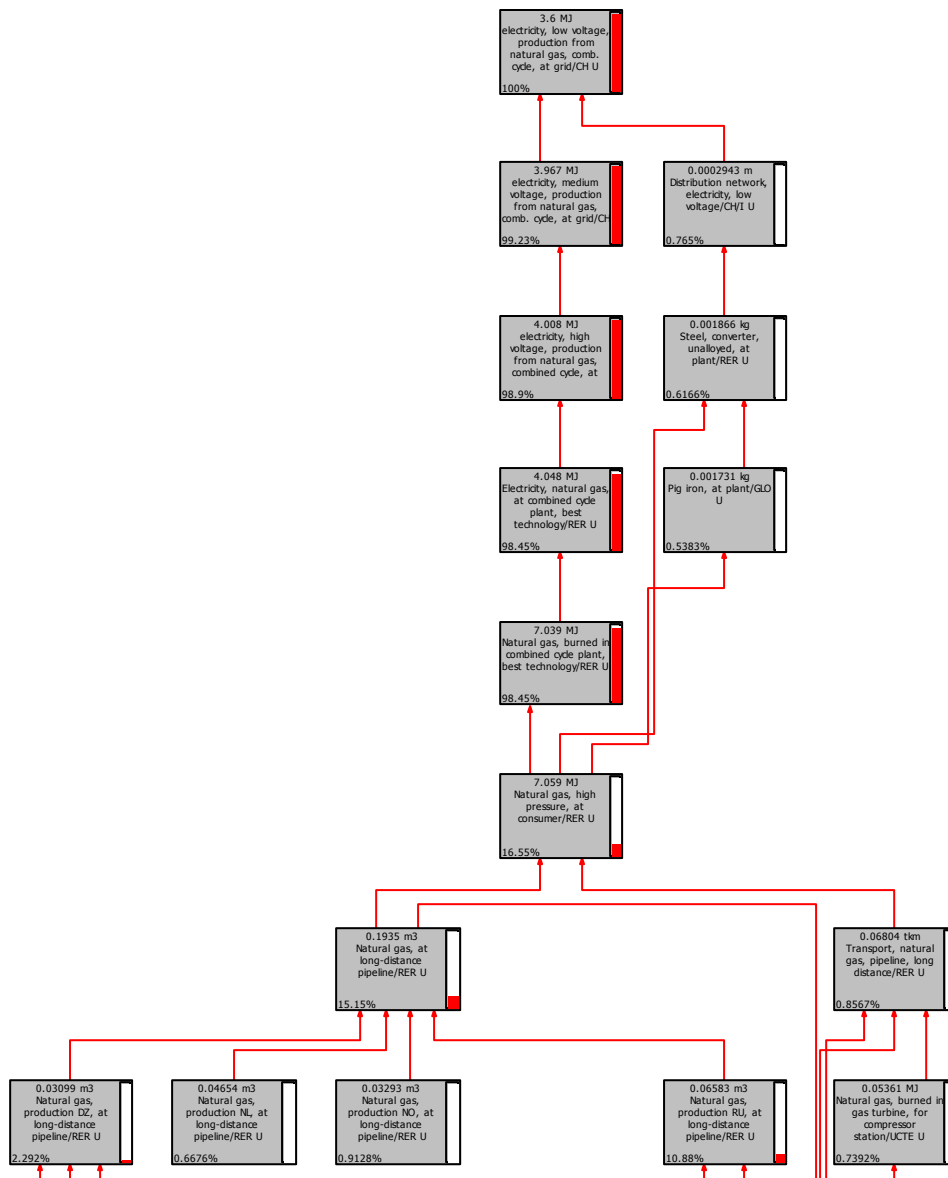


Abbildung A 23 Herkunft Treibhausgas-Emissionen, GuD Kraftwerk

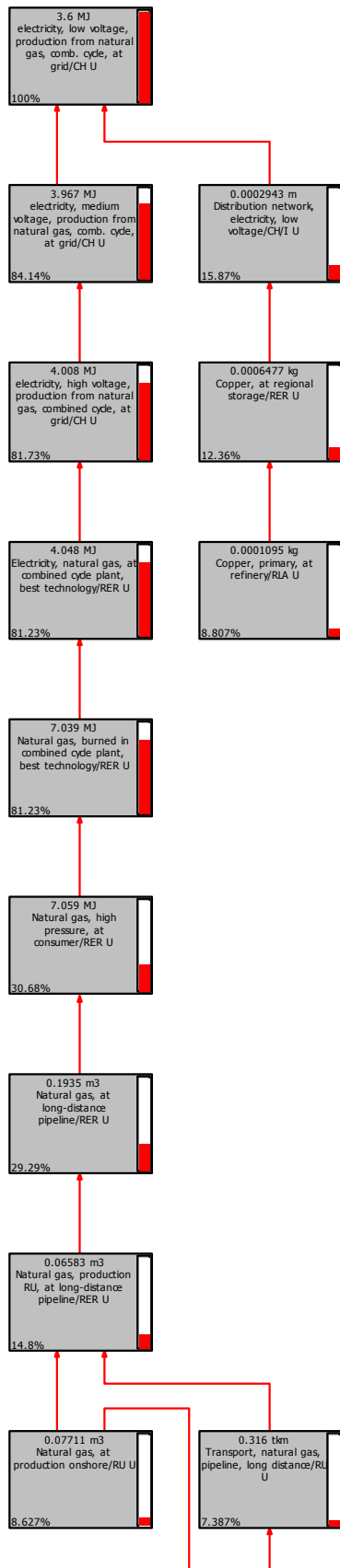


Abbildung A 24 Herkunft Umweltbelastung (Methode der ökologischen Knappheit 2006), GuD Kraftwerk

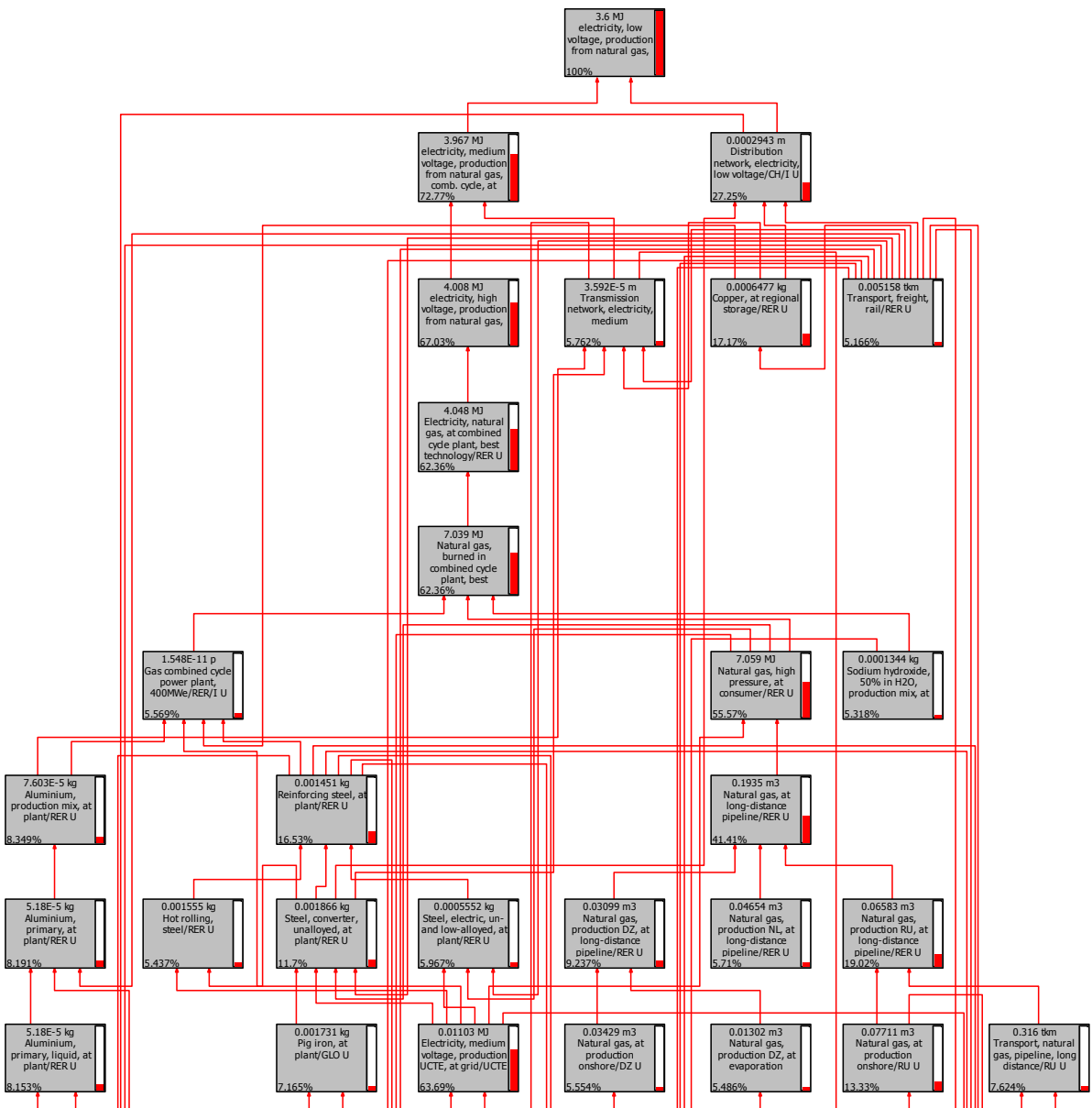


Abbildung A 25 Herkunft radioaktive Abfälle, GuD Kraftwerk

Steinkohlekraftwerk Schweiz

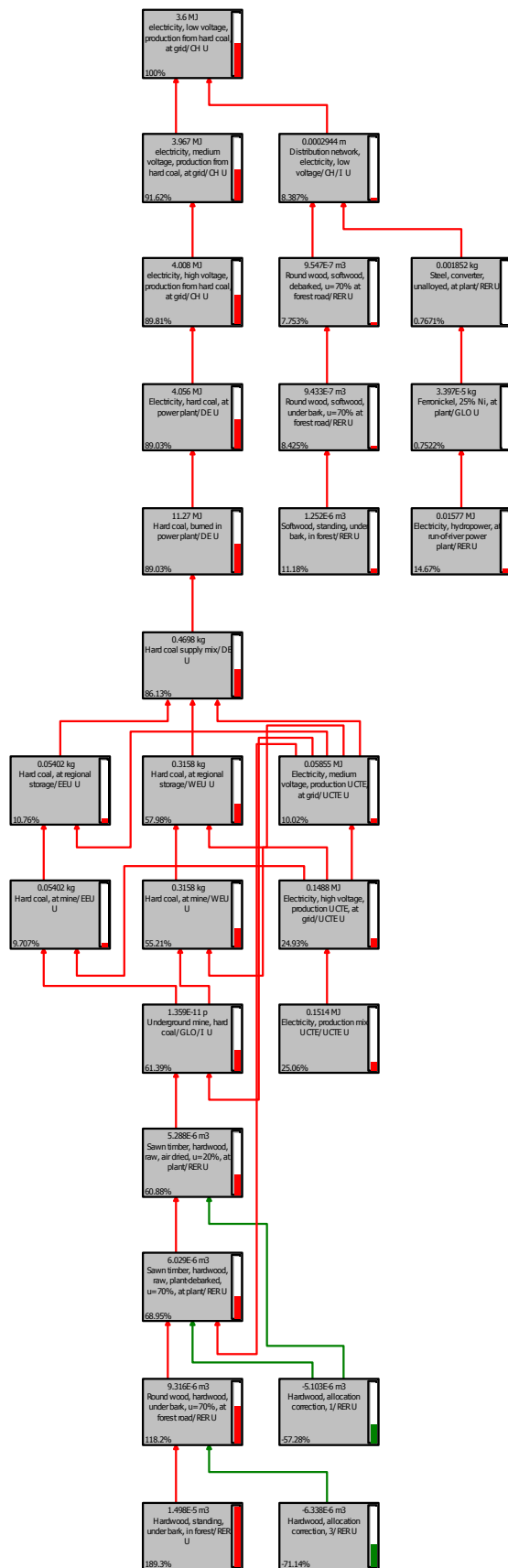


Abbildung A 26 Herkunft Kumulierter Energieaufwand, erneuerbar, Steinkohlekraftwerk Deutschland

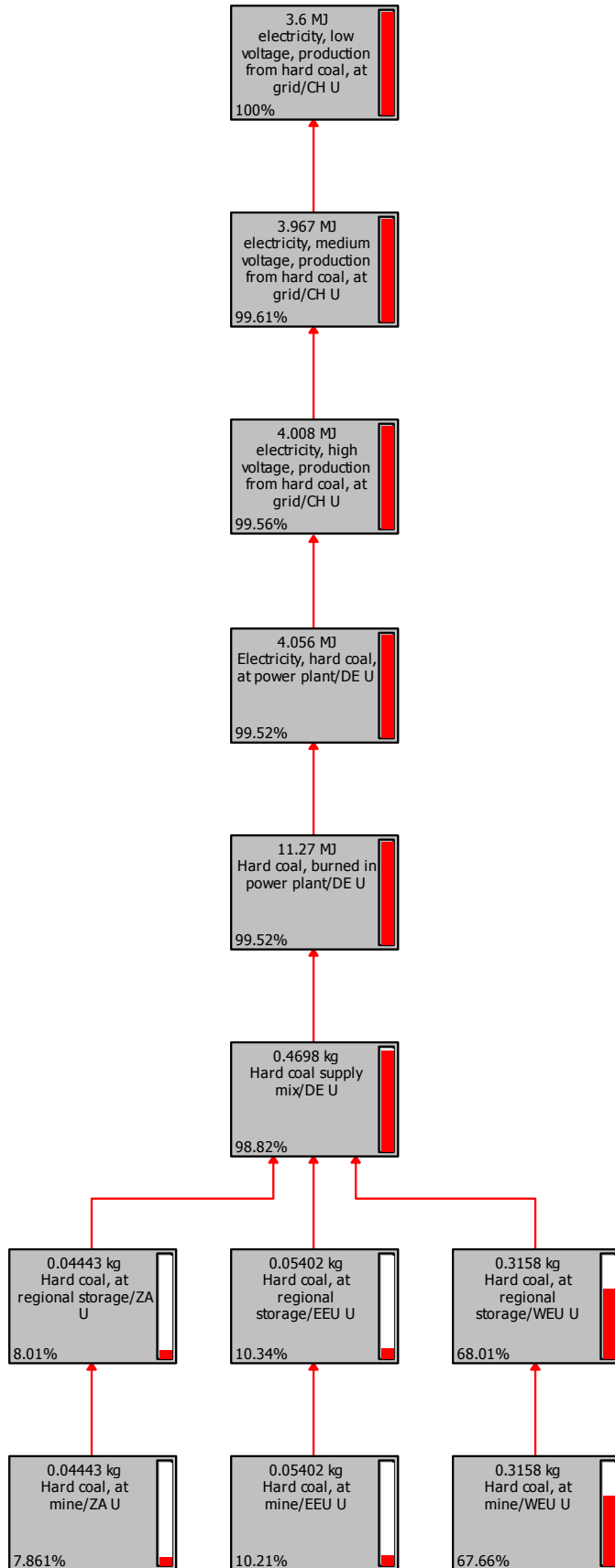


Abbildung A 27 Herkunft Kumulierter Energieaufwand, nicht erneuerbar, Steinkohlekraftwerk Deutschland

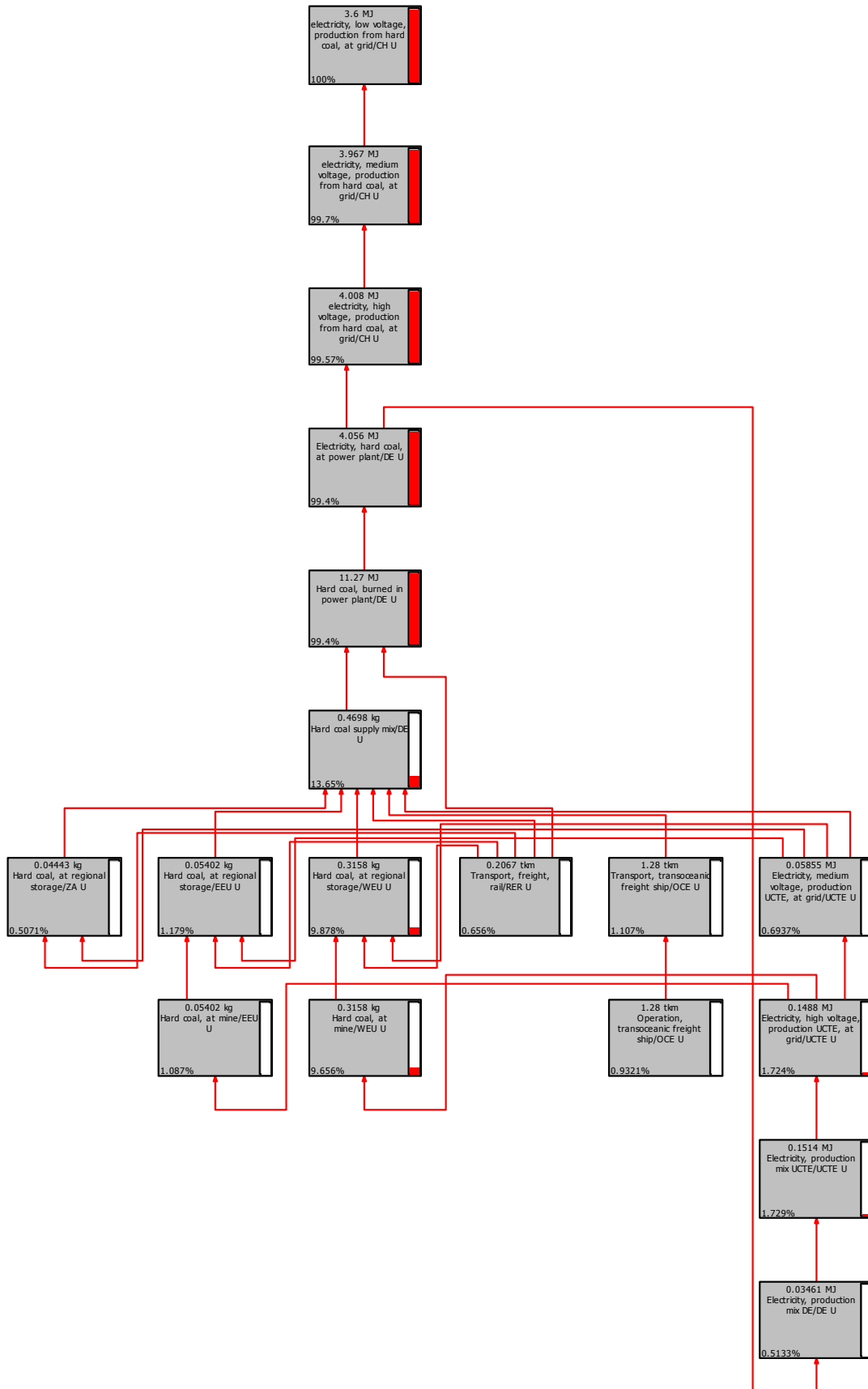


Abbildung A 28 Herkunft Treibhausgas-Emissionen, Steinkohlekraftwerk Deutschland, Abschneidekriterium 0.5 %

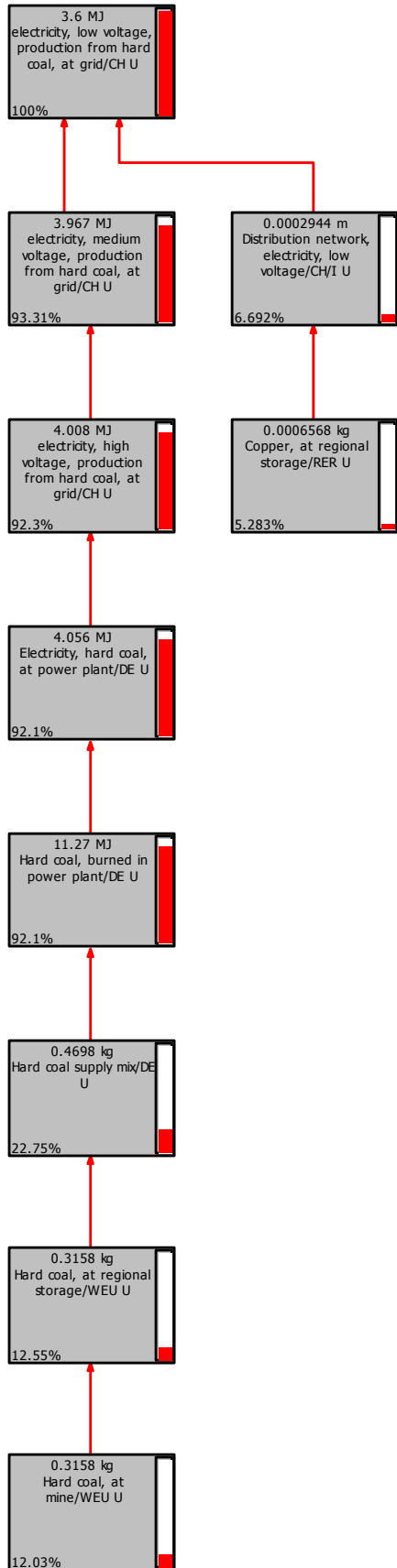


Abbildung A 29 Herkunft Umweltbelastung (Methode der ökologischen Knappheit 2006), Steinkohlekraftwerk Deutschland



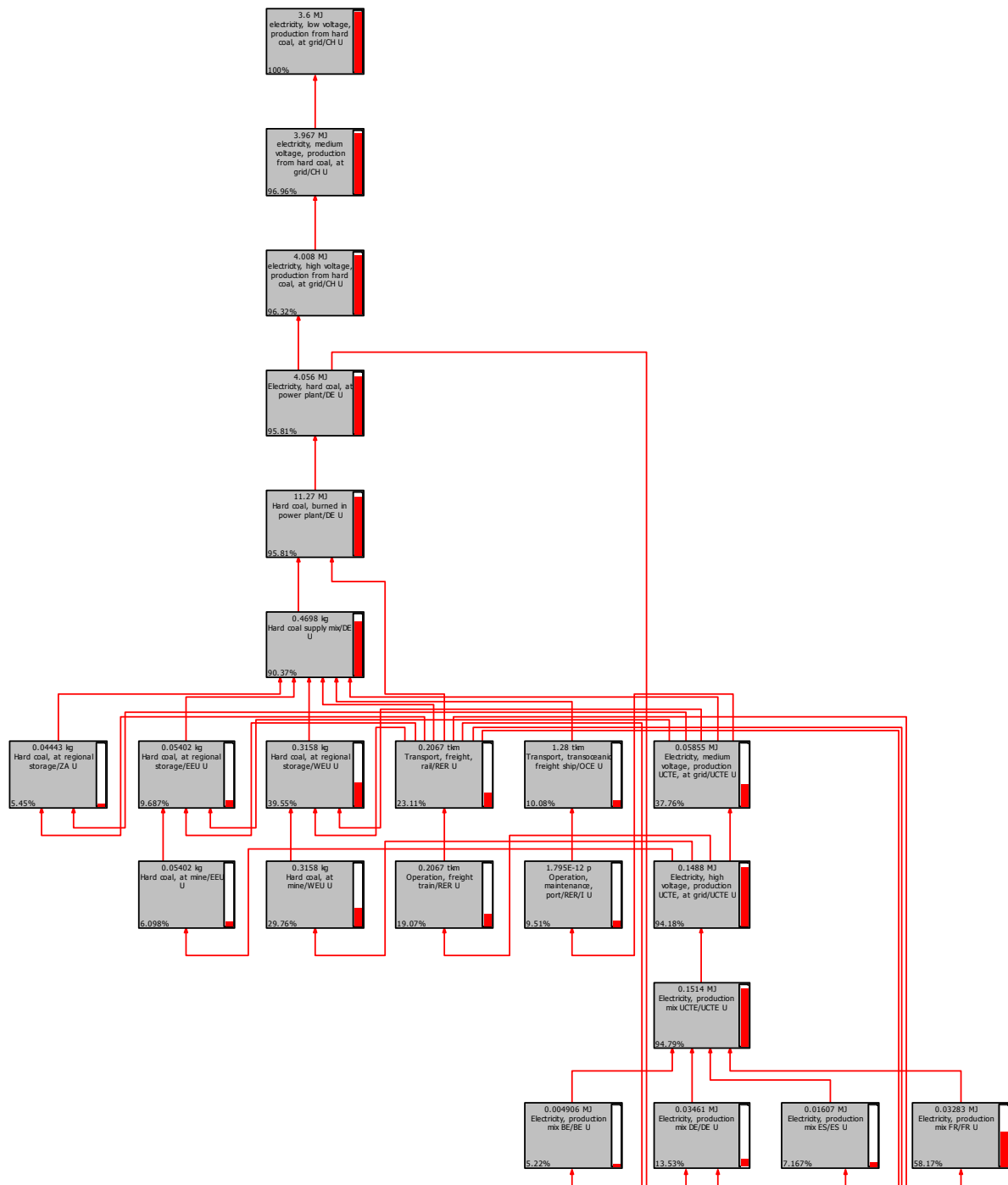


Abbildung A 30 Herkunft radioaktive Abfälle, Steinkohlekraftwerk Deutschland

Kernkraftwerk Schweiz

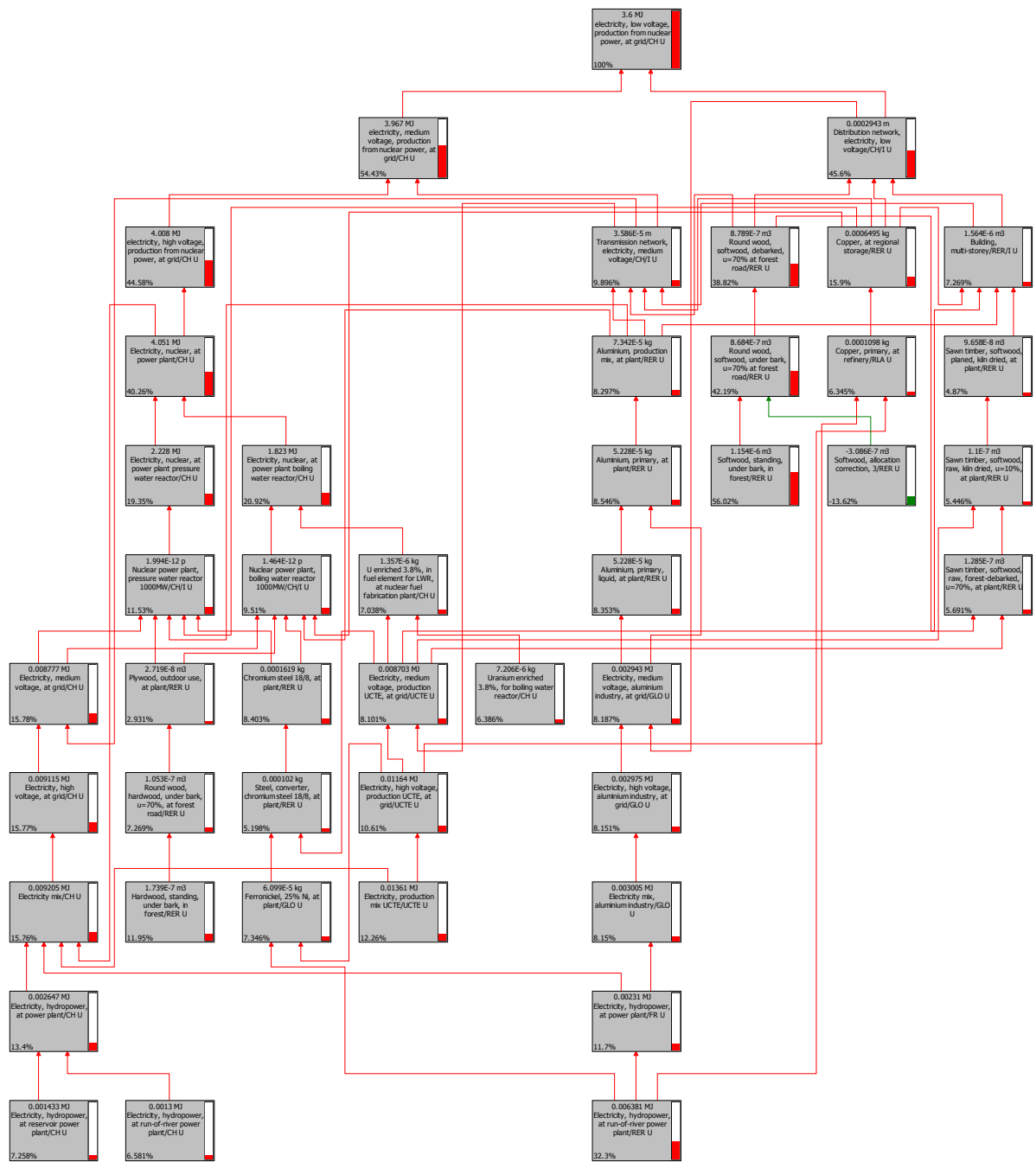


Abbildung A 31 Herkunft Kumulierter Energieaufwand, erneuerbar, Kernkraftwerk Schweiz

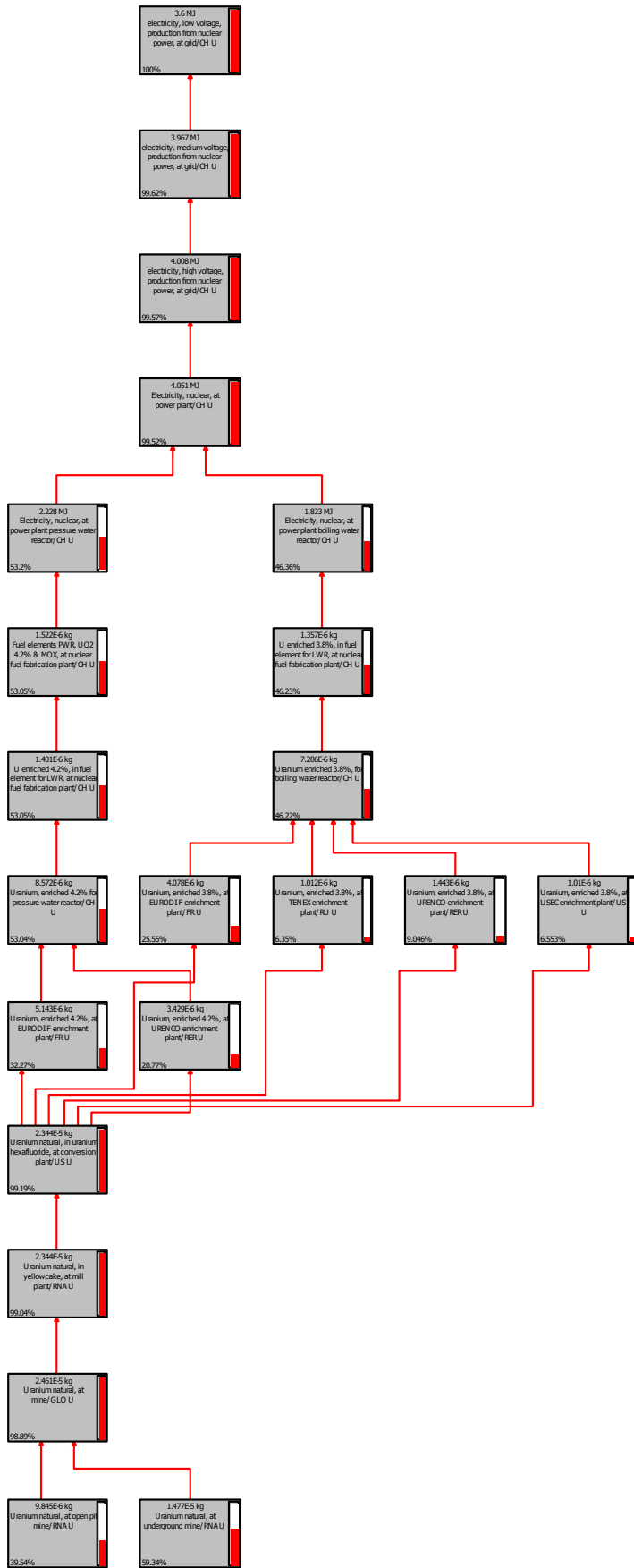


Abbildung A 32 Herkunft Kumulierter Energieaufwand, nicht erneuerbar, Kernkraftwerk Schweiz

## Anhang

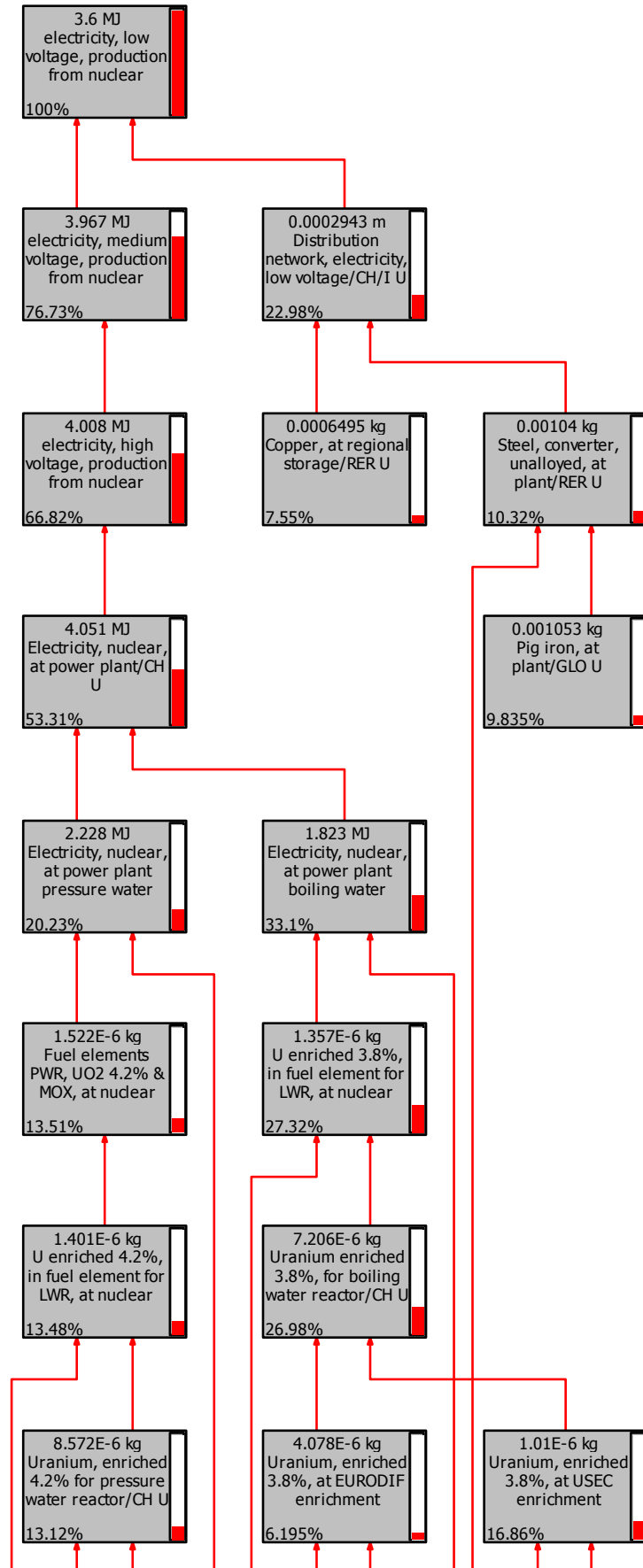


Abbildung A 33 Herkunft Treibhausgas-Emissionen, Kernkraftwerk Schweiz

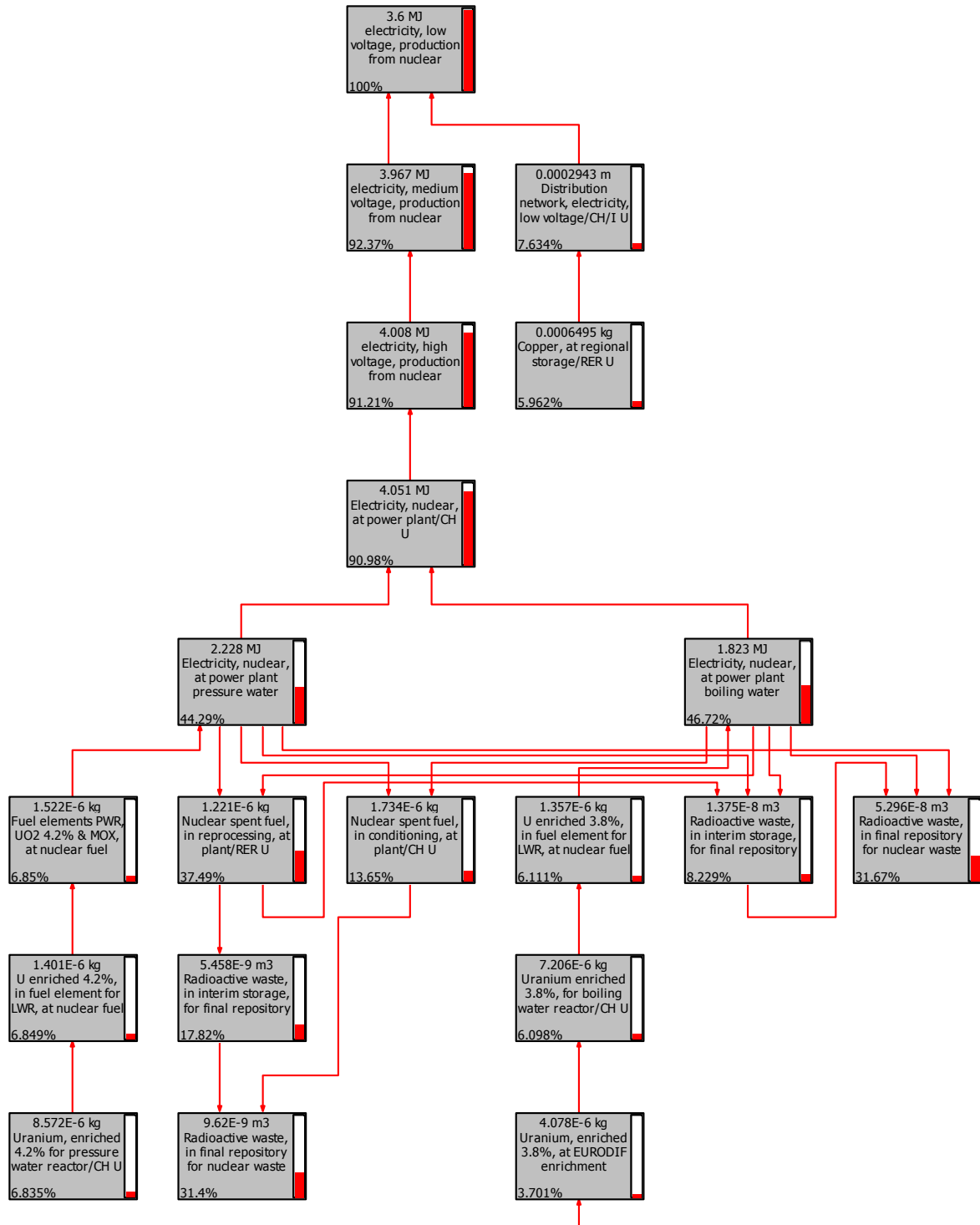


Abbildung A 34 Herkunft Umweltbelastung (Methode der ökologischen Knappheit 2006), Kernkraftwerk Schweiz

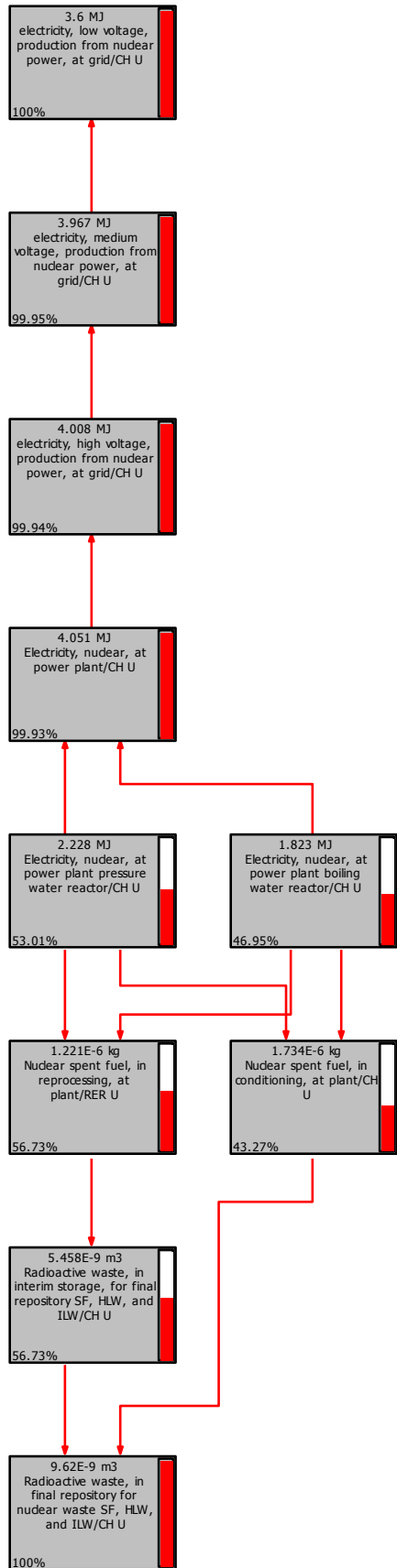


Abbildung A 35 Herkunft radioaktive Abfälle, Kernkraftwerk Schweiz

Windkraftwerk Schweiz

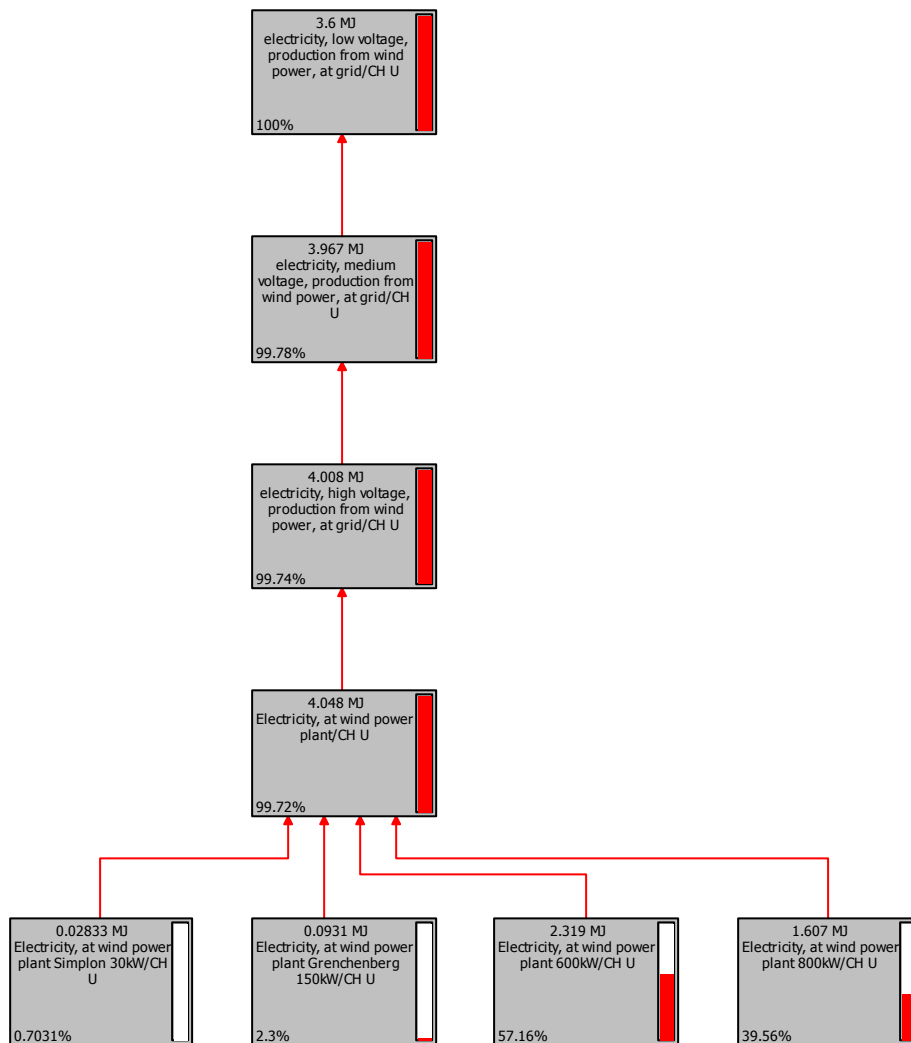


Abbildung A 36 Herkunft Kumulierter Energieaufwand, erneuerbar, Windkraftwerk Schweiz, Abschneidekriterium 0.5 %

# Anhang

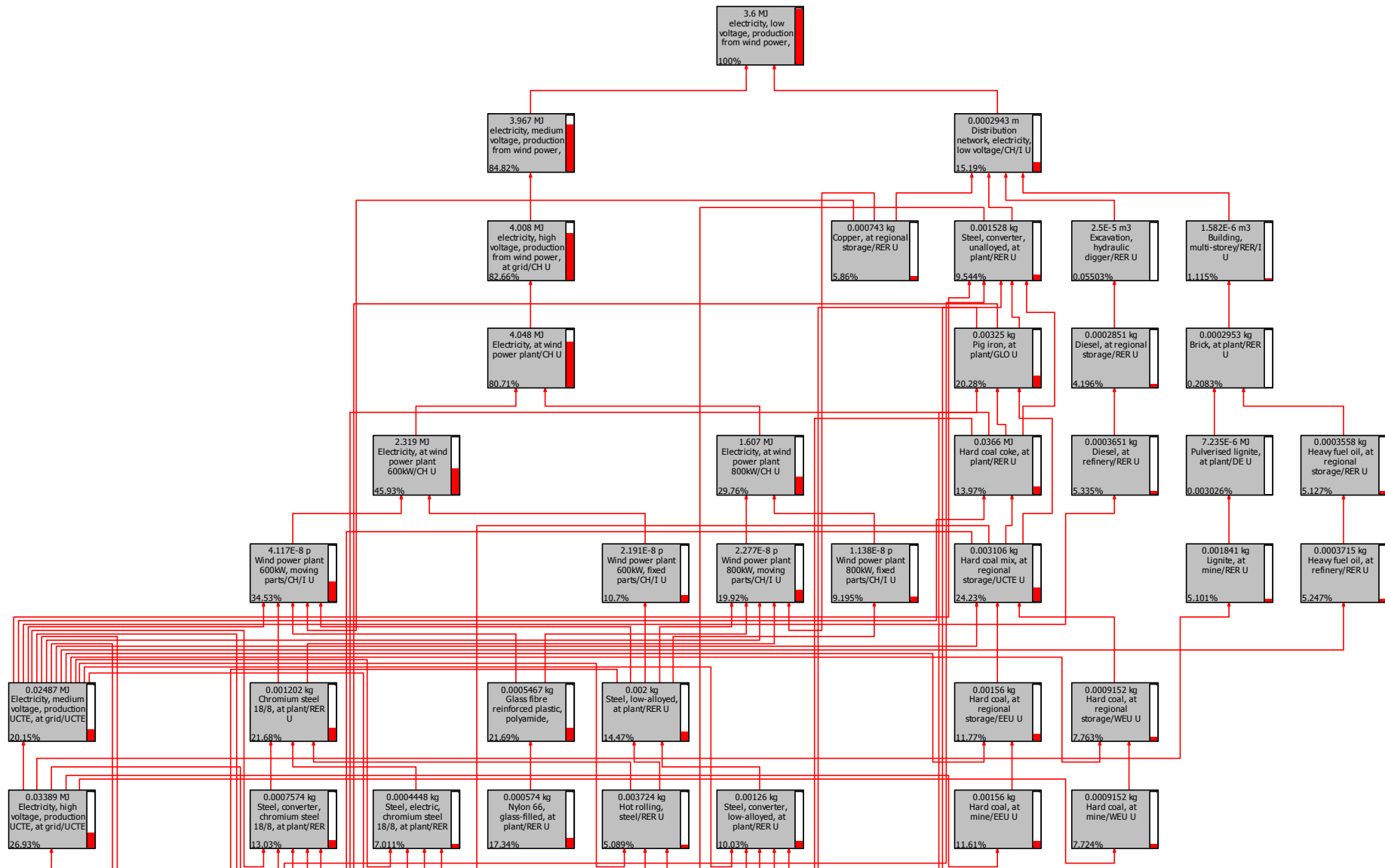


Abbildung A 37 Herkunft Kumulierter Energieaufwand, nicht erneuerbar, Windkraftwerk Schweiz



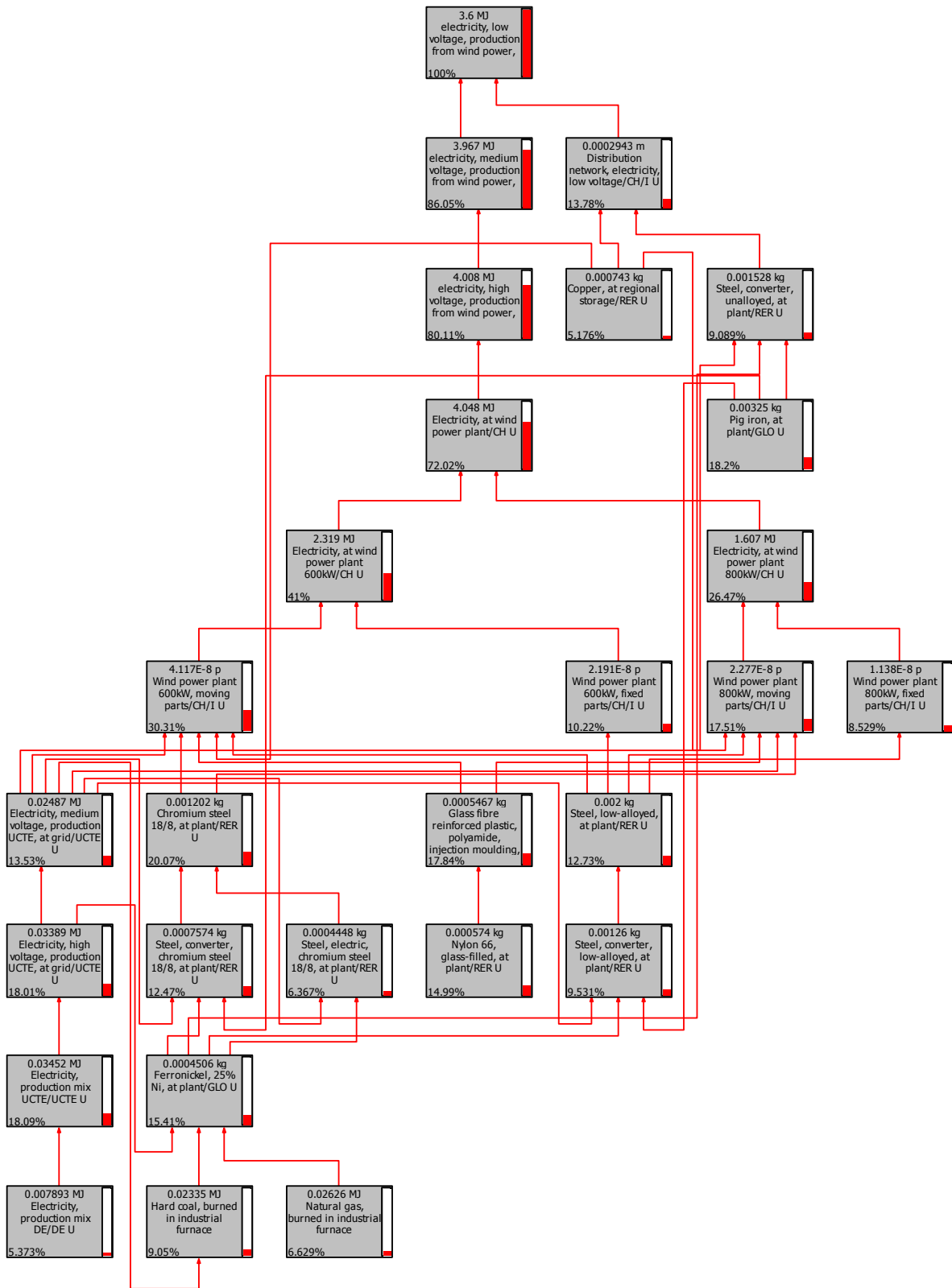


Abbildung A 38 Herkunft Treibhausgas-Emissionen, Windkraftwerk Schweiz

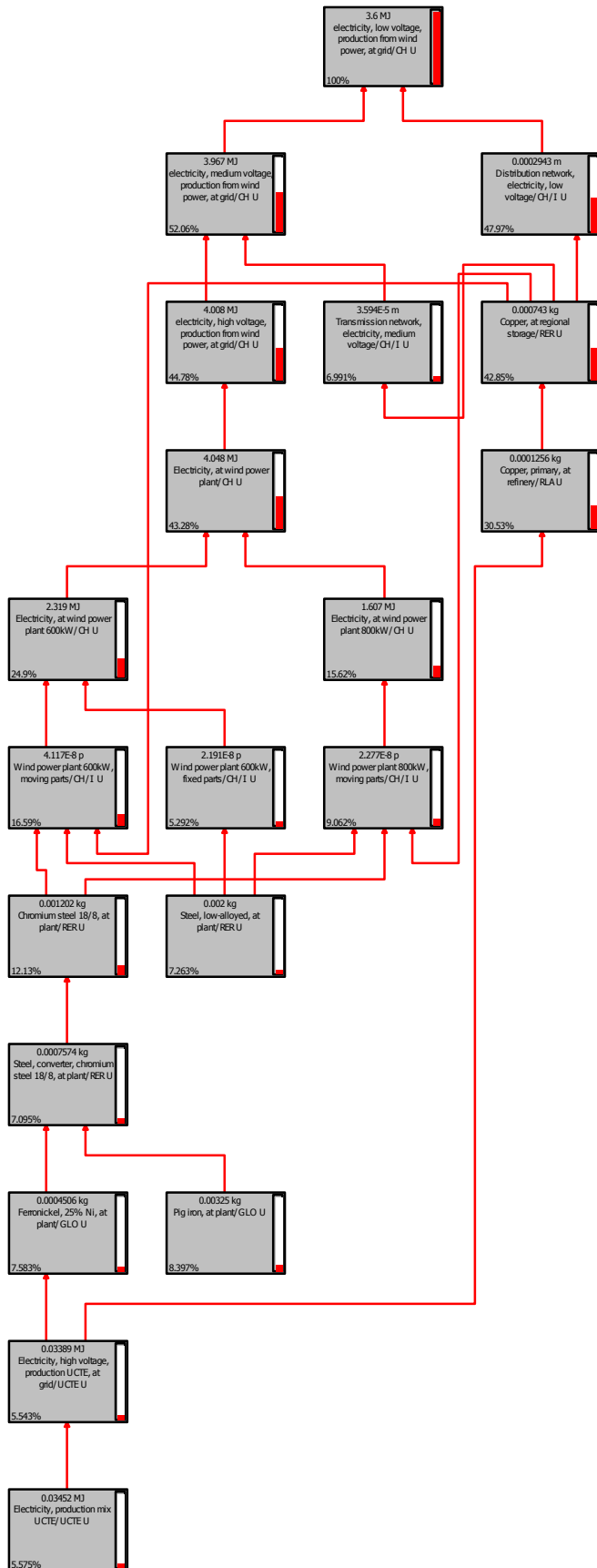


Abbildung A 39 Herkunft Umweltbelastung (Methode der ökologischen Knappheit 2006), Windkraftwerk Schweiz

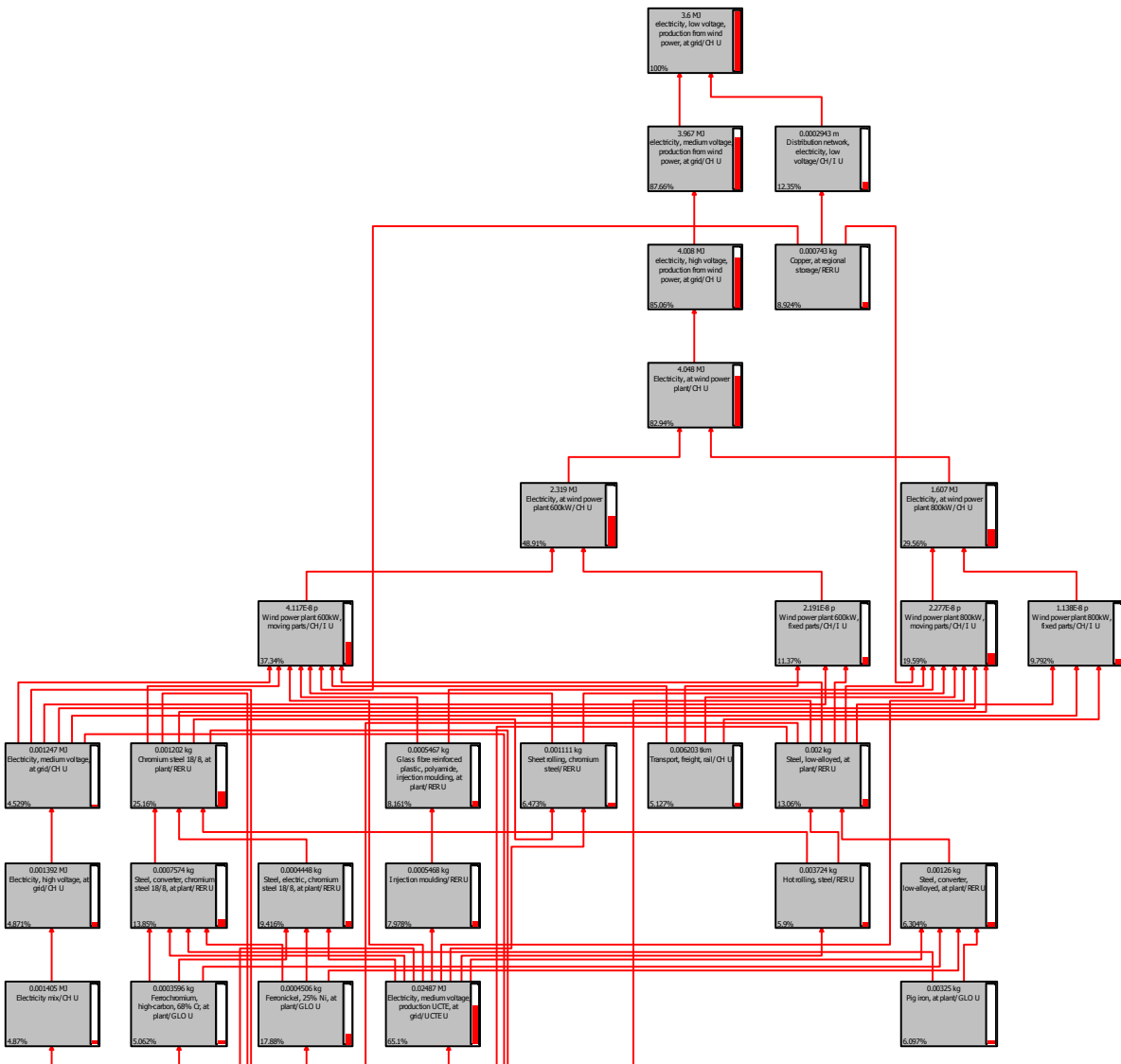


Abbildung A 40 Herkunft radioaktive Abfälle, Windkraftwerk Schweiz

## Photovoltaik Schweiz

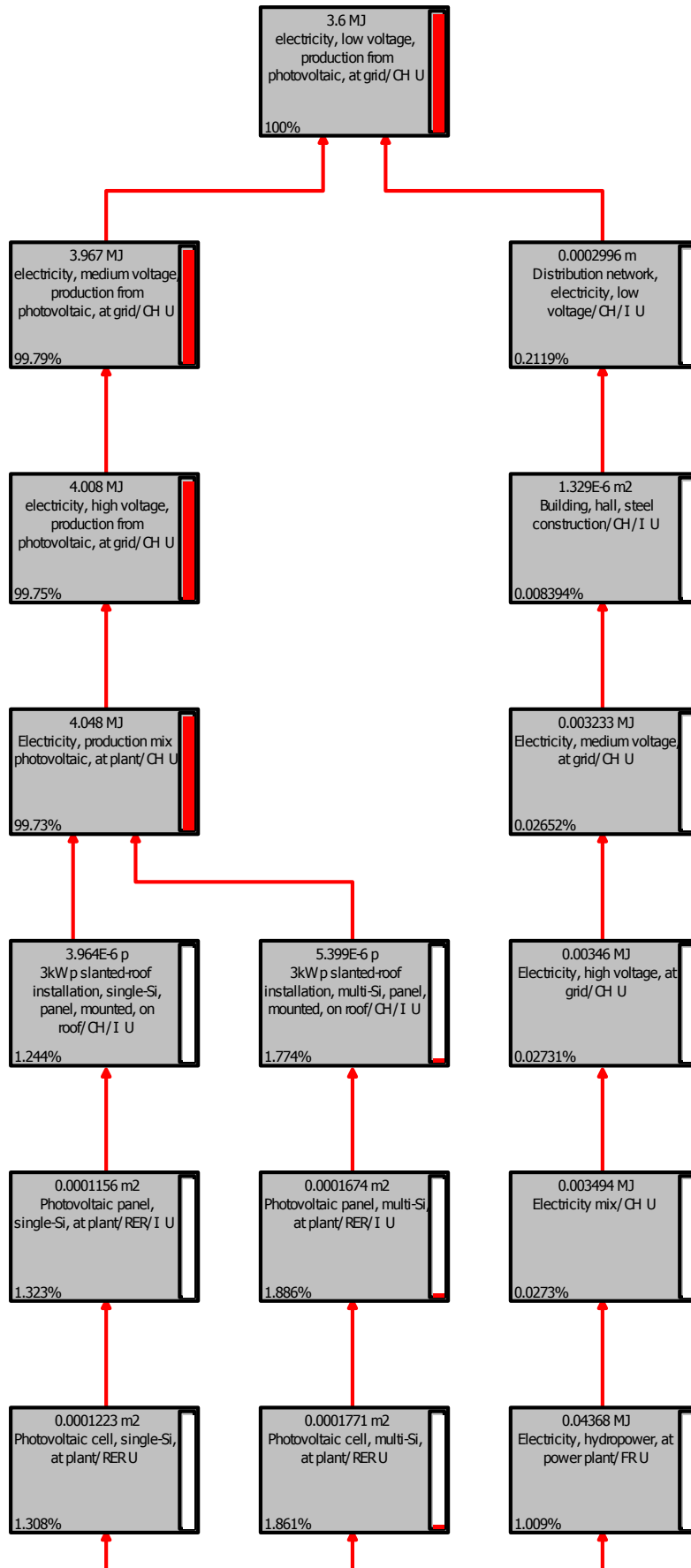


Abbildung A 41 Herkunft Kumulierter Energieaufwand, erneuerbar, Photovoltaik Schweiz

# Anhang

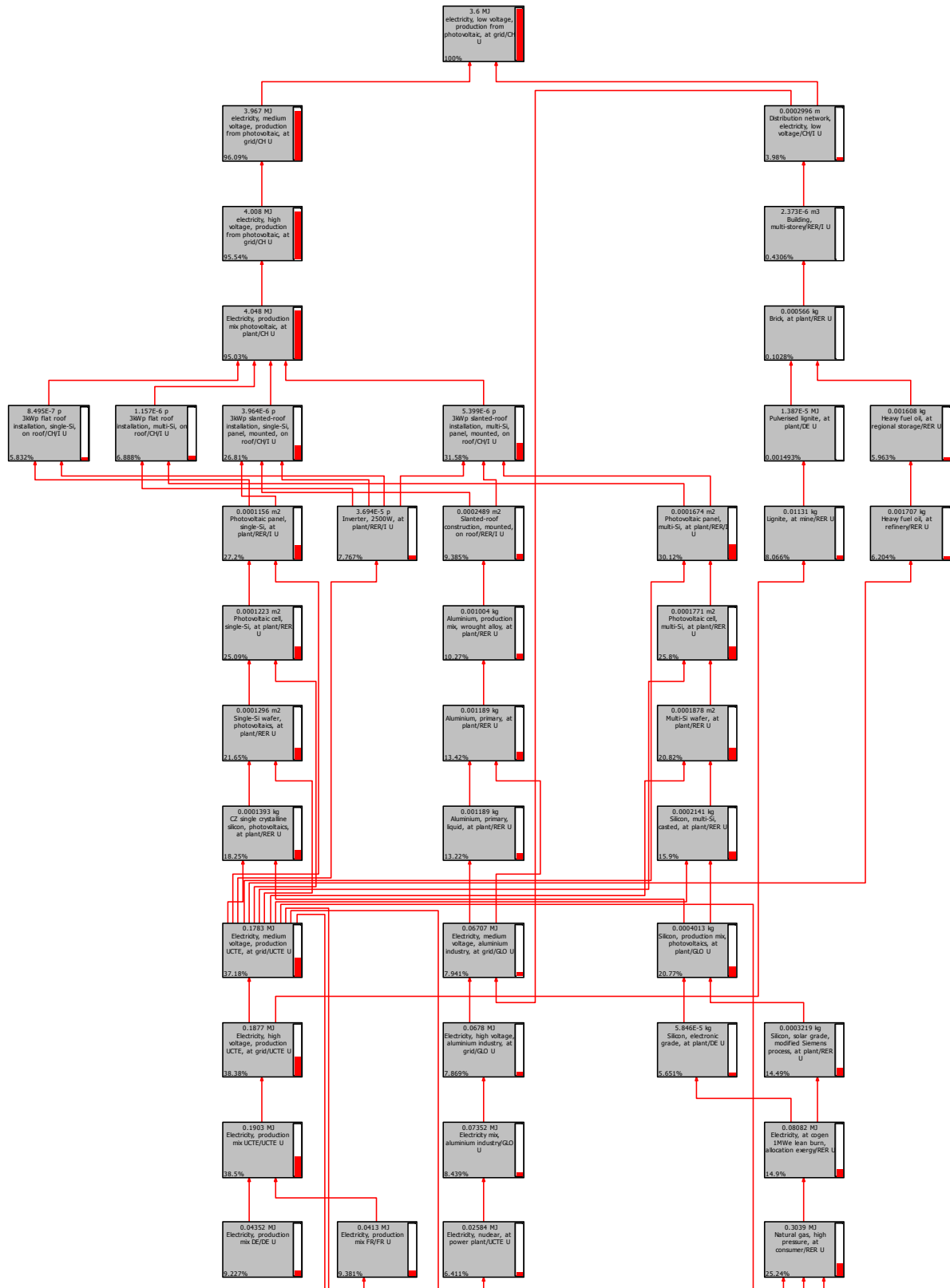


Abbildung A 42 Herkunft Kumulierter Energieaufwand, nicht erneuerbar, Photovoltaik Schweiz

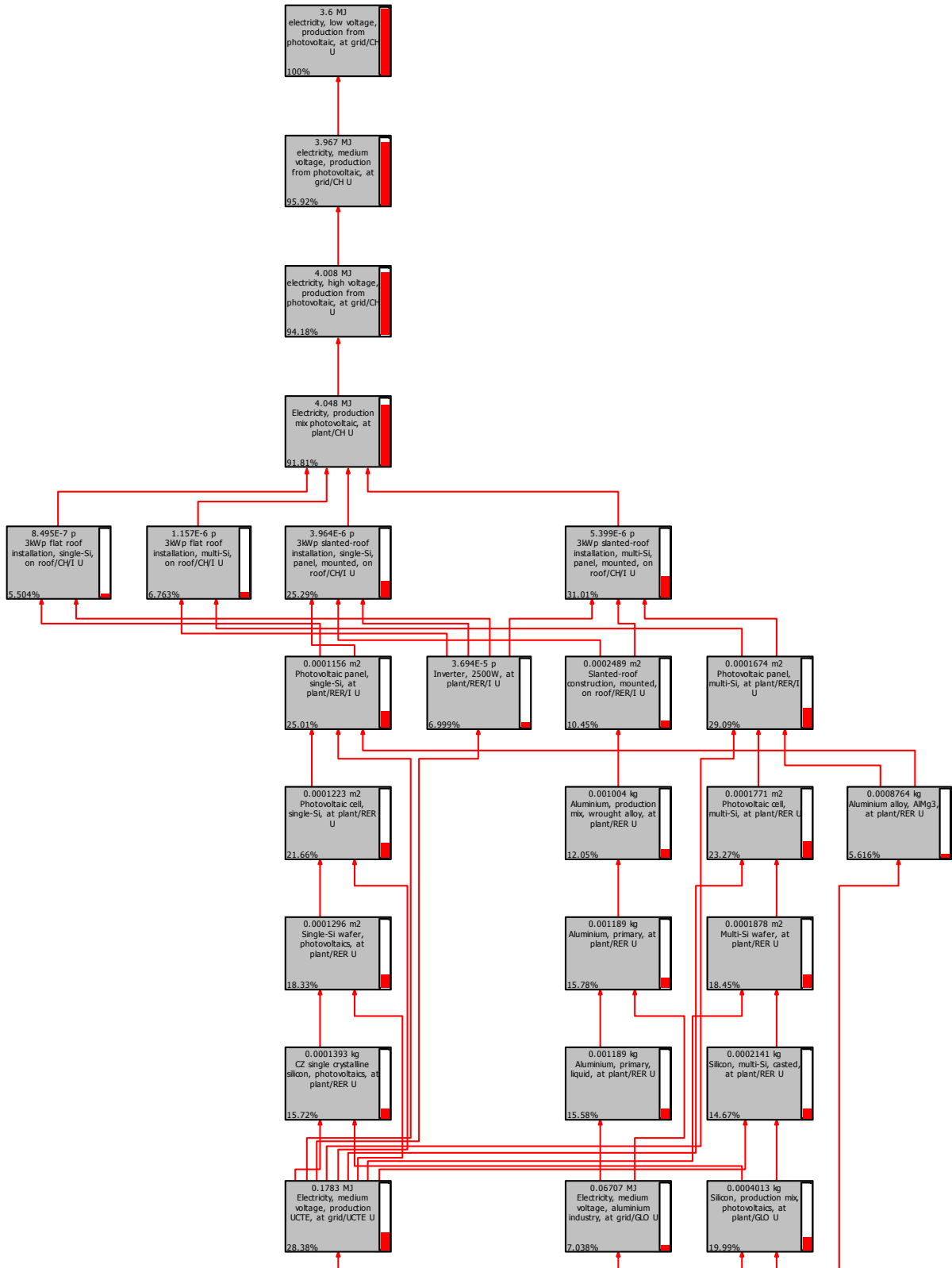


Abbildung A 43 Herkunft Treibhausgas-Emissionen, Photovoltaik Schweiz

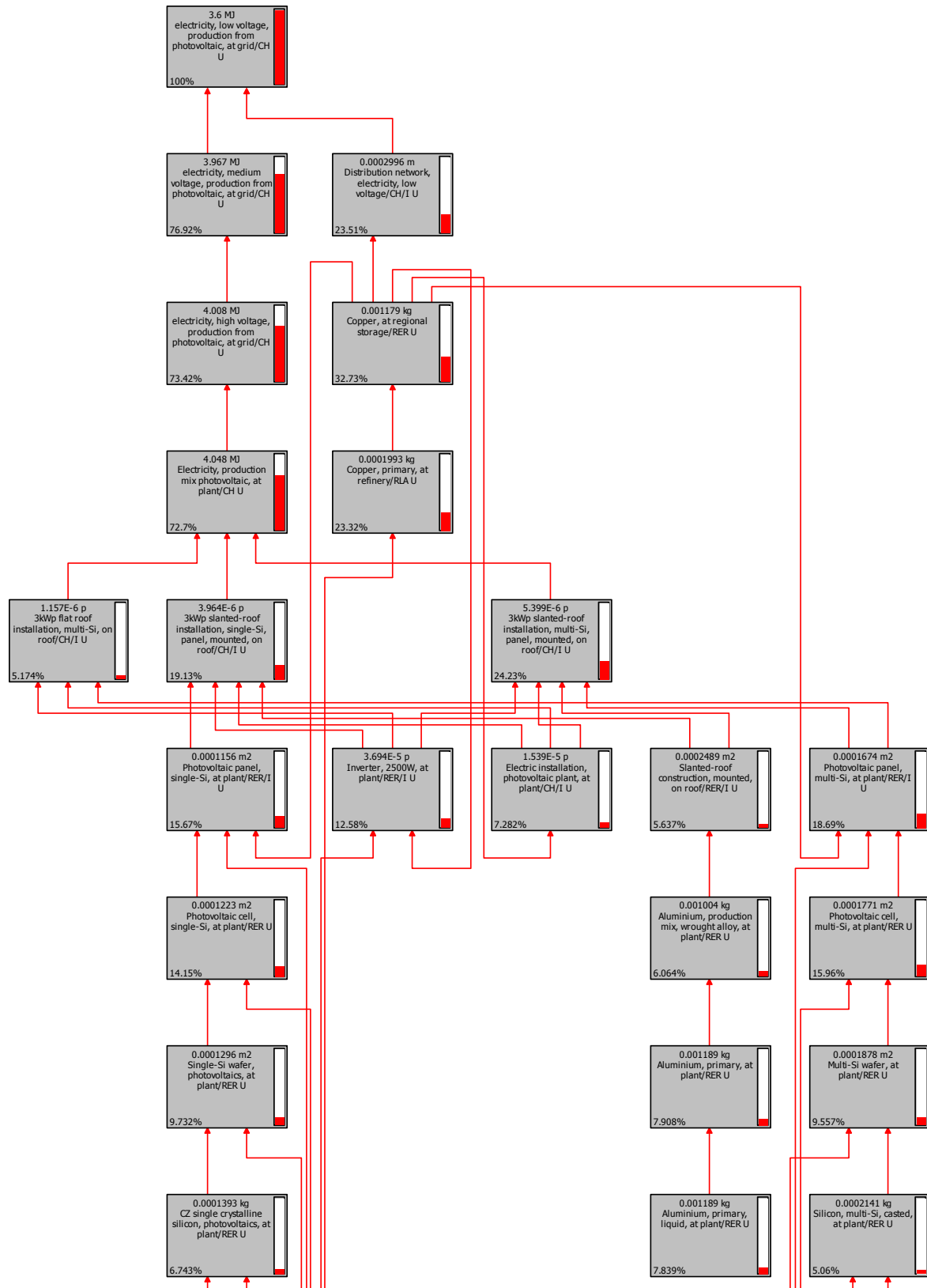


Abbildung A 44 Herkunft Umweltbelastung (Methode der ökologischen Knappheit 2006), Photovoltaik Schweiz

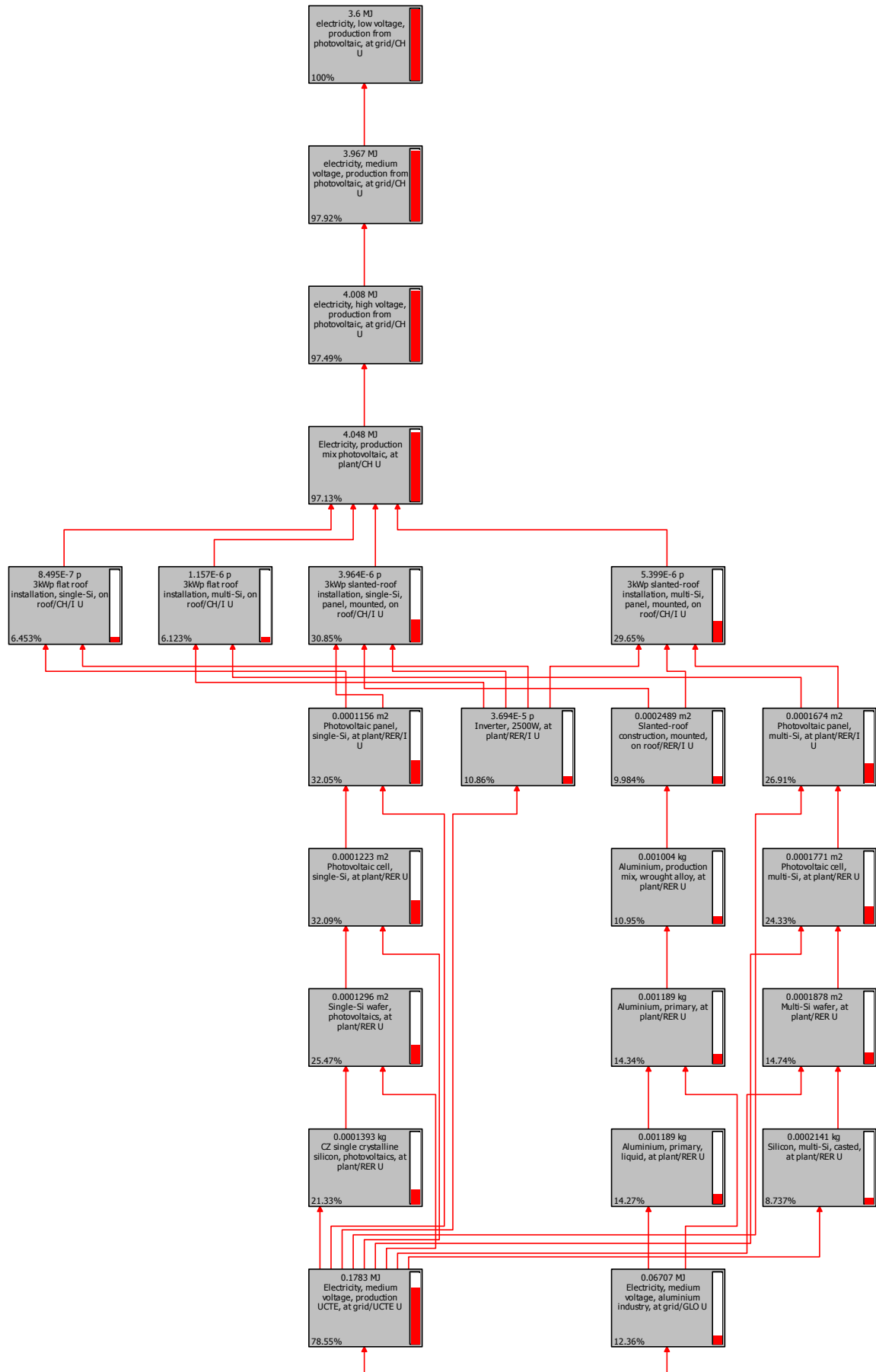


Abbildung A 45 Herkunft radioaktive Abfälle, Photovoltaik Schweiz



Strommix UCTE

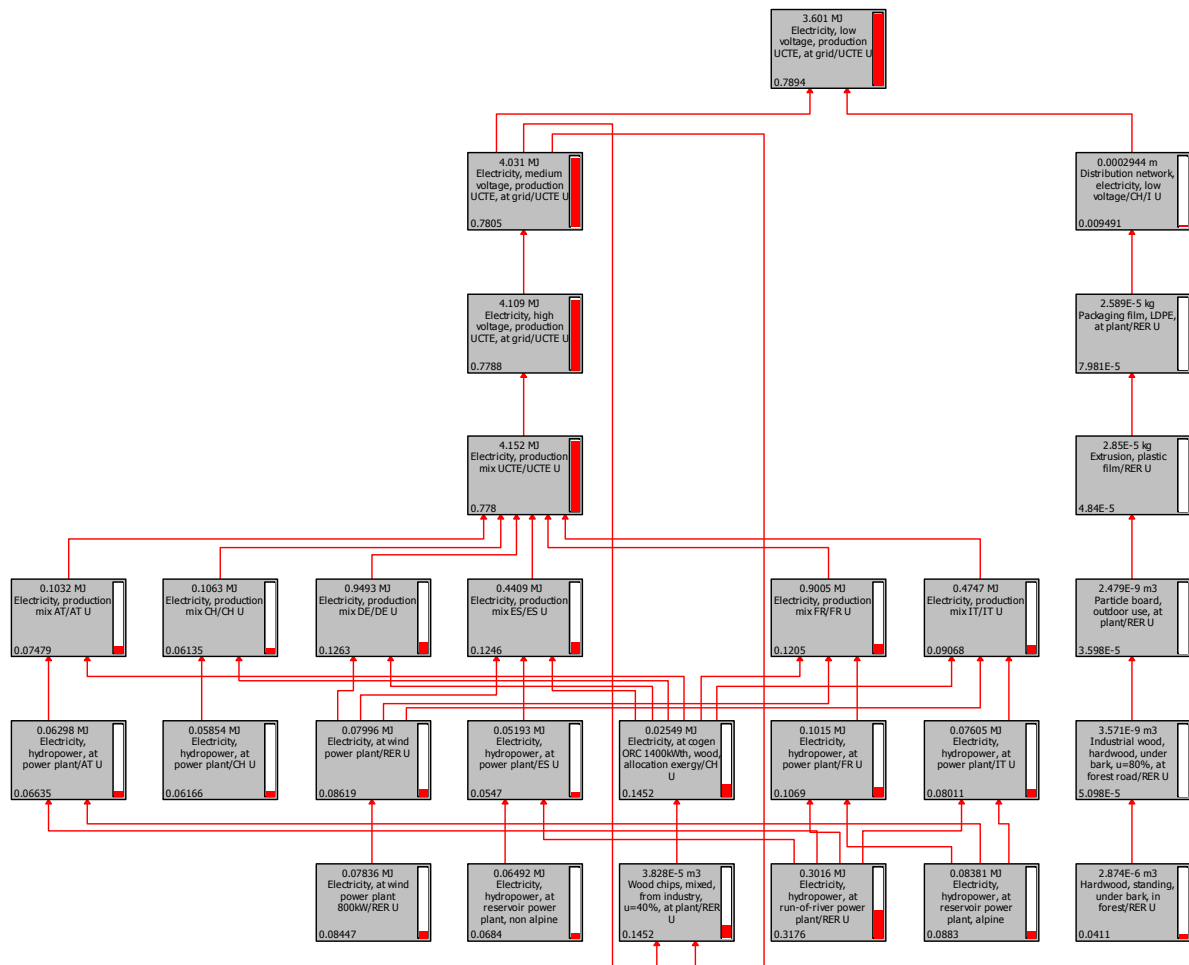


Abbildung A 46 Herkunft Kumulierter Energieaufwand, erneuerbar, Strommix UCTE

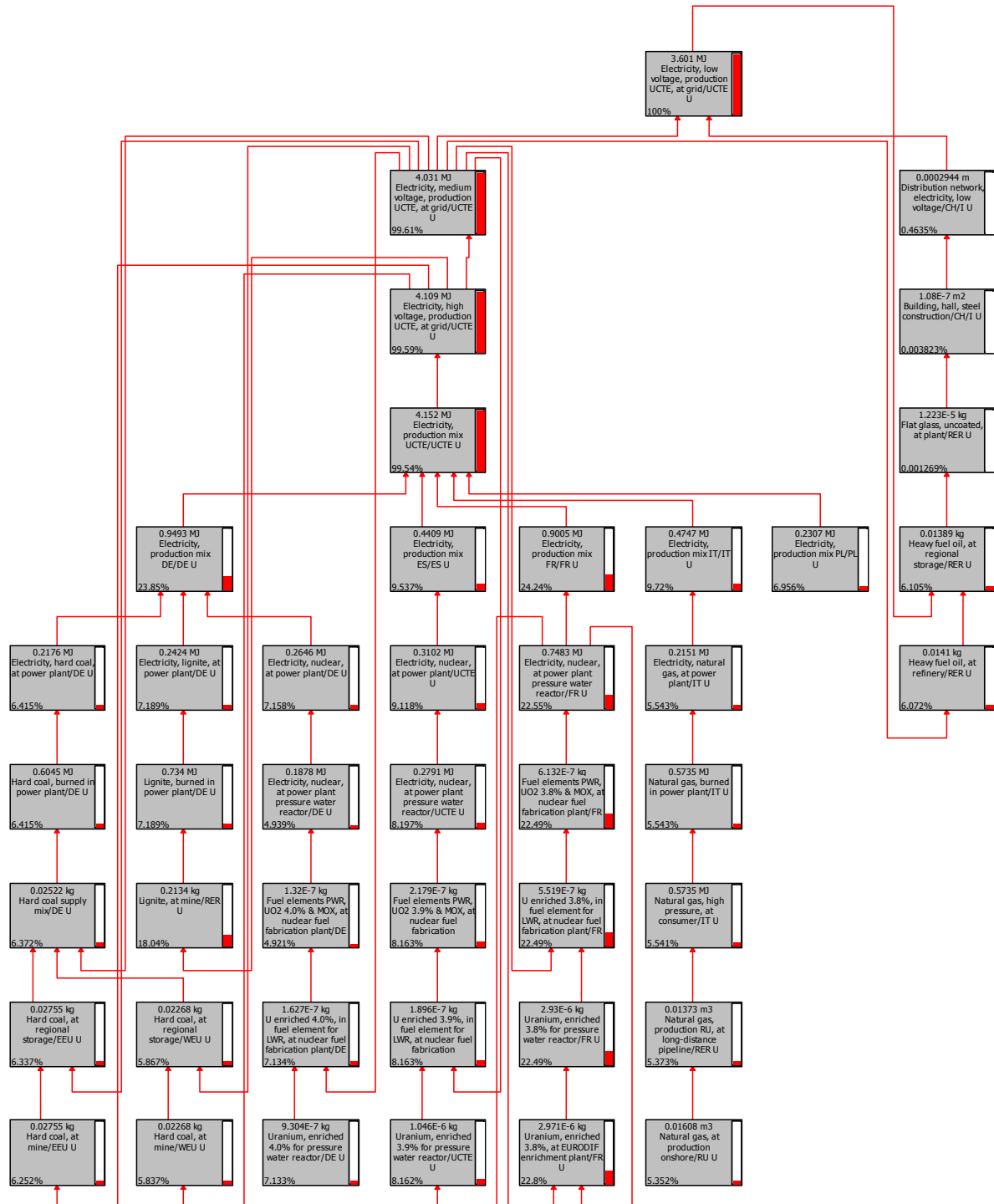


Abbildung A 47 Herkunft Kumulierter Energieaufwand, nicht erneuerbar, Strommix UCTE

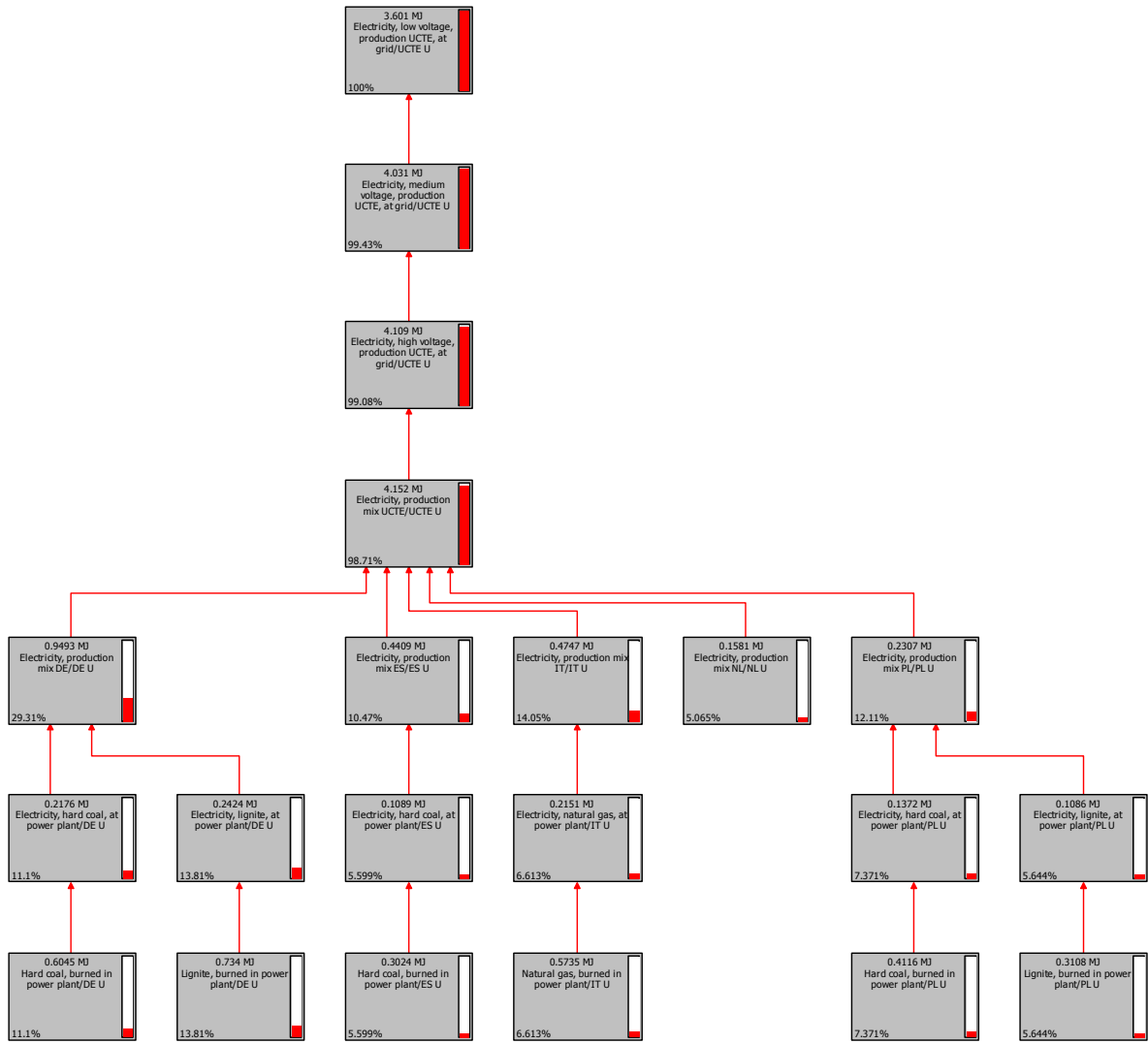


Abbildung A 48 Herkunft Treibhausgas-Emissionen, Strommix UCTE

## Anhang

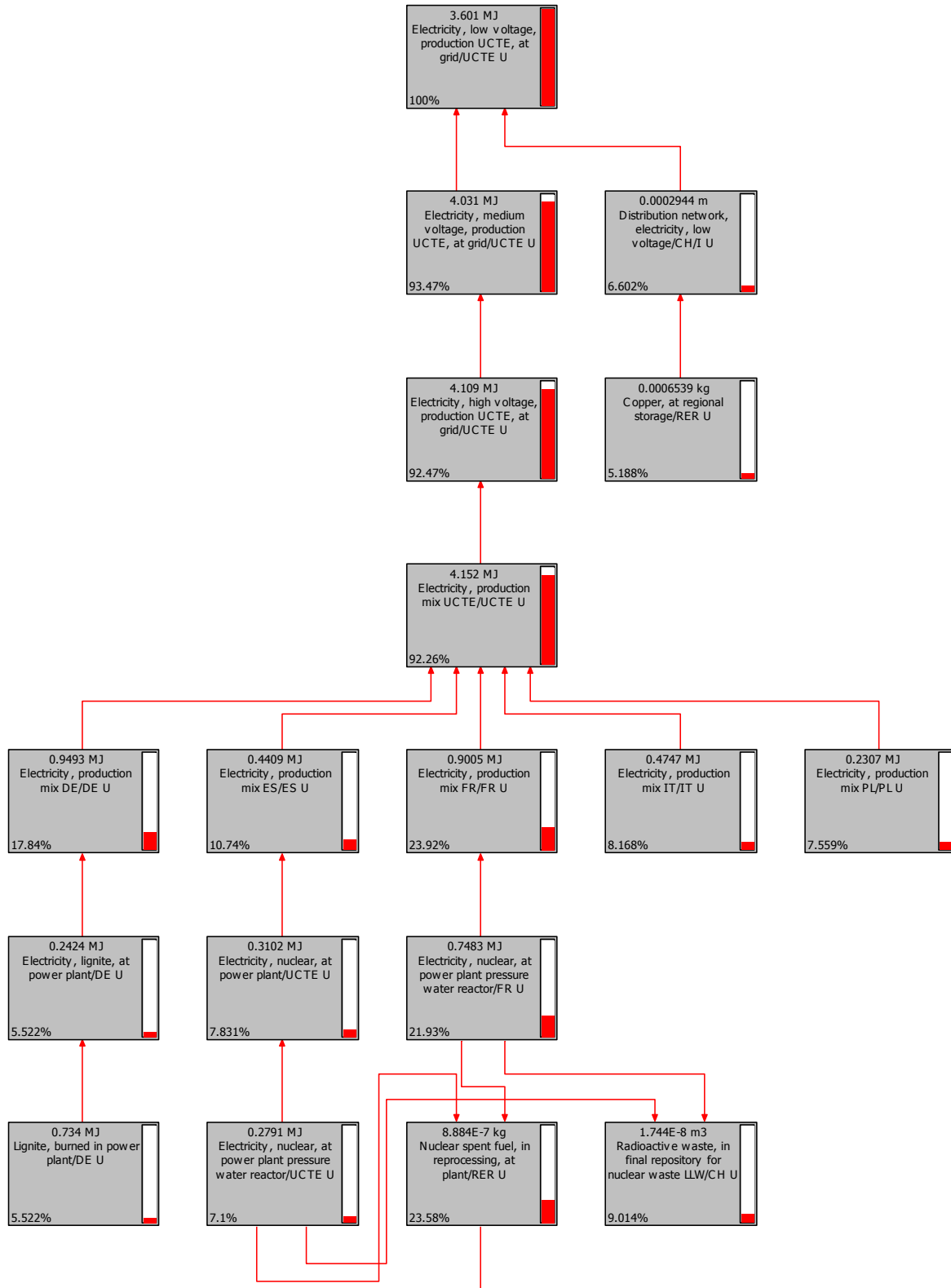


Abbildung A 49 Herkunft Umweltbelastung (Methode der ökologischen Knappheit 2006), Strommix UCTE

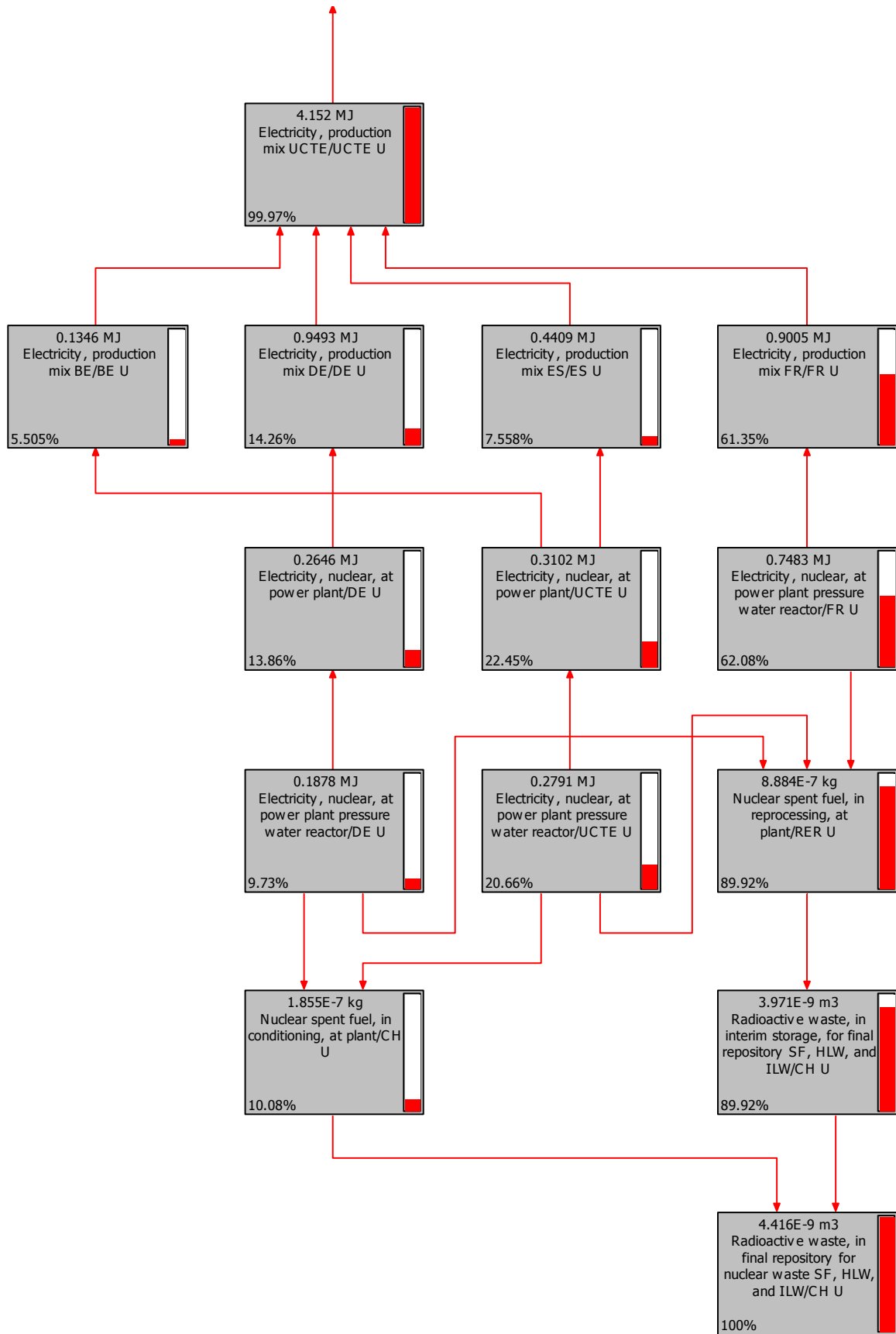


Abbildung A 50 Herkunft radioaktive Abfälle, Strommix UCTE

## **Energiebedarf Batterien-Herstellung, ecoinvent Datenbestand v2.2**

Der Energieverbrauch in der Herstellung der Li-Ionen-Batterie wurde im ecoinvent Datenbestand v2.2 wie folgt hergeleitet (Notter et al. 2010). Insgesamt ergibt dies einen Stromverbrauch pro kg Batterie von weniger als 0.2 kWh und einen thermischen Energiebedarf von ca. 1 MJ pro kg Batterie.

### **Cathode manufacture (per kg):**

- Mechanical drive for pumping slurry, coating, coiling, cutting: 0.002 kWh electricity
- Evaporating water, heating active material, alu-foil, binder, solvent, black carbon: 0.65 MJ natural gas

### **Anode manufacture (per kg):**

- Mechanical drive for pumping slurry, coating, coiling, cutting: 0.002 kWh electricity
- Evaporating water, heating active material, alu-foil, binder, solvent, black carbon: 1.22 MJ natural gas per kg anode

### **Separator manufacture (per kg):**

- Mechanical drive for pumping slurry, coating, coiling, cutting: 0.002 kWh electricity
- Evaporating solvent, heating separator base materials: 0.19 MJ natural gas

### **Single cell manufacture:**

- 0.327 kg cathode, 0.401 kg anode, 0.054 kg separator,
- 0.104 kWh electricity for first charge,
- 0.002 kWh electricity for calendaring anode, separator, cathode
- 0.065 MJ natural gas for Heating anode, cathode and separator

### **Li-Ion-battery manufacture:**

- 0.8 kg single cells
- 0.145 kg unalloyed steel
- 0.005 kg electronics and cabling
- 0.108 kWh electricity for testing and activating

Datenquelle bei Energieverbrauchsangaben jeweils: "Estimation by M. Gauch, R. Widmer"

# Dominanzanalyse Batterieherstellung

## Li-Ion-Batterie, ESU-services

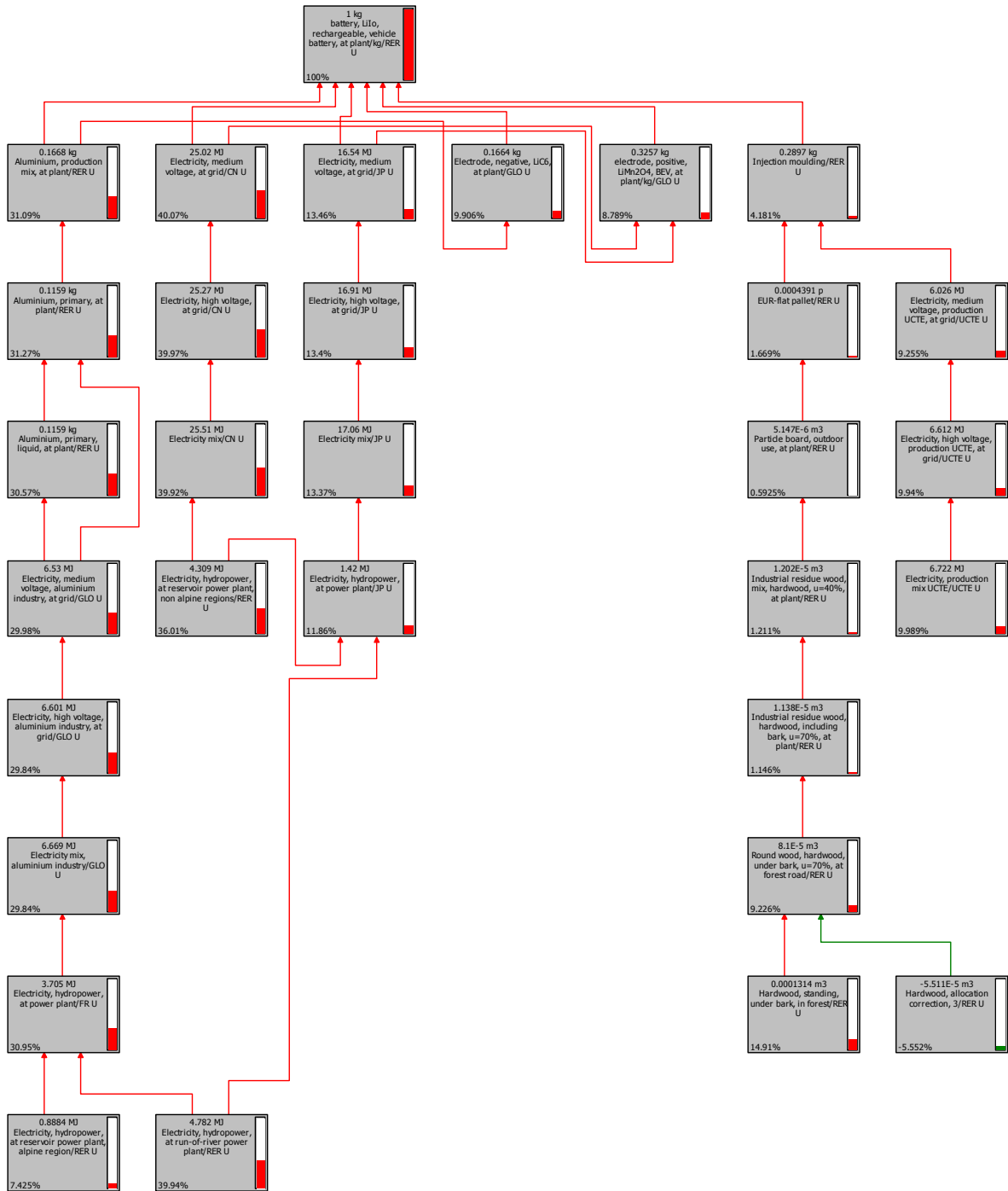


Abbildung A 51 Herkunft Kumulierter Energieaufwand, erneuerbar, Li-Ionen Batterie, ESU-services

# Anhang

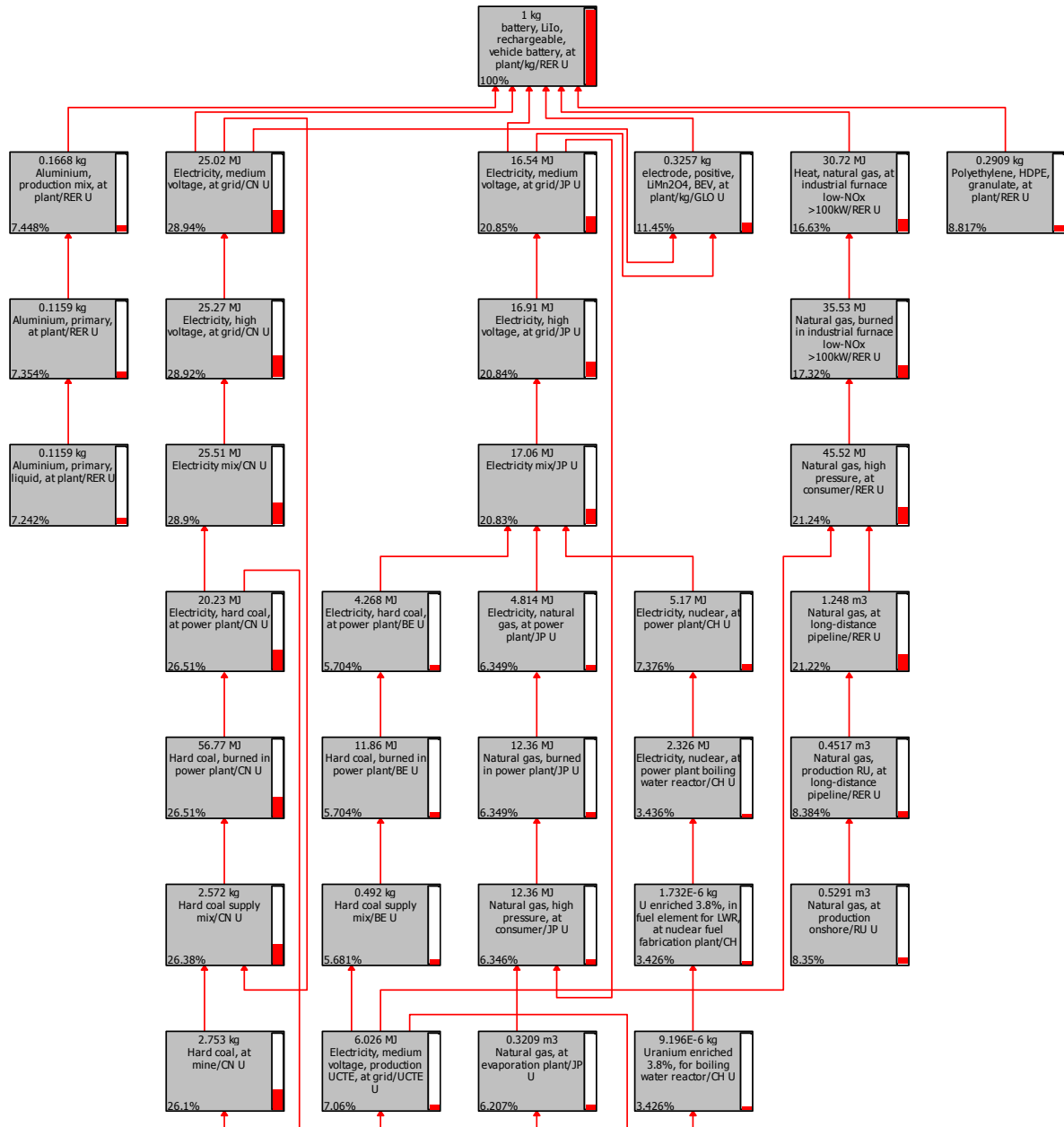


Abbildung A 52 Herkunft Kumulierter Energieaufwand, nicht erneuerbar, Li-Ionen Batterie, ESU-services



# Anhang

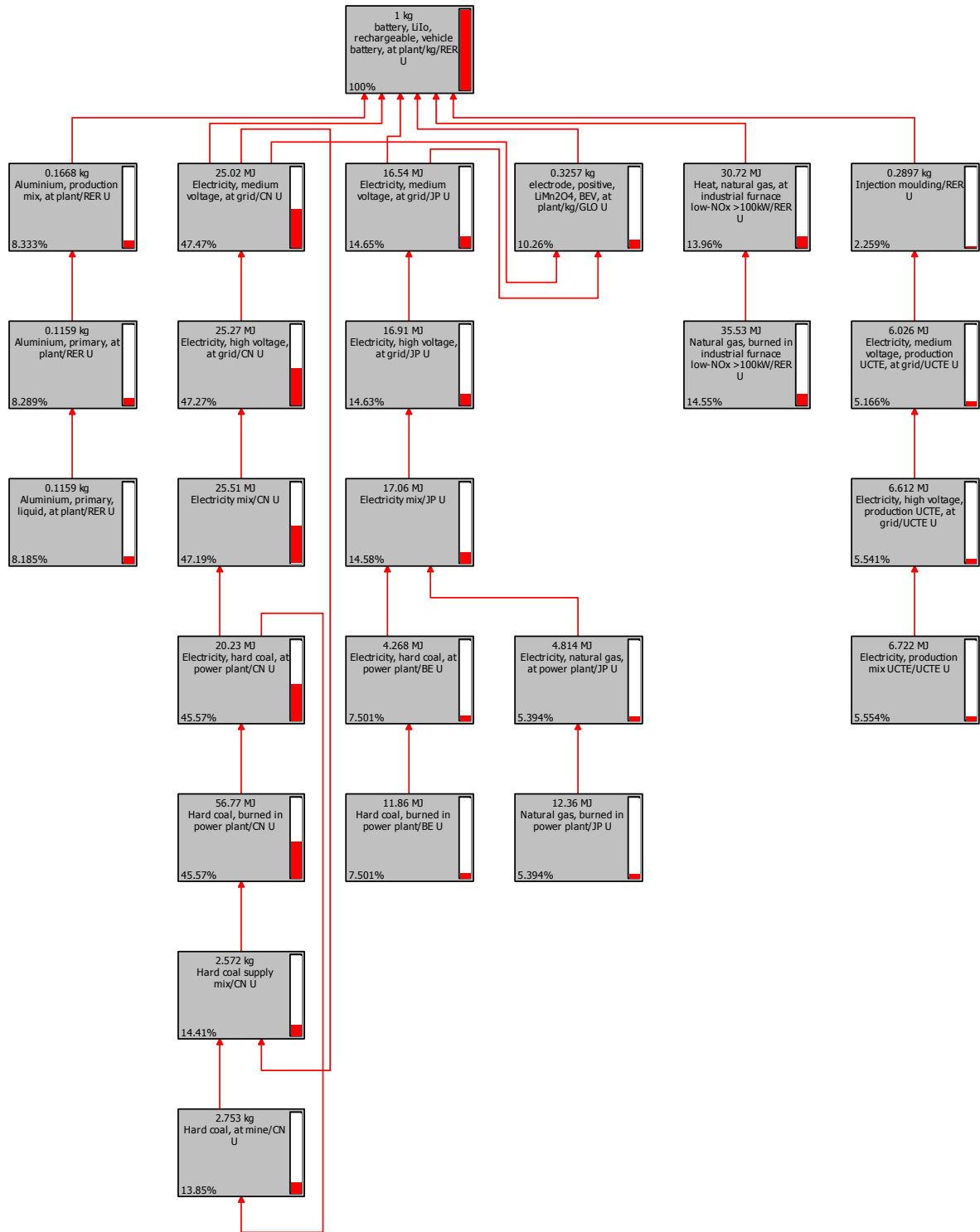


Abbildung A 53 Herkunft Treibhausgas-Emissionen, Li-Ionen Batterie, ESU-services

# Anhang

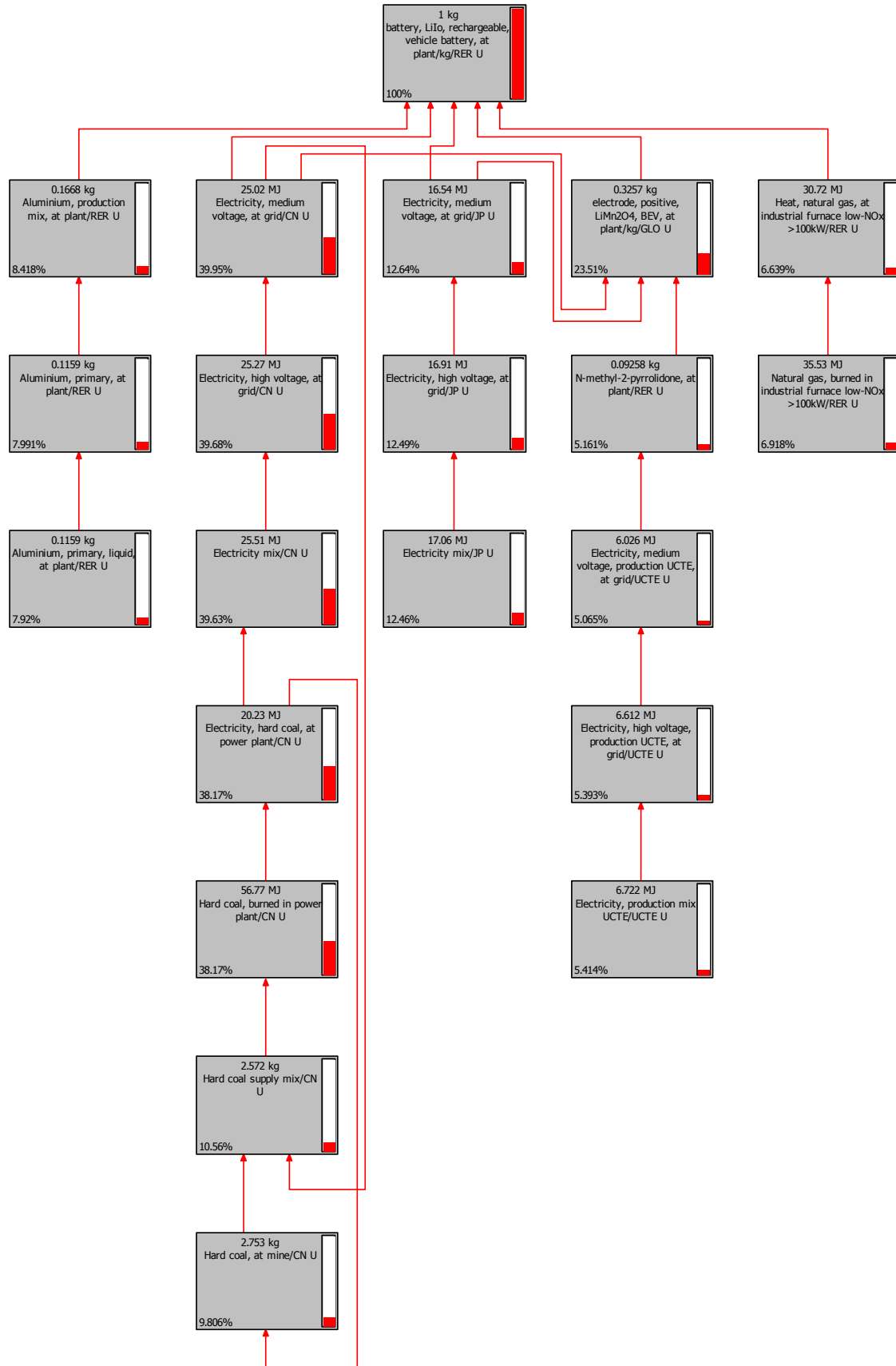


Abbildung A 54 Herkunft Umweltbelastung (Methode der ökologischen Knappheit 2006), Li-Ionen Batterie, ESU-services

# Anhang

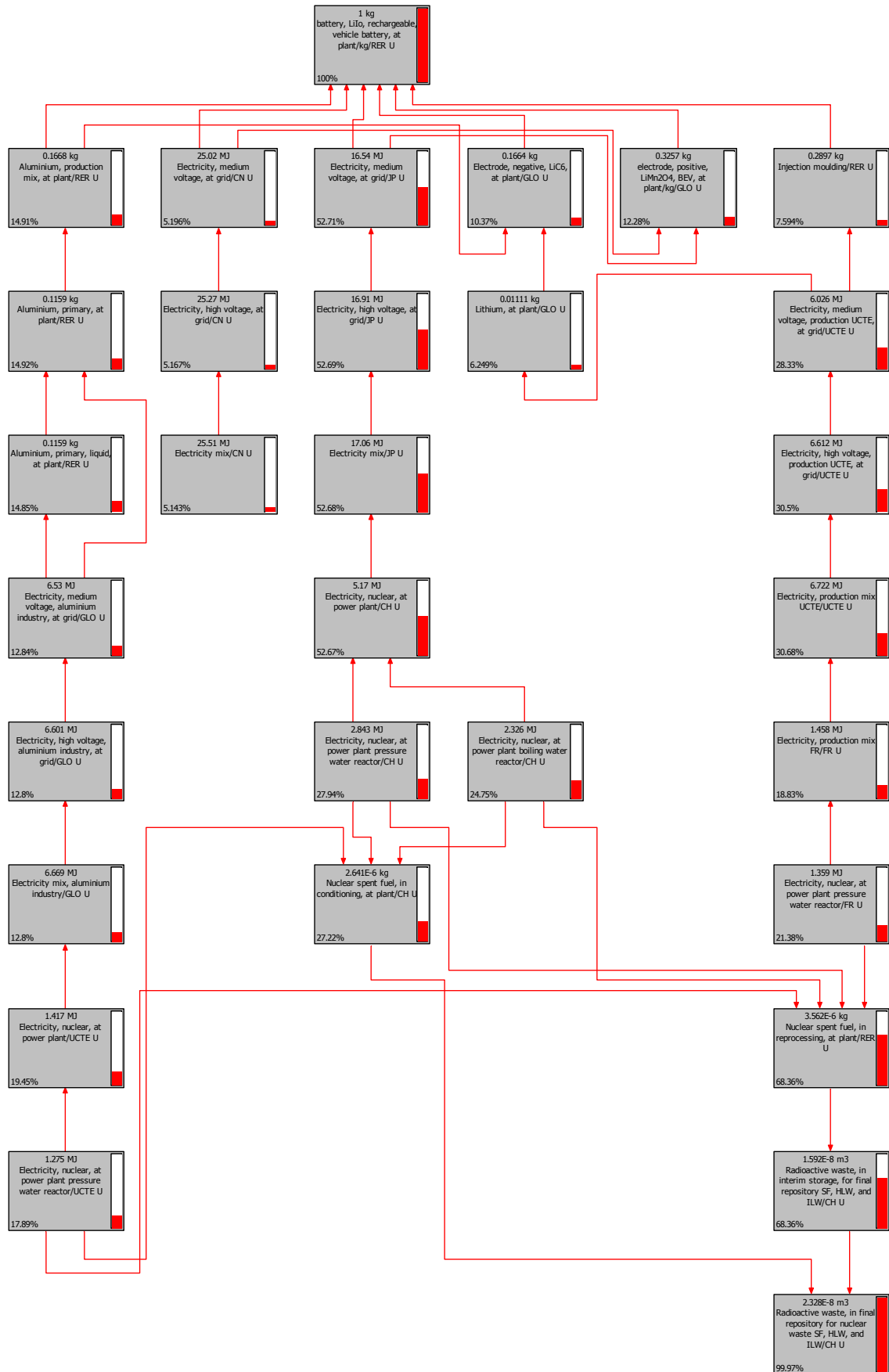


Abbildung A 55 Herkunft radioaktive Abfälle, Li-Ionen Batterie, ESU-services

Li-Ion-Batterie, ecoinvent Zentrum

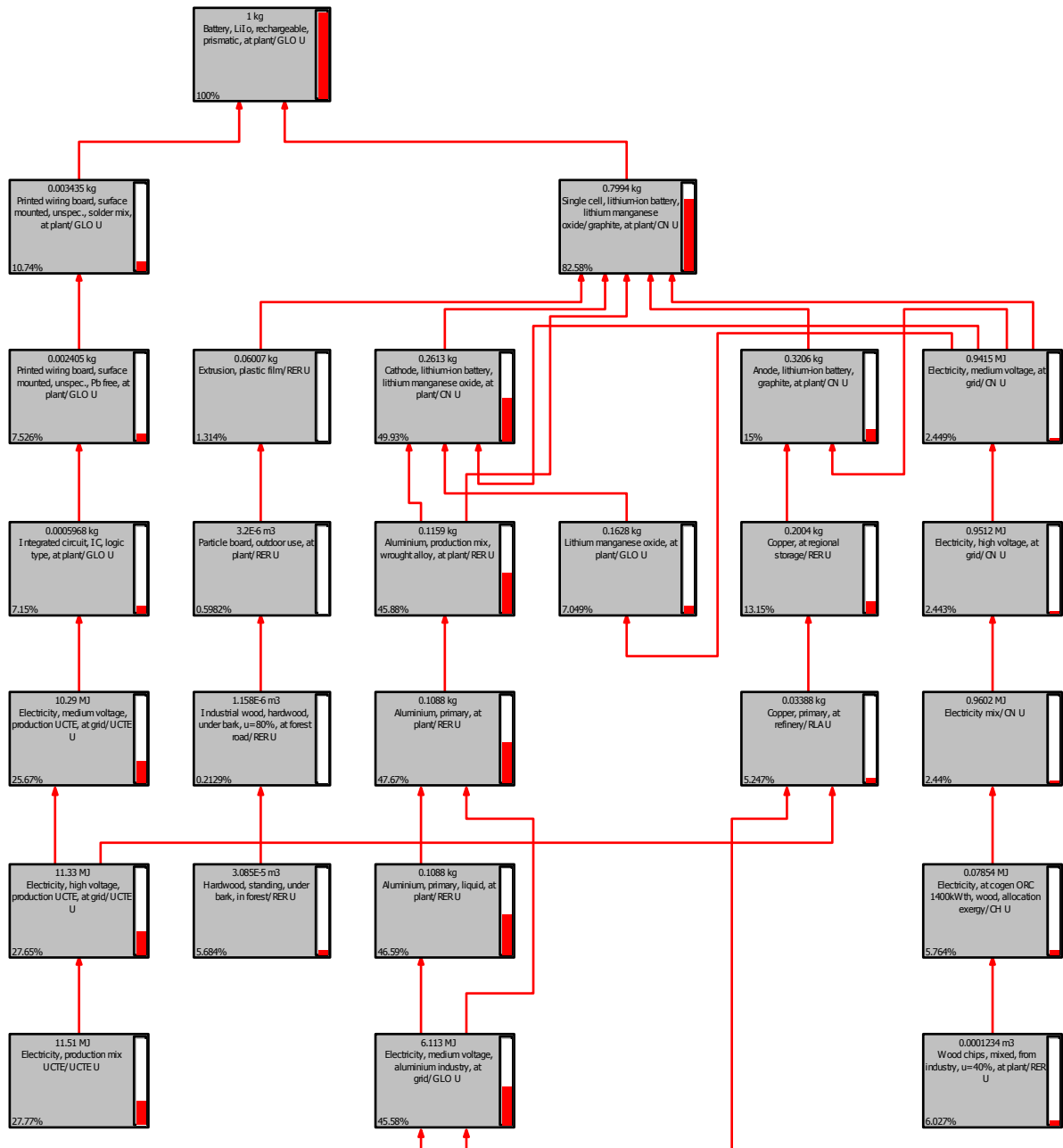


Abbildung A 56 Herkunft Kumulierter Energieaufwand, erneuerbar, Li-Ionen Batterie, ecoinvent Zentrum

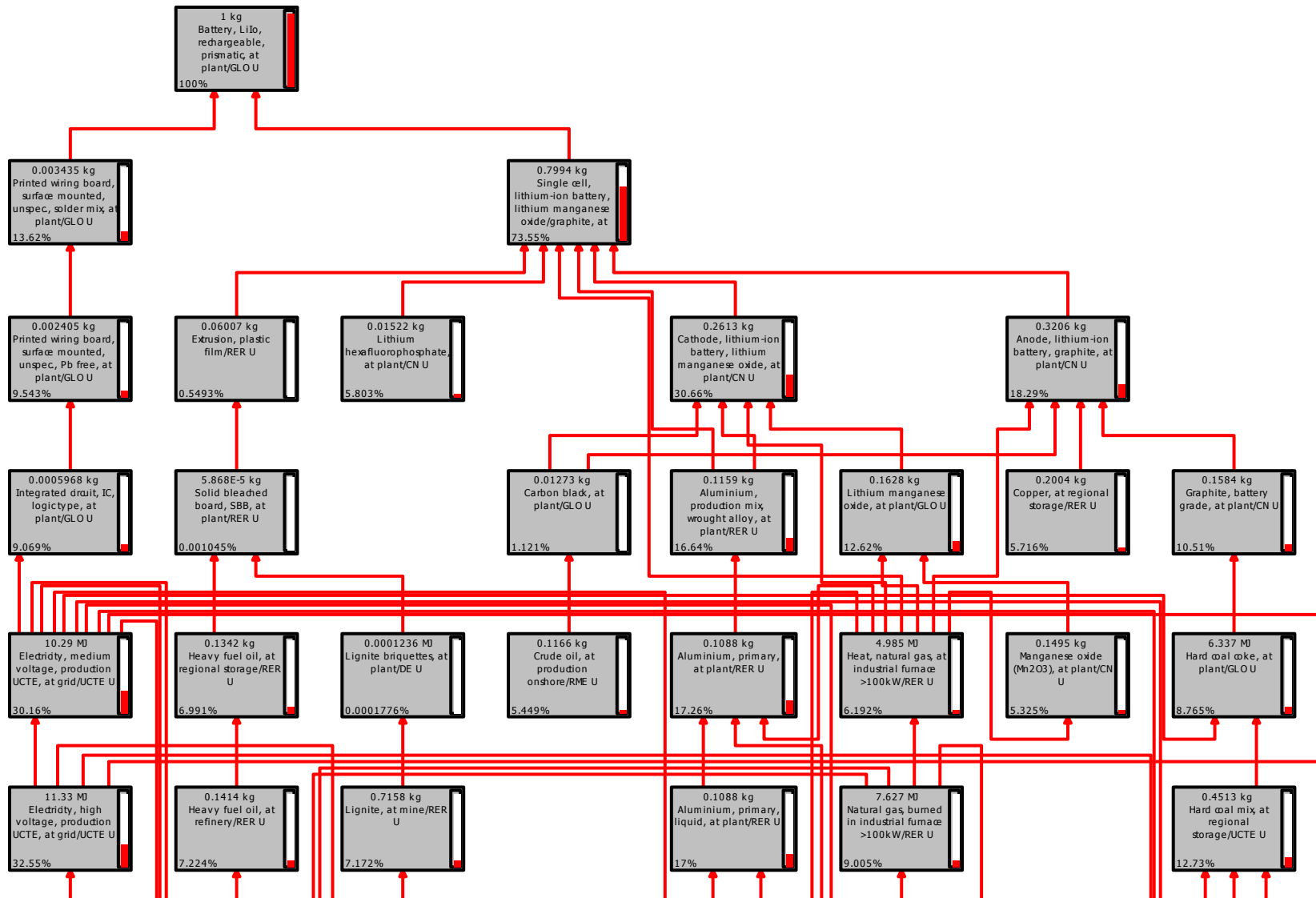


Abbildung A 57 Herkunft Kumulierter Energieaufwand, nicht erneuerbar, Li-Ionen Batterie, ecoinvent Zentrum

# Anhang

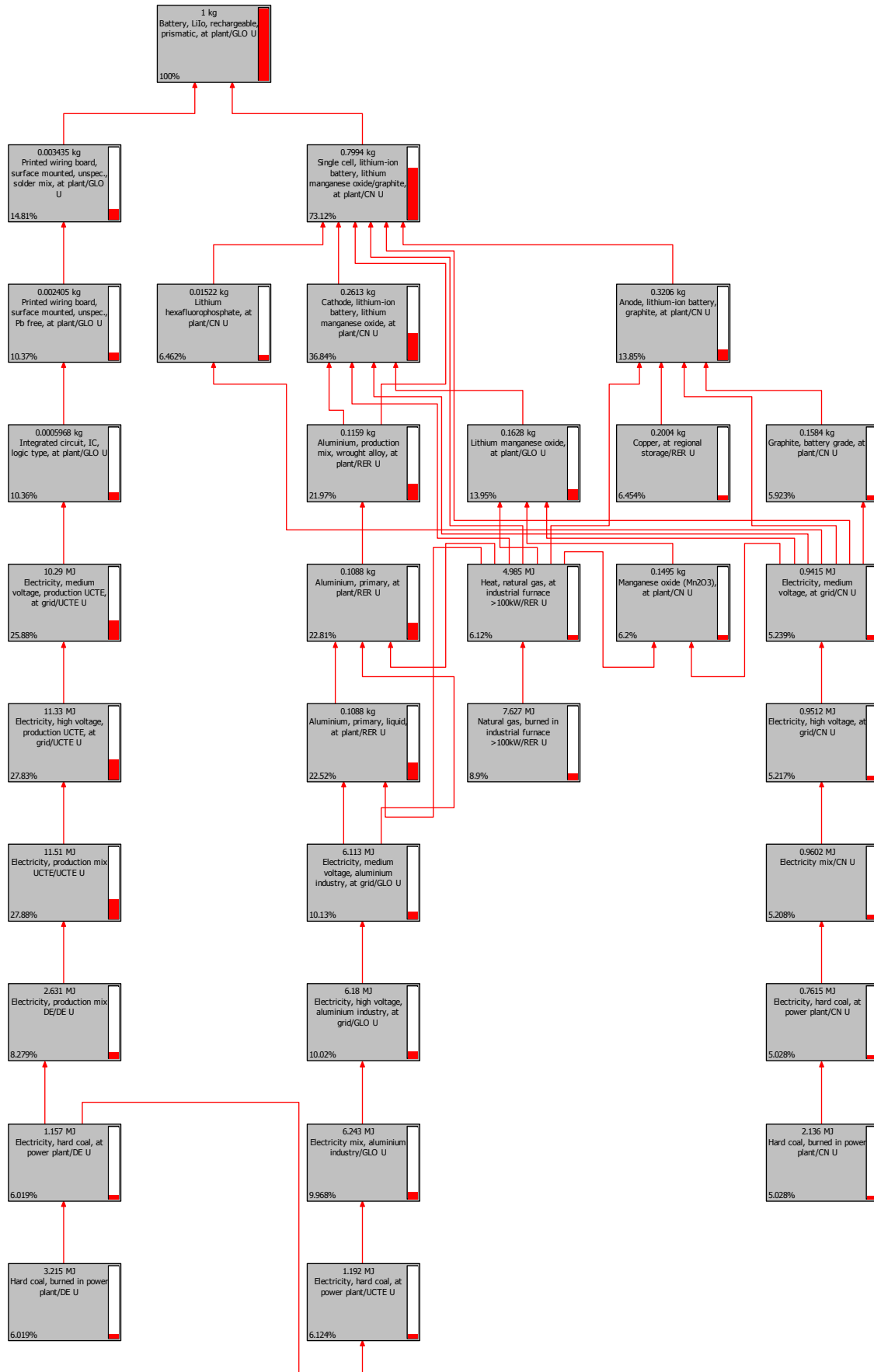


Abbildung A 58 Herkunft Treibhausgas-Emissionen, Li-Ionen Batterie, ecoinvent Zentrum

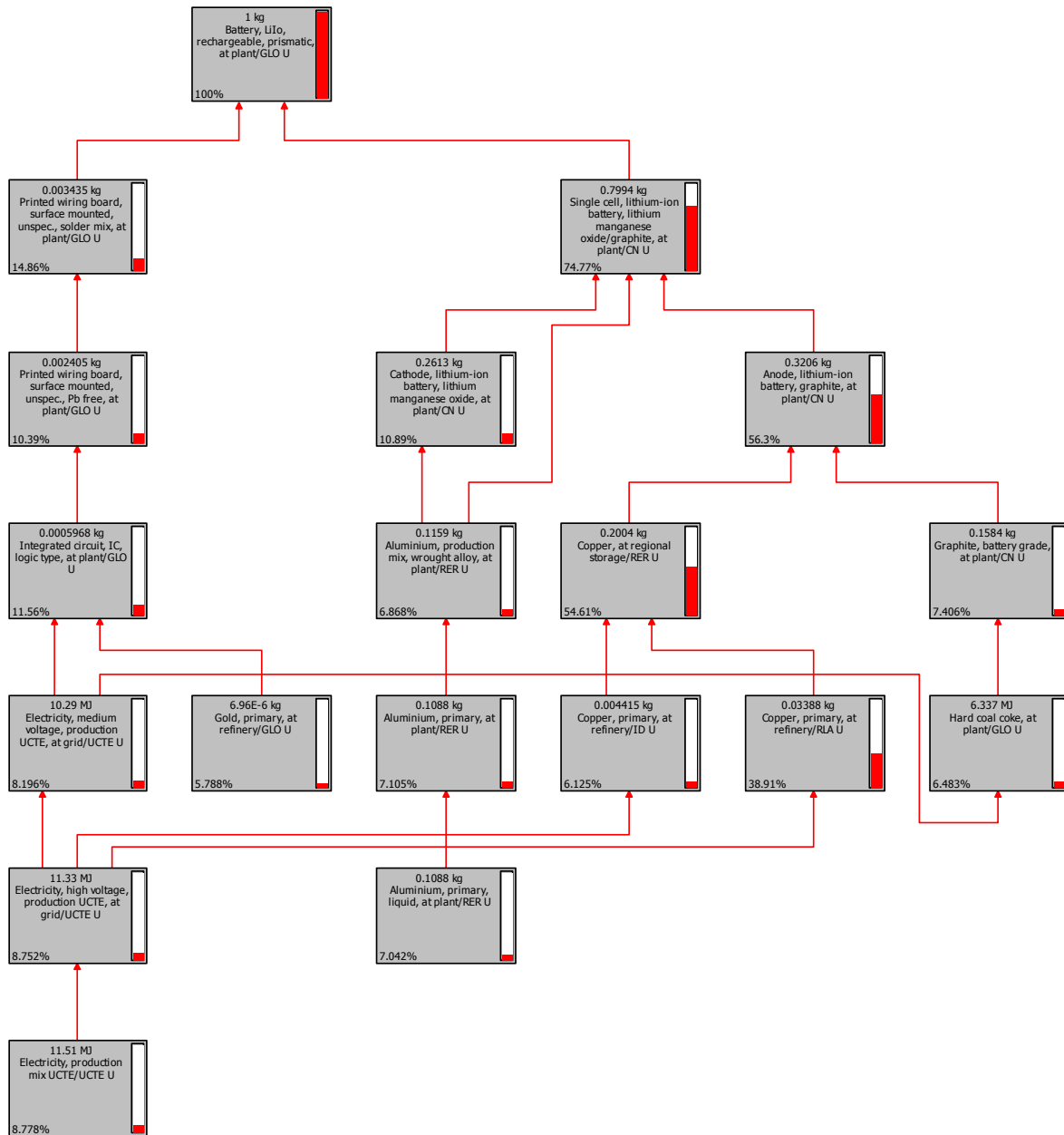


Abbildung A 59 Herkunft Umweltbelastung (Methode der ökologischen Knappheit 2006), Li-Ionen Batterie, ecoinvent Zentrum

# Anhang

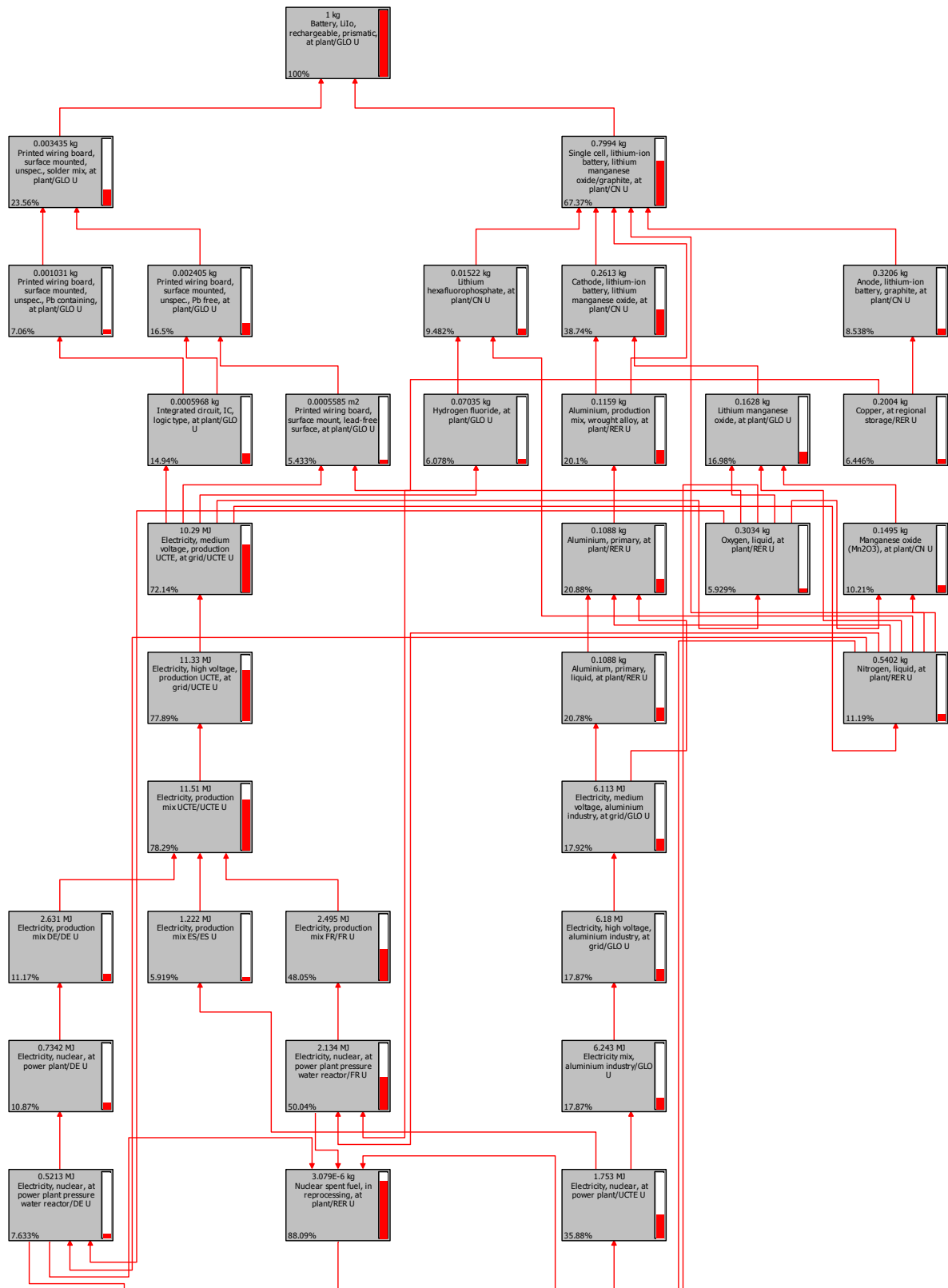


Abbildung A 60 Herkunft radioaktive Abfälle, Li-Ionen Batterie, ecoinvent Zentrum

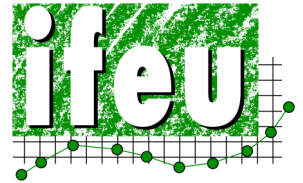


## Basistabelle Verminderungspotenzial der Umweltbelastung

Die nachstehende Tabelle zeigt die Ergebnisse für den Fall, dass der gesamte Personenwagenbestand aus Durchschnitts-Pkw (Ist-Zustand), aus Elektroautos, aus verbrauchsarmen Dieselaautos beziehungsweise aus dem meistverkauften VW Golf besteht. Berechnung des Reduktionspotenzials mit einem Anteil von 7 % Inverkehrsetzungen neuer Pkw.

|  | KEA<br>erneuerbar       | KEA nicht<br>erneuerbar | Klimawande<br>l             | Umweltbela<br>stung        | rad. Abfälle        | C-14        |
|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------------|---------------------|-------------|
| Impact category                        |                         |                         | IPCC GWP 100                | Total                      | Raw                 | Air         |
| Unit                                   |                         |                         | kg CO2 eq                   | Pt                         | m3                  | kBq         |
| Transport, passenger car/CH U          | 6068693870              | 2.51346E+11             | 14968722000                 | 1.75879E+13                | 23.610551           | 95925303    |
| transport, passenger car, electric, Li | 22404449030             | 2.08715E+11             | 7356245600                  | 1.25405E+13                | 84.374016           | 363320370   |
| transport, passenger car, diesel, Gol  | 5949354890              | 1.70497E+11             | 9535052000                  | 8.5669E+12                 | 22.768417           | 93360318    |
| Transport, passenger car, petrol, Go   | 6134633460              | 2.24954E+11             | 13176179000                 | 1.22761E+13                | 23.804749           | 97006227    |
| Reduktion                              | kumulierter<br>TJ Öl-eq | kumulierter<br>TJ Öl-eq | Klimawandel<br>1000t CO2-eq | Umweltbelas<br>Mia. UBP 06 | radioaktive A<br>m3 | C-14<br>MBq |
| Elektroauto                            | 2'984                   | -1'144                  | 533                         | 353                        | -4.3                | -18718      |
| VW Golf BlueMotion                     | 5'659                   | 8                       | 380                         | 631                        | 0.1                 | 180         |
| VW Golf 1.4 TSFI                       | 1'847                   | -5                      | 125                         | 372                        | 0.0                 | -76         |
|  | NOX                     | PM2.5                   | PM2.5-10                    | Dieselryss                 | PM10 Auspuff        |             |
| Impact category                        | Air                     | Air                     | Air                         | Luft                       | Luft                |             |
| Unit                                   | kton                    | kton                    | kton                        | kton                       | kton                |             |
| Transport, passenger car/CH U          | 29.324077               | 2.3045192               | 2.2114691                   | 0.56258125                 | 0.8036875           |             |
| transport, passenger car, electric, Li | 16.554163               | 3.0928939               | 2.7614321                   | 0                          | 0                   |             |
| transport, passenger car, diesel, Gol  | 17.250131               | 1.67151                 | 1.9392775                   | 1.68438E-05                | 0.00048125          |             |
| Transport, passenger car, petrol, Go   | 14.773557               | 1.9723961               | 2.2423116                   | 0.05726875                 | 0.0683375           |             |
| Reduktion                              | NOX<br>Tonnen           | PM 10<br>Tonnen         | PM10 Auspuff                | Dieselryss Auspuff         |                     |             |
| Elektroauto                            | 894                     | -94                     | 56.3                        | 39.4                       |                     |             |
| VW Golf BlueMotion                     | 845                     | 63                      | 56.2                        | 39.4                       |                     |             |
| VW Golf 1.4 TSFI                       | 1019                    | 21                      | 51.5                        | 35.4                       |                     |             |
| Anteil Erstinverkehrsetzung            | 0.07 der Gesamtflotte   |                         |                             |                            |                     |             |

# Stellungnahme ifeu Heidelberg GmbH



**Stellungnahme zu  
„Umweltauswirkungen von Elektroautos – ein Argumentarium“  
von Rolf Frischknecht (ESU-Services)**

Die vorliegende Stellungnahme bezieht sich vereinbarungsgemäß auf die Seiten 1 – 28 der Studie. Dabei stehen die Ergebnisse zu den Umweltwirkungen von Elektrofahrzeugen und insbesondere die Strombereitstellung, Batterieherstellung und der Verbrauch von Elektro- und herkömmlichen Fahrzeugen im Fokus. Die Methode der ökologischen Knappheit (MöK) ist nicht Teil der Stellungnahme.

## **Allgemein**

Das Argumentarium von Rolf Frischknecht stellt eine umfassende Betrachtung der ‚Umweltaspekte von Elektroautos‘ dar, die viele wichtige Punkte qualitativ und quantitativ analysiert und diskutiert. Dabei werden alle Abschnitte des Lebensweges – Fahrzeugherstellung und -nutzung sowie Energiebereitstellung – berücksichtigt.

Im Folgenden werden die einzelnen Abschnitte fachlich kommentiert, ungeachtet dessen, ob die angesprochenen Punkte (oder ihre Bearbeitungstiefe) Bestandteil des Auftrags waren oder nicht. Die Anmerkungen stellen damit nicht zwangsweise eine Kritik an der Studie dar, sondern dienen auch dazu, das Thema fachlich weiterzuentwickeln und neue Denkanstöße zu geben.

## **1 Zweck und Inhalt**

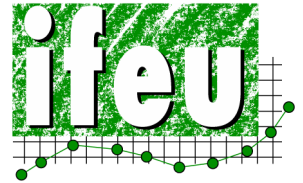
Es wäre unseres Erachtens hilfreich, wenn in diesem Kapitel darauf eingegangen würde, auf welche Jahre sich die Bewertung von Elektromobilität bezieht und warum der Fokus auf rein batterieelektrischen Fahrzeugen liegt.

## **2 Umweltindikatoren**

Für eine erste Übersicht wird die Auswahl der vier Umweltindikatoren „Treibhausgasemissionen“, „kumulierter Energieaufwand“ (differenziert in erneuerbar und nicht erneuerbar), „MoK“ und „hochradioaktive Abfälle“ von uns als hinreichend angesehen. Für eine umfassende Bilanz sollten weitere Indikatoren (Versauerung, Eutrophierung etc.) sowie Indikatoren zum Ressourcenverbrauch hinzugenommen und analysiert werden. Die Bewertung sollte neben der heutigen Situation insbesondere auch die zukünftige Situation (z.B. 2030) in Bezug auf Klimaschutz, Ressourcen etc. berücksichtigen.

## **3 Ökobilanz Stromerzeugung**

Die Umweltwirkungen durch die Stromerzeugung sind Kernthema bei der Betrachtung von Elektroautos. Für eine umfassende Bewertung müssen, wie von Frischknecht durchgeführt - neben dem Strom-Mix (rein beschreibende



Betrachtung) auch die Wirkungen von Systemänderungen durch die Einführung von Elektrofahrzeugen berücksichtigt werden.

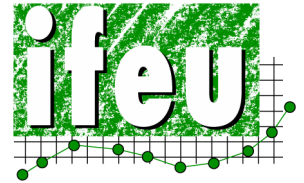
### Modellierung des Stroms

Die Modellierung des Strommixes ist von entscheidender Bedeutung für das Ergebnis der Bilanz. Frischknecht geht folgendermaßen vor:

Er berechnet unter Berücksichtigung der zertifizierten, anderweitig veräußerten Strommengen aus dem Konsummix einen „Ecoinvent-Mix“. Dieser ist der Benchmark. Alternativ sind folgende Perspektiven denkbar:

- Der **Grenzstrommix**, der sich in einer **jahresbilanziellen Betrachtung** aus Szenarien für die zukünftige Entwicklung des Energiesystems ergibt. In dieser Betrachtung wird der steigende Strombedarf eines neuen Verbrauchssegments mit dem Zubau/Rückbau im Kraftwerkspark in Verbindung gebracht. Dadurch sind es vielfach einzelne Kraftwerkstypen, in Deutschland beispielsweise Gas-GuD und Steinkohlekraftwerke, die als Strommix bilanziert werden. Ein solcher Grenzstrommix wird von Frischknecht nachrichtlich zitiert.
- Ein **Grenzstrommix**, der sich in einer **zeitlich aufgelösten Betrachtung** ergibt. Hier wird zusätzlich das zeitliche Ladeprofil berücksichtigt. Beispielsweise ist anzunehmen, dass auf Grund des Tankverhaltens und der zukünftigen variablen Tarife zunehmend nachts getankt werden wird. Dies führt zu steigenden Anteilen an heutigen „Mittellast-Kraftwerken“, in Deutschland beispielsweise von Steinkohle-KW. Ein solcher zeitaufgelöster Grenzstrommix ist im hohen Maß vom Betrachtungsland, den Annahmen bezüglich energiewirtschaftlicher Rahmensetzungen und der Tarifgestaltung abhängig. Beispielsweise sind auch Tarife denkbar, bei denen das Elektrofahrzeug bei Starkwind oder hoher Solarstromerzeugung bevorzugt tankt.
- Eine **virtuelle Bilanzkreisbildung**, bei der beispielsweise basierend auf Vertragsbeziehungen (kauft der Elektroautofahrer zertifizierten Ökostrom?) der Strombezug modelliert wird. Eine solche Betrachtungsweise setzt voraus, dass die Kunden, die Ökostrom kaufen, diesen auch in ihrer Bilanz verbuchen dürfen, und er (wie Frischknecht es konsequenterweise macht) aus dem Mix herausgerechnet wird. Eine alternative Betrachtungsweise wäre, beim Ökostrom nur den Anteil als erneuerbar anzuerkennen, der als durch den Ökostrombezug zusätzlich anzurechnen wäre. Eine solche Betrachtungsweise nehmen einige deutsche Ökostromlabels ein, in dem bestimmte Anteile von Neuanlagen oder neu initiierten Anlagen gefordert werden. Diese Betrachtungsweise nimmt – überspitzt formuliert – den Standpunkt ein, dass beispielsweise Strom aus einem alten Wasserkraftwerk ansonsten nicht für die Betankung von Elektroautos eingesetzt, sondern exportiert worden wäre und in Deutschland Steinkohle-Strom substituiert hätte.

Während in erster Betrachtungsweise Frischknechts Aussage „Der Kauf



von zertifizierter Elektrizität auf Basis von erneuerbaren Energiequellen ... verringern die klimaschädigenden Emissionen des Elektroautos maßgeblich“ stimmt, gilt dies in zweiter Interpretation nur für den Anteil, der als zusätzliche und mit Elektromobilität kausal verknüpfte Strommenge gewertet werden kann (siehe auch Diskussion um additionality im CDM).

### **Bilanzierung Strom** (Tabelle 2)

Die Bilanzen in Tabelle 2 beziehen sich offenbar auf den heutigen Stand der Technologie. Beispielsweise hat ein modernes neues Steinkohle-KW deutlich geringere THG-Emissionen als in Tabelle 2 dargestellt (rd. 800 g/kWh). Darauf ist in Tabelle 2 (z.B. Steinkohle Deutschland – aktueller Kraftwerkspark) und entsprechend in Tabelle 7 hinzuweisen.

### **Wechselwirkungen zwischen E-Autos und Stromnetz**

*3.4.1. Gemäss einer VDE-Studie zu E-Mobility (VDE 2010) und Vertretern der Stromwirtschaft (Allwardt 2009) ist ein Netzausbau wegen des Ausbaus der Kraftwerkskapazitäten auf Basis der erneuerbaren Energien erforderlich und zum transnationalen Verbinden der erneuerbaren Energiequellen. Die Marktdurchdringung von Elektroautos spielt hierbei praktisch keine Rolle.*

Diese Aussage trifft nicht auf Verteilnetzebene zu. Arbeiten beispielsweise der RWTH Aachen deuten durchaus auf mögliche Engpässe in Verteilnetzen mit ungünstigen Netztopologien hin.

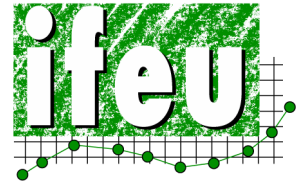
### **Autobatterien als mobiler Speicher im Stromnetz**

Wie von Frischknecht aufgeführt gibt es viele offene Fragen zu diesem Thema. In verschiedenen Feldtests wird das Thema gesteuertes Laden getestet – dies soll vollautomatisch ohne Aktivität des Fahrzeugnutzers passieren und könnte für Flottenbetreiber ein relevantes Thema werden. Das Thema V2G dagegen wird aus den von Frischknecht genannten Gründen auch in Deutschland meist nicht als kurzfristige Option angesehen. Es muss auch noch unterschieden werden zwischen zur Verfügung gestellter bzw. abgenommener Leistung (kW) und Energie (kWh). So können z.B. 1 Mio. Elektroautos (10 kWh Speicherkapazität/Fzg.) lediglich 10 GWh an Strom (etwa Menge eines Pumpspeichersees wie Goldisthal) aufnehmen. Diese Fahrzeuge könnten dagegen 3 GW an positiver/negativer Regelleistung bereitstellen (bei Anschlussleistung von 3 kW), was der Hälfte der gesamten Pumpspeicherleistung in D entspricht.

### **Spezifische Umweltwirkungen von Strom aus neu gebauten Kraftwerken**

*3.4.3. Aus Sicht der Ökobilanz sind bei neu gebauten Kraftwerken (Wasserkraftwerke, Windkraftwerke, Kernkraftwerke oder Gaskraftwerke) keine nennenswerten Unterschiede in den Emissionen pro kWh zu erwarten.*

Dies ist missverständlich formuliert: Was ist gemeint – jeweils pro Kraftwerk, oder zwischen den Kraftwerken?



**Kap. 7.4: Die Wahl des Strommixes hat ebenfalls einen grossen Einfluss auf die Treibhausgas-Emissionen aber auch auf die übrigen Umweltkennwerte**

Vorschlag: Vor allem die Wahl des Strommixes hat einen großen Einfluss auf die Treibhausgas-Emissionen, aber auch auf die übrigen Umweltkennwerte.

### **Wissenslücken Ökobilanz Stromerzeugung**

Insbesondere die Zusammensetzung des Kraftwerksparks (Anteil Regenerative) sowie die Betrachtungsweise (Durchschnittsmix vs. Marginalmix) spielen eine ausschlaggebende Rolle bei der Ökobilanz. Die Differenzen in den Daten bei der Herstellung der verschiedenen regenerativen Energieerzeugungsmöglichkeiten werden als kleiner eingeschätzt – sollten aber in Sensitivitäten betrachtet werden. Zudem sollte auch bei konventionellen Fahrzeugen der Einfluss von Biokraftstoffen und unkonventionellen Energieträgern (z.B. Ölschiefer) betrachtet werden.

## **4 Ökobilanzen Komponenten**

Frischknecht fokussiert auf die Herstellung der Batterien. Zusätzlich sind aber auch andere zwischen den Antriebskonzepten differierende Komponenten von Bedeutung, z.B. E-Motor bzw. Verbrennungsmotor sowie Abgasnachbehandlung bzw. Leistungselektronik.

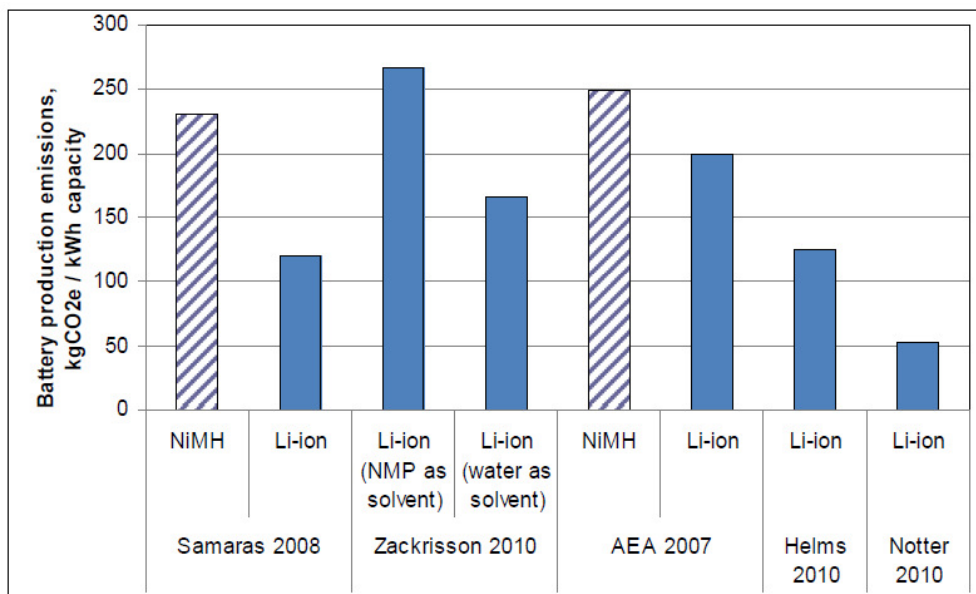
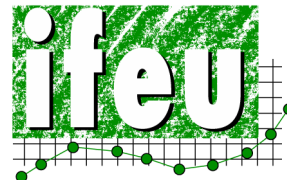
### **Ökobilanzen Lithium-Batterie**

Wie von Frischknecht beschrieben gibt es viele Unsicherheiten in der Bilanzierung der Umweltwirkungen der Li-Batterie. Batterietypen mit abweichenden Materialzusammensetzungen sind auf dem Markt. Wenige Informationen liegen zur Zusammensetzung und Produktion der Batterie vor. Zudem werden sich die Batterieeigenschaften und Produktionsverfahren in den nächsten Jahren dynamisch weiterentwickeln.

Die von Frischknecht genannten Ökobilanzen (Tabelle 4) beruhen auf Daten, die durch sehr unterschiedliche Methoden gewonnen wurden. Eine Übersicht über aktuelle Batteriedaten gibt eine EU-Studie (siehe Abbildung)<sup>1</sup>. Hier werden die Emissionen auf kWh Kapazität bezogen. Dieser Bezug hat gegenüber dem in Tab. 4 gewählten Bezug den Vorteil, dass unterschiedliche Energiedichten berücksichtigt werden.

---

<sup>1</sup> Duleep et al. (2011): Impacts of Electric Vehicles - Deliverable 2. Assessment of electric vehicle and battery technology. CE Delft.



Source: Samaras, 2008; Zackrisson, 2010; SEI, 2007; Helms, 2010; Notter, 2010.

### Wissenslücken Ökobilanzen Batterien

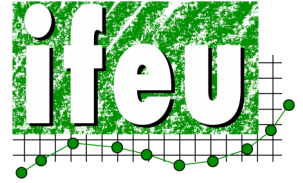
Wie von Frischknecht betont sind alle genannten Abschätzungsverfahren mit großen Unsicherheiten verbunden. Die von Frischknecht hervorgehobene Lithiumbilanz macht dabei nur einen Teil der Batterieaufwendungen aus. Dabei sind die Daten von Annahmen mit etlichen Unsicherheiten abhängig. Frischknecht schreibt zwar, dass bei Li-Ionen-Batterien noch Entwicklungspotential vorhanden ist, macht aber keine entsprechende Sensitivitätsbetrachtung.

Wichtigster Parameter heute ist – wie von Frischknecht betont - die Lebensdauer der Batterie. Zukünftig wird sich die Lebensdauer der Batterie und damit die Umweltbilanz der Fahrzeugherstellung jedoch wahrscheinlich deutlich verbessern. Konkret: Hält die Batterie über die gesamte Lebensdauer des Fahrzeugs, halbiert sich bereits damit die Umweltbilanz – ungeachtet weiterer Fortschritte hinsichtlich Energiedichte, Skaleneffekte etc.

## 5 Verbrauchsmessungen und Realverbrauch bei Elektrofahrzeugen

*Der Verbrauch von Elektrofahrzeugen wird gemäss dem UN/ECE Reglement 101 gemessen. Der Stromverbrauch von reinen Elektrofahrzeugen wird ermittelt, indem der NEFZ mit einem vollen Akku als Ausgangszustand gefahren wird. Nach dem Fahrzyklus wird die Batterie wieder vollständig aufgeladen und die dafür nötige elektrische Leistung gemessen.*

Prinzipiell kann man den Verbrauch auch On-Board oder im Feldversuch messen. Die genannte Messung bezieht sich nur auf die Daten für die Typzulassung. Zurzeit werden umfangreiche Feldversuche durchgeführt, bei denen der Verbrauch ermittelt wird. Zudem wird von einigen Institutionen, wie z.B. dem ADAC, der Verbrauch von Elektrofahrzeugen in andern Zyklen ermittelt.



Solche Daten könnten ebenfalls für eine realistische Betrachtung herangezogen werden.

Es zeigt sich, dass die Klimatisierung (Kälte, Heizung) den höchsten Verbrauch neben dem Antrieb hat. Der Zuschlagsfaktor von 65% bzw. 70% erscheint aus unserer Sicht recht hoch. Hier stellt sich auch die Frage, inwieweit zwischen dem Verbrauch ab Netz (d.h. vor Ladeinfrastruktur) und Fahrverbrauch unterschieden wird.

## 6 Plug-In Hybrid-Fahrzeuge

Das Plug-In Hybrid Antriebskonzept wird aus Sicht vieler Experten in der Elektromobilitäts-Entwicklung der nächsten Jahre eine zentrale Rolle spielen. Daher ist es bedauerlich, dass keine Darstellung und Diskussion der Umweltbilanz in den Endergebnissen durchgeführt wurde.

Wie von Frischknecht beschrieben, liegt der zentrale Vorteil in der Reichweite und damit in der Möglichkeit zur Verringerung der mit Kosten und Umweltauswirkungen verbundenen Batteriekapazität. Auf der anderen Seite sind zwei komplette Antriebsstränge erforderlich, die ebenfalls mit Gewicht und Kosten verbunden sind. So mögen die Schlüsse aus der Umweltbilanz zwar qualitativ grob auf Plug-In Hybride übertragbar sein, quantitativ ist jedoch eine detaillierte Betrachtung notwendig.

Zur Bestimmung des Energieverbrauchs ist zusätzlich das Wechselspiel zwischen Verbrennungs- und Elektromotor zu berücksichtigen. Noch weniger als bei reinen Elektrofahrzeugen eignen sich hier Typprüfdaten zur Bestimmung eines realistischen Energieverbrauchs<sup>2</sup>. Insbesondere die Batteriekapazität hat hier einen großen Einfluss auf den Normwert nach ECE R101.

Die Referenz ‚Hinrich & Lambrecht 2007‘ sollte richtigerweise als ‚Helms & Lambrecht‘ zitiert werden.

## 7 Vergleich Ökobilanz Elektroauto mit fossil betriebenen Fahrzeugen

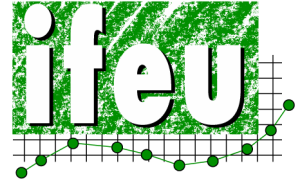
Hier sollte die Vergleichsbasis eindeutig definiert werden. Während beim konventionellen Pkw die Herstellerangaben des Golf BlueMotion verwendet werden, ist es beim Elektroauto ein nicht näher abgeleiteter Bedarf von 20 kWh/100 km. Arbeiten des IFEU weisen auf einen etwas höheren Realverbrauch hin. Wünschenswert wäre daher zusätzlich eine nähere Ableitung und Spezifikation des durchschnittlichen Elektrofahrzeugs, sowie des City-Cars.

Bei dem Vergleichsfahrzeug Golf BlueMotion handelt es sich um ein verbrauchsoptimiertes Fahrzeug. Zusätzlich wäre daher der Vergleich mit einem durchschnittlichen modernen Golf wichtig. Entsprechend der Diskussion in

---

<sup>2</sup> Siehe z.B. <http://www.zeit.de/auto/2010-11/plug-in-verbrauchsangaben>





Kapitel 5 sollten dabei für den Verbrauch auch keine Herstellerangaben für den NEFZ angesetzt werden - insbesondere wenn der Energieverbrauch des Elektrofahrzeugs als Realverbrauch ermittelt wurde.

Der Vergleich mit dem Flottendurchschnitt ist irreführend, zumindest sollte dieser Bezug in Abbildung 2 besser gekennzeichnet sein. In der Regel wird ein neues Fahrzeug beschafft, bei dem es sich entweder um ein modernes konventionelles Fahrzeug (mit Partikelfilter) handelt oder um ein modernes Elektrofahrzeug. Insbesondere bei den Schadstoffemissionen (z.B. Partikel), aber auch beim Verbrauch bestehen hier relevante Unterschiede. Zusätzlich wäre der Vergleich mit einem modernen Otto-Pkw interessant, der sich ebenfalls für eine Nutzung im Stadtverkehr bei niedrigen bis mittleren Fahrleistungen anbietet.

Da insbesondere die Batteriebilanzierung mit Unsicherheiten über die Lebensdauer der Batterie hinaus verbunden ist, wäre eine erweiterte Sensitivitätsbetrachtung wichtig, z.B. hinsichtlich Energiedichte und Skaleneffekten in der Fertigung.

## 8 Verminderung der Umweltbelastung durch Elektroautos

Es wird der Umweltentlastungseffekt gegenüber dem Schweizer Durchschnittsauto aus dem Jahr 2009 betrachtet. Zusätzlich wäre die Diskussion des direkten Umweltentlastungseffektes durch neue Elektrofahrzeuge gegenüber neuen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor von Interesse, da dieses die konkrete Kaufentscheidung der nächsten Jahre darstellt. Unter 8.1 muss die Reduktion der Klimagasemissionen durch Elektrofahrzeuge mit 0,53 Mio. Tonnen (anstelle 0,53 Tonnen) CO<sub>2</sub>-Äquivalente angegeben werden.

Bei den Luftschadstoffen wäre die Betrachtung eines Euro-6-Fahrzeugs von größerer Relevanz, da Elektrofahrzeuge erst in den kommenden Jahren (also zusammen mit Euro-6-Pkw) in den Markt kommen. Zusätzlich wäre es gut, in einer solchen Betrachtung auch Otto-Pkw zu berücksichtigen, da diese ein anderes Emissionsverhalten zeigen.

## 9 Folgerungen

Sinnvoll wäre es, hier noch einmal deutlich auf die Unsicherheiten insbesondere bei der Bilanzierung von Elektrofahrzeugen hinzuweisen. Elektrofahrzeuge stehen in ihrer Entwicklung gerade erst am Beginn, während Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor noch lange den Straßenverkehr dominieren werden. Schon deshalb bleibt die Verbrauchsreduktion bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor – wie von Frischknecht bemerkt – zentraler Punkt zur Verbesserung der Klimabilanz des Straßenverkehrs. Nichtsdestotrotz ergeben sich gerade zukünftig deutliche Potenziale für eine Elektromobilität unter Nutzung erneuerbarer Energie, was in Szenarien skizziert werden könnte.