
Aktualisierung Umweltaspekte von Elektroautos

Ein Argumentarium

Ausgearbeitet durch
Rolf Frischknecht, Annika Messmer, Philippe Stolz

Im Auftrag des **Bundesamtes für Umwelt (BAFU)**

Uster, 4. Oktober 2018

Impressum

Titel	Aktualisierung Umweltaspekte von Elektroautos
Auftraggeber	Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Luftreinhaltung und Chemikalien, CH-3003 Bern Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK)
Auftragnehmer	treeze Ltd., fair life cycle thinking Kanzleistr. 4, CH-8610 Uster www.treeze.ch Tel. +41 44 940 61 91 Fax +41 44 940 61 94 frischknecht@treeze.ch
Autoren	Rolf Frischknecht, Annika Messmer, Philippe Stolz
Begleitung BAFU	Philipp Hallauer, Doris Ochsner
Hinweis	Diese Studie/dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.
Version	561_Argumentarium_Elektromobilität_aktualisiert_v4.2, 04.10.2018 10:07:00

Abkürzungen

	Deutsch	Englisch
CH	Schweiz (Confoederatio Helvetica)	
CED		Cumulative Energy Demand
db(A)	Dezibel (A)	
EAM	Europäischer Residualmix	European Attribute Mix
ENTSO-E		European Network of Transmission System Operators for Electricity (from 01.07.2009)
EV	Elektroauto	Electric vehicle
GuD	Gas und Dampf	
GWP	Treibhauspotential	Global Warming Potential
HBEFA	Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs	
HV	Hybridauto	Hybrid vehicle
KEA	Kumulierter Energieaufwand	
kWh	Kilowattstunde	
Li-Ion	Lithium-Ionen	
LiMP	Lithium Metall Polymer	Lithium metal polymer
MJ	Megajoule	
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus	
PHV	Plug-In Hybridauto	Plug-in hybrid vehicle
PJ	Petajoule	
pkm	Personenkilometer	
Pkw	Personenkraftwagen	
TARGA	Schweizerisches Fahrzeugtypenregister	
TJ	Terajoule	
UBP	Umweltbelastungspunkt	
UCTE		Union for the Coordination of Transmission of Electricity (until 30.06.2009)
UN/ECE	United Nations Economic Commission for Europe	
vkm	Fahrzeugkilometer	

Zusammenfassung

Zielsetzung

Der vorliegende Bericht dient dazu, die Umweltwirkungen 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.

Die vorliegende Fassung ist das Resultat einer Überarbeitung und Erweiterung des 2011 erstmals publizierten Berichts. Sie stützt sich auf naturwissenschaftliche Grundlagen und die Expertise der Autoren. Der Bericht wurde im Auftrag des BAFU von unabhängigen Experten, Christian Bauer vom Paul Scherrer Institut (PSI) und Kirsten Biemann und Hinrich Helms vom Institut für Umwelt- und Energieforschung (ifeu) Heidelberg, gegengelesen. Die Kommentare der Begutachter wurden weitgehend berücksichtigt.

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 Autos beziehungsweise für das meistverkaufte Auto. Zudem werden die Bilanzen eines Plug-In Hybrid- und Hybridautos der Mittelklasse sowie, im Sinne eines Ausblicks, auch Bilanzen von zwei unterschiedlich motorisierten Leichtbaufahrzeugen dokumentiert. In der vorliegenden Studie wird die Methode der beschreibenden Ökobilanz (engl. attributional LCA) angewendet, um die Umweltauswirkungen der heute verfügbaren Autos mit Verbrennungs- oder Elektromotoren zu untersuchen.

Die Bilanzen beinhalten die Herstellung und Entsorgung 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. Es werden Hintergrunddaten aus dem KBOB Ökobilanzdatenbestand DQRv2:2016 verwendet.

Der Strombedarf beziehungsweise Kraftstoffbedarf der einzelnen Fahrzeuge bezieht sich auf die Realsituation und berücksichtigt damit den Energiebedarf von Nebenverbrauchern wie Heizung, Licht oder Klimaanlage. Dieser Zuschlag liegt zwischen 39 % und 70 % bezogen auf den Normverbrauch. Die schweizerischen Flottendurchschnitte basieren auf den Angaben der Version 3.2 des Handbuchs für Emissionsfaktoren. Die Verbräuche der Hybridautos und die Verbräuche der Leichtbaufahrzeuge („cityCar“) basieren auf Herstellerangaben und ein Zuschlag zwischen 39 % und 70 % wurde dem Normverbrauch hinzugefügt. Zudem wurden die Stickoxidemissionen an die in der Realität gemessenen Werte angepasst, um die Erkenntnisse aus dem sogenannten Dieselskandal zu berücksichtigen. Die entsprechenden Emissionsfaktoren basieren auf der Version 3.3+ des HBEFA.

Die Umweltwirkungen individueller Mobilität werden mit den vier Indikatoren *Treibhausgas-Emissionen*, *kumuliertem Energieaufwand* (KEA; erneuerbar und nicht erneuerbar), *Gesamtumweltbelastung* (ermittelt mit der Methode der ökologischen Knappheit 2013 (UBP Methode)) und *hochradioaktive Abfälle* quantifiziert. In einer weitergehenden Betrachtung, in welcher das Reduktionspotenzial von Elektroautos, Hybridautos und ausgewählten konventionellen Autos abgeschätzt wird, werden zusätzlich individuelle Schadstoffe wie NO_x oder PM₁₀ quantifiziert.

Ergebnisse

Der Vergleich der Ökobilanz-Ergebnisse von Elektroautos, Plug-In Hybrid-, Hybrid-, 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 (292 bis 337 Gramm pro vkm im Vergleich zu 172 Gramm pro vkm, siehe Tabelle Z. 1). Die Differenz bezüglich kumuliertem Energieaufwand nicht erneuerbar ist hingegen deutlich geringer (4.66 bis 5.26 MJ Öl-*eq* pro vkm im Vergleich zu 4.23 MJ Öl-*eq* pro vkm). Die Gesamtumweltbelastung ermittelt mit der Methode der ökologischen Knappheit 2013 liegt beim Elektrofahrzeug leicht höher als beim Erdgas-Auto und beim Flottenmix der Benzinautos, aber deutlich tiefer als beim Flottenmix der Dieselaautos, bei dem die Emissionen von Dieselmotoren mit einem spezifischen, höheren Ökofaktor bewertet werden¹. Die Erzeugung radioaktiver Abfälle pro vkm ist beim Elektroauto am höchsten. Das sparsamste Auto der unteren Mittelklasse (ein Dieselauto) emittiert rund 40 % mehr Treibhausgase als das mit Schweizer Strom betriebene Elektroauto, verursacht aber eine um ca. 26 % tiefere Umweltbelastung und benötigt knapp 8 % weniger nicht erneuerbare Primärenergie. Der meist verkaufte Golf (ein Benziner) verursacht knapp 80 % höhere Treibhausgas-Emissionen als das Elektroauto und benötigt rund 16 % mehr nicht erneuerbare Primärenergie. Die Umweltbelastung dieses Autos ist um 14 % tiefer als diejenige des Elektroautos. Die Umweltwirkungen des Hybrid Toyota Prius III sind leicht tiefer als die Umweltwirkungen des meist verkauften Golf. Das Fahren mit den Leichtbaufahrzeugen verursacht deutlich tiefere Umweltwirkungen als das Fahren mit einem sparsamen Dieselauto beziehungsweise einem Elektroauto der unteren Mittelklasse.

¹ In den mobitool-Faktoren v2.0 wurden die Dieselmotoremissionen mit dem tieferen Ökofaktor für Partikel bewertet. Die hier gezeigten Resultate für den Flottendurchschnitt der Dieselaautos und den Flottendurchschnitt Schweiz weichen deshalb von den in mobitool enthaltenen Werten ab.

Tabelle Z. 1 Kumulierter Energieaufwand (erneuerbar, nicht erneuerbar), Treibhausgas-Emissionen, Umweltbelastung (Methode der ökologischen Knappheit 2013) und radioaktive Abfälle pro vkm mit verschiedenen Personenwagen

	Verbrauch	KEA, erneuerbar	KEA, nicht erneuerbar	Treibhausgas-emissionen	Umweltbelastung	radioaktive Abfälle
	pro 100 km	MJ Öl-eq	MJ Öl-eq	g CO ₂ -eq	UBP'13	mm ³
Diesel, Flottendurchschnitt	6.0 Liter ²	0.22	4.66	292	602	0.45
Benzin, Flottendurchschnitt	8.5 Liter ²	0.19	5.26	337	374	0.41
Flottendurchschnitt Schweiz	7.5 Liter ²	0.20	5.03	320	463	0.43
Erdgas, Flottendurchschnitt	7.7 Nm ³³	0.21	5.19	290	302	0.44
Diesel, Klassenbester	4.6 Liter ⁴	0.21	3.90	240	298	0.44
Benzin, meist verkauft	7.1 Liter ⁴	0.22	4.89	306	350	0.46
Elektroauto, CH Strommix ¹	20 kWh ⁵	0.61	4.23	172	407	1.54
Hybrid	5.6 Liter ⁶	0.20	4.21	258	333	0.47
Plug-In Hybrid	3.4 Liter ⁷	0.34	3.96	211	329	0.80
Diesel, cityCar, Euro5	2.7 Liter ⁸	0.06	1.73	113	132	0.15
Elektro cityCar, CH Strommix ¹	11.9 kWh ⁸	0.31	1.88	67	148	0.78

¹: Verbrauchermix Schweiz gemäss Stromkennzeichnung 2014, ohne separat verkaufte zertifizierte Stromprodukte; Diese Modellierung wird in den nachfolgenden Sensitivitätsanalysen als Basisvariante verwendet (jeweils grau hinterlegt).

²: Verbrauch gemäss Handbuch für Emissionsfaktoren, HBEFA v3.2, und mobitool.

³: Verbrauch gemäss KBOB Ökobilanzdatenbestand DQRv2:2016.

⁴: inklusive Realsituations-Zuschlag für Benzin- und Dieselaautos von 39 % gemäss Informationen aus dem Bericht von ICCT.

⁵: Realverbrauch gemäss Empa-Studie.

⁶: Verbrauch gemäss Empa-Studie, inklusive Realsituations-Zuschlag von 51 % gemäss Informationen aus der Studie ICCT.

⁷: Rund 35 % der von Plug-In Hybriden gefahrenen Kilometer werden rein elektrisch zurückgelegt (ermittelt basierend auf TNO-Studie). Für den benzinbetriebenen Fahranteil (65 %) wird der Benzinverbrauch von Hybridautos eingesetzt und mit dem Realsituations-Zuschlag von Benzinautos (39 % gemäss ICCT) multipliziert.

⁸: Verbrauch gemäss Herstellerangaben www.loremo.com, inklusive Realsituations-Zuschlag (39 % für Diesel-, 70 % für Elektroantrieb gemäss ICCT Studie und VCS)

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 Umweltwirkungen des Fahrens mit Elektroautos weiter zu senken.

Durch Elektroautos kann 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 und Kobalt 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 durch den Wechsel auf Elektro- und Hybridautos nur wenig zurückgehen, da geregelte Katalysatoren auch in Hybridfahrzeugen eingesetzt werden.

Folgerungen

Die Ökobilanzergebnisse des Fahrens mit einem Elektroauto zeigen eine grosse Bandbreite auf. Der für den Betrieb von Elektroautos eingesetzte Strommix hat einen starken Einfluss auf die Treibhausgasemissionen und die übrigen Umweltkennwerte. Die Treibhausgas-Emissionen von Elektroautos variieren von 140 Gramm CO₂-eq (zertifizierter Strommix) bis 390 Gramm CO₂-eq (Strom aus deutschen Braunkohlekraftwerken) pro Fahrzeugkilometer. Beim Betrieb mit dem Schweizer Verbrauchermix betragen die Treibhausgas-Emissionen des Elektroautos rund 170 Gramm CO₂-eq pro Fahrzeugkilometer. Der Strommix wirkt sich auch auf die übrigen Umweltindikatoren deutlich aus. Beispielsweise weisen Elektroautos, welche mit Strom aus (mehrheitlich) fossilen Quellen geladen werden, hohe spezifische Treibhausgas-Emissionen auf, produzieren aber relativ wenig radioaktive Abfälle. Werden die Fahrzeuge mit Strom aus Kernkraftwerken geladen, sind die Treibhausgas-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.

Die Datengrundlage und die Lebensdauer der Batterie haben ebenfalls einen grossen Einfluss auf die Umweltauswirkungen von Elektroautos. Ein mit dem Schweizer Verbraucher-Strommix betriebenes Elektroauto verursacht je nach verwendeter Datengrundlage für die Batterieherstellung Treibhausgas-Emissionen von 140 Gramm CO₂-eq bis 230 Gramm CO₂-eq pro Fahrzeugkilometer. Die Treibhausgas-Emissionen des Fahrens mit Elektroautos gemäss der in der Basisvariante verwendeten Sachbilanz der Batterieherstellung liegen mit rund 170 Gramm CO₂-eq pro Fahrzeugkilometer zwischen diesen Werten. Die Variation der angenommenen Batterielebensdauer (kein bzw. zwei Batteriewechsel während der Nutzungsdauer des Elektroautos gegenüber einem Batteriewechsel bei jedem zweiten Elektroauto gemäss der Basisvariante) führt zu einer ähnlichen Bandbreite der Ergebnisse.

Es kann erwartet werden, dass die Umweltwirkungen des Fahrens mit einem Elektroauto insbesondere durch zukünftige technische Entwicklungen bei den Batterien verringert werden können. Andererseits dürften sich die Umweltwirkungen 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. Bei der Klasse der hier analysierten Diesel- und Benzinautos hat sich zudem gezeigt, dass die spezifischen Verbräuche im Alltag im Schnitt um mehr als einen Drittel über den Werksangaben liegen.

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

Insgesamt ist die Informationssituation bezüglich Elektroautos sowie Benzin- und Dieselautos verbesserungsfähig. Unsicherheiten bestehen insbesondere im Bereich der Lebensdauer und Herstellungsaufwände der Batterie, im spezifischen Strom- beziehungsweise Treibstoffbedarf im Alltag und im alltäglichen Emissionsverhalten von Diesel- und Benzinautos.

Die wesentlichen Veränderungen in den Ökobilanzen von Elektroautos und fossil betriebenen Autos verglichen zur bisherigen Version sind in den folgenden Bereichen zu beobachten: Wechsel der Bezugsgrösse von Personen- auf Fahrzeugkilometer, aktualisierte Materialisierung aller Fahrzeuge, Umweltwirkungen Batterieherstellung, Realsituationszuschlag, Umweltkennwerte Schweizer Strom, Wechsel von UBP 06 auf UBP 13.

Inhalt

1	ZWECK UND INHALT	1
2	UMWELTINDIKATOREN	1
3	ÖKOBILANZ STROMERZEUGUNG	2
3.1	Umweltbelastung und kumulierter Energieaufwand Stromerzeugung	2
3.2	Flottenbedarf Elektrizität durch Elektroautos	5
3.3	Wechselwirkungen zwischen Elektroautos und Stromnetz.....	6
3.3.1	Einfluss Mehrbedarf auf Kraftwerkspark und Übertragungsleitungen.....	6
3.3.2	Autobatterien als mobiler Speicher im Stromnetz	6
3.3.3	Spezifische Umweltbelastung von Strom aus neu gebauten Kraftwerken.....	7
3.4	Wissenslücken Ökobilanz Stromerzeugung.....	7
4	ÖKOBILANZEN FAHRZEUG UND KOMPONENTEN	8
4.1	Übersicht	8
4.2	Ökobilanzen Fahrzeug	8
4.3	Ökobilanzen Lithium-Ionen Batterie	9
4.4	Ökobilanzen zur Herstellung von Fahrzeugbatterien.....	11
4.4.1	Abschätzung der spezifischen Umweltbelastung.....	11
4.4.2	Vergleich mit Emissionen des Benzinbedarfs	11
4.5	Wissenslücken Ökobilanzen Batterien.....	12
5	VERBRAUCHSMESSUNG UND REALVERBRAUCH BEI FAHRZEUGEN	12
5.1	Elektroautos	12
5.2	Autos mit Verbrennungsmotoren und Hybridautos	13
6	HYBRID UND PLUG-IN HYBRID FAHRZEUGE	13
7	VERGLEICH UMWELTWIRKUNGEN ELEKTROAUTO MIT FOSSIL BETRIEBENEN FAHRZEUGEN	14
7.1	Basisvariante	14
7.2	Sensitivitätsanalyse Strommix	21
7.3	Sensitivitätsanalysen Batteriebilanzierung und Lebensdauer	22
7.4	Fazit.....	23
7.5	Unterschiede zur bisherigen Version	24
8	VERMINDERUNGSPOTENZIAL DER UMWELTBELASTUNG DURCH ELEKTROAUTOS	25
8.1	Übersicht	25
8.2	Klimagase und Umweltbelastung	26
8.3	Luftschadstoffe.....	27
8.4	Lärmbelastung.....	28
8.5	Landinanspruchnahme	29
8.6	Einsatz mineralischer Rohstoffe	29
8.6.1	Übersicht.....	29
8.6.2	Platingruppenmetalle	29

8.6.3 Kupfer	30
8.6.4 Lithium.....	30
8.6.5 Kobalt	31
8.6.6 Metalle der Seltenen Erden.....	31
8.6.7 Fazit	32
8.7 Konflikte zwischen der Öko-Strom-Produktion und verschiedenen Umweltbereichen	32
9 FOLGERUNGEN UND AUSBLICK	33
10 LITERATUR	35
ANHANG	38
Konzept der Primärenergiefaktoren	38
Dominanzanalyse Strombereitstellung.....	40
Produktionsmix Schweiz.....	41
Verbrauchermix Schweiz (exkl. Anteil zertifizierter Strom)	46
Zertifizierter Strommix Schweiz.....	51
GuD Kraftwerk	56
Steinkohlekraftwerk Deutschland	61
Kernkraftwerk Schweiz.....	66
Windkraftwerk Schweiz.....	71
Photovoltaik Schweiz.....	76
Strommix ENTSO-E	81
Energiebedarf Batterien-Herstellung,ecoinvent Datenbestand v2.2.....	86
Dominanzanalyse Batterieherstellung	87
Li-Ion-Batterie, Ellingsen et al. (2014)	87
Li-Ion-Batterie,ecoinvent Zentrum	92
Vergleich Umweltauswirkungen Elektroauto mit fossil betriebenen Fahrzeugen	97
Basistabelle Verminderungspotenzial der Umweltbelastung	98

1 Zweck und Inhalt

Der vorliegende Bericht dient dazu, die Umweltwirkungen von batteriebetriebenen Elektroautos möglichst umfassend abschätzen zu können. Der Bericht wurde 2011 erstmals publiziert und wird nun in wesentlichen Bereichen (insbesondere die Kapitel 4, 7 und 8) aktualisiert und ergänzt. Der Bericht stützt sich auf naturwissenschaftliche Grundlagen und die Expertise der Autoren. Die erste Fassung des Berichts wurde im Auftrag des BAFU von unabhängigen Experten, Christian Bauer vom Paul Scherrer Institut (PSI) und Kirsten Biemann und Hinrich Helms vom Institut für Umwelt- und Energieforschung (ifeu) Heidelberg, gegengelesen. Die Kommentare der Begutachter 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 und reinen sowie Plug-In Hybridfahrzeugen. Aus Aufwandgründen wurde darauf verzichtet, andere, heute eingesetzte Treibstoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe (wie beispielsweise Biodiesel) oder neuartige, 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 Umweltwirkungen der Fahrzeugkomponenten diskutiert. In Kapitel 5 wird die Situation bezüglich der Energieverbrauchsmessung bei Fahrzeugen beschrieben und in Kapitel 6 werden die Besonderheiten von Hybrid- und Plug-In Hybrid-Fahrzeugen angesprochen. Schliesslich werden in Kapitel 7 die Umweltwirkungen 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 5. Bericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2013) 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. 2007b, Frischknecht et al. 2015) aufgeteilt in erneuerbar und nicht erneuerbar ausgewiesen. Die Methode der ökologischen Knappheit 2013 (Frischknecht & Büsser Knöpfel 2013) basiert auf den Zielsetzungen der Schweizerischen Umweltpolitik und berücksichtigt Emissionen in Luft, Oberflächengewässer, Grundwasser und Boden, die Entnahme von Ressourcen (Energie, Landnutzung, mineralische Primärressourcen und Kies, Süsswasser), die Endlagerung von Abfällen sowie Verkehrslärm. Die Methode wird hier verwendet, um die Gesamtumweltbelastung der verschiedenen Antriebskon-

zepte zu beurteilen. Mit dieser Methode werden die wesentlichen, durch die individuelle Mobilität verursachten Schadstoffemissionen und Ressourcenentnahmen bewertet. Schliesslich wird der Indikator hochradioaktive Abfälle gezeigt, welcher in der Stromdeklaration gemäss EU Direktive (European Commission 2003) neben den CO₂ Emissionen aufgeführt werden muss. Bis auf die vollaggregierende Methode der ökologischen Knappheit 2013 werden alle betrachteten Umweltindikatoren verwendet, um die Auswirkungen auf einen einzelnen Umweltbereich zu quantifizieren (sogenannte Midpoint-Indikatoren). Zusätzlich wird in Kapitel 8 das Verminderungspotenzial der Umweltbelastung durch Elektroautos in Bezug auf weitere Umweltbereiche wie Luftschadstoffe und Ressourcen abgeschätzt.

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 8.7).

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 Umweltwirkungen 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 Verbrauchermix und der Strommix des europäischen Verbundnetzes werden in beschreibenden Analysen eingesetzt. Erdgas befeuerte Gas und Dampfkraftwerke, Kernkraftwerke, Windkraftwerke und Photovoltaik sind Beispiele von Technologien, welche zur Abdeckung eines zukünftigen Strommehrbedarfes in Frage kommen. Deshalb werden nachstehend die Umweltkennwerte von Strom aus diesen Kraftwerkstechnologien aufgeführt. In der Ökobilanz-Datenbank ecoinvent wird beim Strombezug in der Schweiz der Verbrauchermix eingesetzt (Spalten rechts in Tabelle 1). Dieser entspricht dem Lieferantenmix unter Abzug der separat verkauften, zertifizierten Stromprodukte.

Tabelle 1 Technologieanteile der Schweizer Strommixe im Jahr 2014 gemäss Messmer und Frischknecht (2016): Lieferantenmix, zertifizierter Strommix und Verbrauchermix exklusive zertifizierte Stromprodukte; Inlandproduktion: Kraftwerke in der Schweiz; Import: Kraftwerke im Ausland

Kategorie	Technologie	Herkunft	Lieferanten- mix	Zertifizierter Strommix	Verbraucher- mix
			%	%	%
Erneuerbare Energien					
Wasserkraft		Inlandproduktion	46.40%	96.72%	34.51%
		Import	6.36%	0.00%	7.86%
Andere	Solar	Inlandproduktion	0.94%	0.93%	0.94%
		Import	0.01%	0.00%	0.01%
	Wind	Inlandproduktion	0.18%	0.95%	0.00%
		Import	0.65%	0.75%	0.63%
	Holz	Inlandproduktion	0.31%	0.12%	0.36%
		Import	0.00%	0.00%	0.00%
	Biogas	Inlandproduktion	1.32%	0.52%	1.51%
		Import	0.01%	0.00%	0.01%
Nicht erneuerbare Energien					
Kernkraft		Inlandproduktion	23.92%	0.00%	29.55%
		Import	3.10%	0.00%	3.84%
Fossil	Öl	Inlandproduktion	0.00%	0.00%	0.00%
		Import	0.02%	0.00%	0.03%
	Erdgas	Inlandproduktion	0.09%	0.00%	0.12%
		Import	0.30%	0.00%	0.37%
	Kohle	Inlandproduktion	0.00%	0.00%	0.00%
		Import	0.02%	0.00%	0.03%
Abfälle		Inlandproduktion	1.35%	0.00%	1.67%
		Import	0.05%	0.00%	0.06%
Andere	Nicht überprüfbare Energieträger	Import	18.76%	0.00%	23.18%
	Speicherkraftwerk		-3.81%	0.00%	-4.67%
Total			100.00%	100.00%	100.00%

In Tabelle 2 sind die Kennwerte der Bereitstellung von 1 kWh Strom an eine Niederspannungs-Steckdose aufgeführt. Die Ergebnisse basieren auf den Daten des KBOB Ökobilanzdatenbestands DQRv2:2016² (KBOB et al. 2016), teilweise ergänzt um Stromtransport und -verteilung und aktualisiert mit den Schweizer Strommischen im Jahr 2014 (Messmer & Frischknecht 2016). Der Bedarf an nicht erneuerbarer Energie variiert um einen Faktor 100 zwischen dem tiefsten Wert (zertifizierter Strommix) und dem höchsten (Steinkohle-Kraftwerk). Für die Bereitstellung von 1 kWh Kernenergie-Strom werden 15.2 MJ Öl-eq (beziehungsweise 4.2 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.

² Der KBOB Ökobilanzdatenbestand DQRv2:2016 basiert auf dem ecoinvent Datenbestand v2.2, der in relevanten Bereichen wie beispielsweise der Bereitstellung von Energieträgern und Materialien aktualisiert wurde. Alle Daten wurden gemäss der allgemeinen ecoinvent-Systematik nach Frischknecht et al. (2007a) erhoben und modelliert.

Die spezifischen Treibhausgas-Emissionen der nicht fossilen Technologien (Erneuerbare und Kernenergie) sind mit 20 bis 100 Gramm CO₂-eq pro kWh deutlich tiefer als diejenigen fossiler Kraftwerke (GuD: 460 Gramm CO₂-eq pro kWh, Steinkohle-Kraftwerk 1.22 kg CO₂-eq pro kWh, Braunkohle-Kraftwerk 1.34 kg CO₂-eq pro kWh). Bei den Strommischen ist die Höhe der Treibhausgas-Emissionen abhängig vom Anteil fossiler Kraftwerke im Kraftwerkspark. Die Emissionen variieren zwischen knapp 520 Gramm CO₂-eq pro kWh des Strommixes des Europäischen Netzverbundes ENTSO-E bis 14 Gramm CO₂-eq pro kWh des Schweizer Mixes zertifizierter Elektrizität aus erneuerbaren Energien (mit einem Anteil von 97 % zertifizierter Wasserkraft). Zwei Drittel der Treibhausgas-Emissionen des ENTSO-E-Mixes stammen aus den fossilen Kraftwerken in Deutschland (Braunkohle, Steinkohle), Spanien (Steinkohle, Erdgas), Italien (Erdgas, Steinkohle und Heizöl), Grossbritannien (Steinkohle und Erdgas) und Polen (Steinkohle, Braunkohle). Weitere individuelle Beiträge über 3 % stammen aus den fossilen Kraftwerken in den Niederlanden, Kroatien und Griechenland.

Die Erzeugung von hochradioaktiven Abfällen ist direkt proportional zum Anteil Kernenergie im Strommix. Eine kWh Schweizer Kernenergie erzeugt rund 9 mm³ hochradioaktive Abfälle, im Schweizer Verbrauchermix sind es knapp 5 mm³ pro kWh. Die Abfallmenge des Schweizer Verbrauchermixes 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 0.15 mm³ 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 2013) liegt zwischen 46 Umweltbelastungspunkten (UBP) pro kWh zertifizierter Elektrizität und 786 UBP pro kWh Strom ab einem Braunkohle-Kraftwerk. Beim ENTSO-E Strommix (543 UBP) verursachen die Kraftwerke Frankreichs, Deutschlands und Grossbritanniens zusammen etwas mehr als ein Drittel der gesamten Umweltbelastung. Im Weiteren sind die Kraftwerke Italiens, Spaniens und Polens mit Anteilen über 7.5 % relevant. Die Kraftwerke in den Niederlanden sowie in Kroatien, Griechenland und Serbien steuern je zwischen 3.1 % und 2.5 % zur Gesamtumweltbelastung bei. Die Umweltbelastung der verschiedenen Schweizer Strommixe liegt bei 214 UBP/kWh (Produktionsmix) und 358 UBP/kWh (Verbrauchermix).

Windkraftstrom, Photovoltaikstrom, Strom aus einem GuD-Kraftwerk und Strom aus einem Schweizer Kernkraftwerk verursachen 73, 172, 305 beziehungsweise 449 UBP pro kWh. Im Anhang sind Flussdiagramme abgebildet, auf welchen die wesentlichen Beiträge zu den Gesamtergebnissen ersichtlich sind.

Tabelle 2 Kumulierter Energieaufwand (KEA) erneuerbar und nicht erneuerbar, Treibhausgas-Emissionen, Umweltbelastung (bewertet mit der Methode der ökologischen Knappheit 2013) und radioaktive Abfälle der Bereitstellung von 1 kWh Strom (Niederspannung) mit verschiedenen Strommischen beziehungsweise Kraftwerkstechnologien. Die Schweizer Strommische beziehen sich auf das Jahr 2014 und sind in Messmer und Frischknecht (2016) im Detail beschrieben.

	KEA, erneuerbar	KEA, nicht erneuerbar	Treibhausgas- emissionen	Umweltbe- lastung	Hoch radioaktive Abfälle
	MJ Öl-eq/kWh	MJ Öl-eq/kWh	g CO ₂ -eq/kWh	UBP/kWh	mm ³ /kWh
Produktionsmix Schweiz	2.45	6.11	31	214	3.64
Verbrauchermix Schweiz ¹	1.90	8.37	182	358	4.55
Strommix Schweiz, zertifiziert ²	4.16	0.12	14	46	0.02
GuD-Kraftwerk	0.02	7.91	462	305	0.02
Steinkohle Deutschland ³	0.12	13.85	1221	756	0.14
Braunkohle Deutschland ³	0.04	14.04	1345	786	0.11
Kernkraftwerk Schweiz ³	0.02	15.02	23	449	9.23
Windkraft Schweiz ³	4.28	0.33	26	73	0.03
Photovoltaik Schweiz ³	4.37	1.17	94	172	0.15
ENTSO-E Strommix	1.07	10.30	522	543	3.59

¹: exklusive separat verkaufte, zertifizierte Stromprodukte

²: der zertifizierte Strommix besteht zu 96.7 % aus Wasserkraft aus Schweizer Produktion

³: 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 CO₂-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 CO₂/kWh und für den zukunftsgerichteten Grenzstrommix (Portfolio der Zubaukapazitäten zwischen 2020 und 2040) Emissionen von 310 bis 400 Gramm CO₂/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 vier mögliche Szenarien modelliert (Referenz; neues KKW in der Schweiz; höherer Erdgaspreis; neue erneuerbare Energien³ und Energieeffizienz). Die Grenzkraftwerksmische sind in allen vier Szenarien stark von Gaskombikraftwerken geprägt, woraus sich die relativ hohen spezifischen Treibhausgas-Emissionen ergeben.

3.2 Flottenbedarf Elektrizität durch Elektroautos

Aussagen zum zukünftigen Elektrizitätsbedarf 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 in Übereinstimmung mit ande-

³ Der Begriff „neue erneuerbare Energien“ umfasst Kleinwasserkraft, Sonne, Wind, Holz, Biomasse, Umweltwärme und Geothermie.

ren aktuellen Ökobilanzarbeiten⁴ zu Elektroautos von einem durchschnittlichen Strombedarf eines Elektroautos (Golfklasse) an der Steckdose von 20 kWh pro 100 km aus (siehe auch Kapitel 5). Die Kilometerleistung der im Inland immatrikulierten Pkw in der Schweiz betrug im Jahr 2015 49'589 Mio. Fahrzeug-km⁵. Bei einem Bestand von 4'384'490 Personenwagen⁶ ergibt dies eine Jahresleistung von rund 11'300 Kilometer pro Fahrzeug.

Bei einem Ersatz von 2.5 % der Fahrzeugflotte durch Elektroautos (100'000 Fahrzeuge⁷) beträgt der Strommehrbedarf 226 GWh. Soll der Anteil Elektroautos langfristig auf einen Viertel der Schweizer Flotte gesteigert werden (1 Mio. Fahrzeuge), müssen pro Jahr für deren Antrieb zusätzliche 2.3 TWh Elektrizität bereitgestellt werden. Dies entspricht einem Anteil von 15 % des Potenzials neuer erneuerbarer Energien gemäss BFE Szenario III E, knapp einem Sechstel 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).

3.3 Wechselwirkungen zwischen Elektroautos und Stromnetz

3.3.1 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“⁸ mit ihrem Wissen und Netzwerk Aktivitäten zur Nutzung von Elektrizitätsspeichern in Fahrzeugen für die Bereitstellung von Regenergie in intelligenten Elektrizitätsnetzen unterstützen.

3.3.2 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

⁴ Althaus & Gauch 2010, Helms et al. 2016, BMVI 2015

⁵ www.bfs.admin.ch, Zugriff am 4.4.2016

⁶ www.bfs.admin.ch, Zugriff am 4.4.2016

⁷ 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).

⁸ siehe www.v2g.ch

und zurück konvertiert werden muss. 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 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. Auch eine Nachnutzung im kleinen Rahmen wurde in der Ökobilanz nicht berücksichtigt.

3.3.3 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 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 8.7).

3.4 Wissenslücken Ökobilanz Stromerzeugung

Die Sachbilanz des Schweizer Strommixes basiert auf dem Cockpit Stromkennzeichnung für das Jahr 2014 von swissgrid (2016). Darin werden 23 % der gelieferten Elektrizität als „nicht überprüfbarer Energieträger“ deklariert. Dieser Anteil wird mit dem europäischen Residualstrommix (EAM) modelliert, der zu 57 % aus fossilen Kraftwerken und zu knapp 42 % aus Kernkraftwerken stammt (Messmer & Frischknecht 2016).

Da Kunden vermehrt zertifizierte Stromprodukte kaufen und einzelne Elektrizitätsunternehmen zertifizierte Stromprodukte als Basisangebot vertreiben, 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 (siehe beispielsweise AEE 2009).

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: Umweltwirkungen der aktuellen Brennelementbereitstellung (Stichworte Wiederaufarbeitungsanlagen Majak, Uranförderung in Kasachstan, Niger, Namibia, etc.)
- Solarstrom: Sachbilanzdaten zur Solarzellen-Produktion in China (derzeit rund 80 % Marktanteil Schweiz) fehlen weitgehend
- Geothermie: Sachbilanzen auf Basis von gebauten Anlagen fehlen.
- Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ): Sachbilanzdaten für Erstellung und Betrieb.

4 Ökobilanzen Fahrzeug und 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 ist in dem Datensatz berücksichtigt. 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 Fahrzeug

In dieser Studie werden für die Fahrzeugherstellung meist Ökobilanzdaten des ecoinvent Datenbestandes v3.1 verwendet. Sowohl für Elektroautos als auch für Benzin/Erdgas- und für Diesel-Pkws sind spezifische Datensätze im ecoinvent Datenbestand v3.1 verfügbar, die mit geringen Anpassungen in den KBOB Ökobilanzdatenbestand DQRv2:2016 eingebettet wurden. Die Anpassungen betreffen vor allem den Energieverbrauch für die Montage der Personwagen und sind in Stolz et al. (2016) beschrieben.

Das im ecoinvent Datenbestand v3.1 modellierte Elektroauto hat mit 1'253 kg (inklusive der Batterie mit 262 kg) ein ungewöhnlich tiefes Gewicht, obwohl es gemäss Originalquelle (Habermacher & Hellweg 2011) einem VW-Golf entsprechen sollte. Daher wurde sowohl das Gewicht des gesamten Elektroautos wie auch das Gewicht der Batterie entsprechend den technischen Angaben des VW e-Golfs angepasst (1'585 kg inkl. der Batterie (318 kg)). Der Benzin/Erdgas- und Diesel-Pkw basiert ebenfalls auf der Bilanzierung eines Mittelklassewagens (VW Golf), welcher 1'600 kg schwer ist (Del Duce et al. 2016). Das Fahrzeuggewicht des meist verkauften Bezaautos wird damit tendenziell überschätzt. Für die Modellierung des Plug-In- und Hybrid-Autos wurden Angaben zum Toyota Prius III aus der Empa-Studie (Althaus & Gauch 2010) als Grundlage verwendet. Im Vergleich zu heute verkauften Modellen ist das Fahrzeuggewicht des Plug-In-Hybrid-Autos eher tief angesetzt.

Die Flottenmixe basieren auf den im Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA) (INFRAS 2014) erhobenen Transportleistungen der verschiedenen Grössen- und Emissionsklassen von Benzin- und Dieselaautos in der Schweiz im Jahr 2015 (Stolz et al. 2016). Tabelle 3 zeigt eine Übersicht der Fahrzeuggewichte der betrachteten Autos. Für Hybrid-, Plug-In Hybrid und Elektroautos sind zusätzlich das Gewicht und die Kapazität der Batterie aufgelistet. Die bilanzierten Lithium-Ionen Batterien haben eine Energiedichte von 105 Wh/kg (Ellingsen et al. 2014).

Tabelle 3 Übersicht der Fahrzeug- und Batteriegewichte und Batteriekapazität (Frischknecht et al. 2016, Del Duce et al. 2016, Althaus & Gauch 2010, Ellingsen et al. 2014, KBOB et al. 2016)

	Gewicht inkl. Batterie (kg)	Gewicht Batterie (kg)	Batteriekapazität (kWh)
Diesel, Flottendurchschnitt	1700		
Benzin, Flottendurchschnitt	1380		
Flottendurchschnitt Schweiz	1510		
Erdgas, Flottendurchschnitt	1380		
Klassenbester (Diesel)	1600		
meist verkauft (Benzin)	1600		
Elektroauto	1585	318	33.4
Hybrid	1460	41	4.3
Plug-In Hybrid	1500	80	8.4
Diesel, cityCar	550		
Elektro cityCar	720	100	10.5

4.3 Ökobilanzen Lithium-Ionen 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 Umweltwirkungen des Fahrens mit einem Elektroauto eine marginale Rolle spielt.

Die wenigen Studien, welche zur Herstellung von Lithium-Ionen Batterien verfügbar sind, weisen teilweise sehr unterschiedliche Umweltwirkungen auf. Im Folgenden werden drei unterschiedliche Sachbilanzen vorgestellt und deren Umweltkennwerte mit weiteren Studien verglichen.

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 und v3.1 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 Seite 86).

Eine detaillierte und aktuelle Sachbilanz zur Herstellung einer NCM Li-Ionen Batterie für Elektroautos wurde im Jahr 2014 durch Ellingsen der NTNU erstellt (Ellingsen et al. 2014). In dieser Bilanz werden spezifische Produktionsdaten eines norwegischen Herstellers (Miljøbil Grønland) aus dem Jahr 2012 verwendet. Es wurden diejenigen Produktionsdaten verwendet, die Effizienzgewinne infolge einer Produktionssteigerung berücksichtigen.

In einem dritten Ansatz werden die Ausgaben für Batterien in einer ökologisch erweiterten Input-Output-Bilanz der USA (Suh 2010) eingesetzt⁹. Die Ausgabe (US-\$ 39 pro kg Batterie)

⁹ 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 CO₂ pro US-Dollar) abgebildet. Mit der Input-Output-Bilanz kann man die (direkten und indirekten) Umweltwirkungen einer Ausgabe (beispielsweise 1'000 US-Dollar) in einem spezifischen Sektor (beispielsweise „storage batteries“) ermitteln.

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 (Tabelle 4).

Tabelle 4 Kumulierter Energieaufwand (erneuerbar, nicht erneuerbar), Treibhausgas-Emissionen, Umweltbelastung (Methode der ökologischen Knappheit 2013), und radioaktive Abfälle der Herstellung von 1 kg Lithium-Ionen Batterie gemäss verschiedenen Studien

		KEA, erneuerbar	KEA, nicht erneuerbar	Treibhausgas-emissionen	Umweltbelastung	radioaktive Abfälle
		MJ Öl-eq	MJ Öl-eq	kg CO ₂ -eq	UBP'13	mm ³
Li-Ion	Ellingsen et al. 2014	2.8	555	15.1	51'839	68.0
Li-Ion	Notter et al. 2010	1.8	186	5.0	17'596	13.0
Li-Ion	Input-Output (USA)	-	1396	34.3	35'939	-

Die Umweltwirkungen der Sachbilanz von Notter et al. (2010) weist mit 5 kg CO₂-eq/kg und 187 MJ Öl-eq/kg im Vergleich zur Studie von Ellingsen et al. (2014) (15 kg CO₂-eq/kg und 555 MJ Öl-eq/kg) deutlich tiefere Treibhausgasemissionen und einen tieferen Primärenergiebedarf auf.

Auch die Umweltkennwerte weiterer Studien weisen höhere Primärenergieaufwände und Treibhausgasemissionen auf. Zackrisson et al. (2010) bilanziert zwei verschiedene Verfahren zur Herstellung einer Li-Ionen-Batterie. Die Treibhausgas-Emissionen liegen bei 15.5 kg CO₂-eq und rund 25 kg CO₂-eq pro kg Batterie (Wasser beziehungsweise N-methyl-2-pyrrolidone als Lösungsmittel). Und auch in Duleep et al. (2011) werden Ergebnisse weiterer Bilanzen publiziert. Die dort zusätzlich gezeigten Werte schwanken zwischen rund 12 und rund 25 kg CO₂-eq pro kg Batterie. Die aktuellste Studie, welche vom Umweltbundesamt in Deutschland in Auftrag gegeben wurde (Helms et al. 2016), verwendet die Treibhausgas-Intensität von Lithium-Ionen Batterien aus der bisherigen Version dieses Argumentariums (Frischknecht 2014), die mit rund 17 kg CO₂ pro kg Batterie¹⁰ in derselben Grössenordnung liegen wie diejenigen von Ellingsen et al. (2014).

Die Hauptunterschiede im Primärenergieaufwand, in den Treibhausgas-Emissionen und im radioaktiven Abfall der Li-Ionen Batterien in den zitierten prozessbasierten Studien (siehe Tabelle 4) sind im Wesentlichen auf den grossen Unterschied im zugrunde gelegten spezifischen Strom- und Wärmebedarf bei der Batterieherstellung zurückzuführen¹¹. Die unterschiedliche Rohstoffzusammensetzung der Batterien in den beiden zitierten prozessbasierten Ökobilanzen spielt hingegen bezüglich der vorgenannten Indikatoren kaum eine Rolle. Die Batterie der Bilanz von Ellingsen et al. (2014) hat insbesondere einen ähnlich hohen Kupfergehalt wie die von Notter et al. bilanzierten Batterie. Die Batteriebilanz mit der Input-Output Tabelle der USA ist nicht technologiespezifisch und kann deshalb nur der groben Orientierung dienen. Zudem werden radioaktive Abfälle in der Input-Output-Tabelle nicht quantifiziert, was hier so ausgewiesen wird.

¹⁰ Berechnet unter Annahme einer Energiedichte von 120 Wh/kg (Helms et al. 2016).

¹¹ In den beiden prozessbasierten Bilanzen wird eine Herstellung in China resp. Ostasien angenommen und der chinesische oder ein ostasiatischer Strommix zugrunde gelegt.

Die detaillierte Ökobilanz von Ellingsen et al. (2014) und die weiteren hier diskutierten Veröffentlichungen zeigen, dass in Notter et al. (2010) ein deutlich zu tiefer Energiebedarf angenommen wird. Dadurch sind die spezifischen Treibhausgas-Emissionen und der spezifische Primärenergieaufwand deutlich zu tief. Deshalb wurde im Basisszenario für die Bilanzierung von Elektroautos die auf Industriedaten basierende aktuelle Sachbilanz von Ellingsen et al. (2014) verwendet. Effizienzsteigerungen infolge eines zunehmenden Produktionsvolumens sind im verwendeten Produktionsszenario berücksichtigt. Die Sachbilanz von Ellingsen et al. (2014) wird von Romare und Dahllöf (2017) in einem Vergleich mit Bilanzen anderer Autos als derzeit beste verfügbare Sachbilanz eingeschätzt.

4.4 Ökobilanzen zur Herstellung von Fahrzeugbatterien

4.4.1 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.

Die in Tabelle 5 gezeigten Werte wurden errechnet durch Multiplikation des Batteriegewichts mit den Kennwerten der Batterie gemäss der Bilanz von Ellingsen et al. (2014) aus Tabelle 4. Mit Batteriegewichten zwischen rund 150 und 600 kg verursacht die Herstellung der Li-Ionen-Batterie für reine Elektrofahrzeuge Treibhausgas-Emissionen zwischen knapp 2.3 Tonnen und 9 Tonnen CO₂-eq. Bei den Serienfahrzeugen Smart electric drive, Mitsubishi i-MiEV und Opel Ampera liegen die Herstellungsemissionen bei rund 2.2 bis 2.7 Tonnen CO₂-eq.

Tabelle 5 Kumulierter Energieaufwand erneuerbar und nicht erneuerbar, Treibhausgas-Emissionen, Umweltbelastung (Methode der ökologischen Knappheit 2013) und radioaktive Abfälle der Herstellung von Batterien eingesetzt in ausgewählten Fahrzeugen; Basis Batteriebilanz gemäss Ellingsen et al. (2014).

	Typ	Fahrzeugtyp	Batteriegewicht	KEA, erneuerbar	KEA, nicht erneuerbar	Treibhausgas-emissionen	Umweltbelastung	radioaktive Abfälle
			kg	MJ Öl-eq	MJ Öl-eq	kg CO ₂ -eq	UBP'13	mm ³
Smart electric drive	Li-Ionen	EV	150	415	83'200	2'270	7'780'000	10'200
Mitsubishi i-MiEV	Li-Ionen	EV	160	443	88'800	2'420	8'290'000	10'900
Protoscar LAMPO ²	Li-Ionen	EV	280	775	155'000	4'240	14'500'000	19'000
Pininfarina Bluecar	LiMP	EV	300	830	166'000	4'540	15'600'000	20'400
VW E-Golf	Li-Ionen	EV	318	880	176'000	4'820	16'500'000	21'600
Tesla Model S	Li-Ionen	EV	600	1'660	333'000	9'090	31'100'000	40'800
Toyota Prius Hybrid	NiMH	HV	41	113	22'800	621	2'130'000	2'790
Toyota Prius Plug-In	Li-Ionen	PHV	80	221	44'400	1'210	4'150'000	5'440
Opel Ampera	Li-Ionen	PHV	180	498	99'900	2'730	9'330'000	12'200

4.4.2 Vergleich mit Emissionen des Benzinbedarfs

Die vorgehend abgeschätzten Treibhausgas-Emissionen für die Herstellung von Batterien für reine Elektrofahrzeuge entsprechen den Emissionen eines Benzinbedarfs zwischen 600 bis knapp 2'400 Litern. Die spezifischen Treibhausgas-Emissionen der Benzin-Bereitstellung und Nutzung gemäss KBOB Ökobilanzdatenbestand DQRv2:2016 betragen 3.8 kg CO₂-eq pro Liter (KBOB et al. 2016).

Somit entsprechen die Emissionen für die Batterieherstellung einer Fahrleistung von 8'700 bis 34'800 Kilometer mit einem modernen Benzinfahrzeug (Referenzfahrzeug meist verkauft-

ter Mittelklassenwagen (VW Golf 1.4 TSI DSG) mit 6.9 Litern pro 100 km (inklusive Realsituationszuschlag)). Für die im Toyota Prius Hybrid, Toyota Prius Plug-In und Opel Ampera eingebaute Batterie liegen die entsprechenden Werte zwischen 163 und 720 Litern Benzin, was einer Reichweite von 2'400 bis 10'400 km entspricht. Die durchschnittliche jährliche Fahrleistung eines Personenwagens in der Schweiz liegt bei 11'800 km (Bundesamt für Statistik / Bundesamt für Raumentwicklung 2017).

4.5 Wissenslücken Ökobilanzen Batterien

Die im ecoinvent-Datenbestand enthaltene Bilanz der Lithium-Ionen Batterie-Herstellung von Notter et al. (2010) ist verglichen mit verschiedenen anderen Studien kein repräsentativer Datensatz (siehe Unterkapitel 4.3). Die Bilanz von Notter et al. (2010) modelliert und quantifiziert die Gewinnungs- und Verarbeitungsprozesse von Lithium detailliert, schätzt den Energieaufwand aber auf Basis theoretischer, physikalischer Überlegungen ab. Die Unsicherheiten dieser Bilanz sind daher vor allem in den Herstellungsaufwendungen zu finden. Die Bilanz von Ellingsen et al. (2014) basiert auf realen Produktionsdaten eines Herstellers, wobei die Variante der Bilanz verwendet wird, die die Produktion unter voller Auslastung repräsentiert. Dadurch wird die Effizienzsteigerung durch ein grösseres Produktionsvolumen berücksichtigt. Für den Vergleich der Umweltbelastung des Autofahrens mit Batterieantrieb einerseits und mit Benzin- oder Dieselmotoren andererseits besteht bei der Lebensdauer der Batterie zudem eine weitere Unsicherheit. Denn die im realen Fahrbetrieb erreichbare Lebensdauer der Batterien ist ein weiterer wichtiger Parameter der Bilanzierung. Dazu fehlen heute jedoch noch praktische Langzeiterfahrungen.

Aufgrund dieser Erkenntnisse wird in der Basisvariante der Bilanzierung die aktuelle und detaillierte Sachbilanz der Lithium-Ionen Batterieherstellung von Ellingsen et al. (2014) verwendet. Für die Lebensdauer der Batterie wird von einer Fahrleistung von 100'000 km ausgegangen. Bei jedem zweiten Elektroauto muss also die Batterie während der Gesamtfahrleistung von 150'000 km einmal ersetzt werden. In einer Sensitivitätsanalyse werden die Auswirkungen unterschiedlicher Batterielebensdauern auf die Umweltauswirkungen von Elektroautos abgeschätzt (siehe Unterkapitel 7.3).

5 Verbrauchsmessung und Realverbrauch bei Fahrzeugen

5.1 Elektroautos

Der Verbrauch von Elektrofahrzeugen wird gemäss dem UN/ECE Reglement 101 gemessen. Der Stromverbrauch von reinen Elektrofahrzeugen wird ermittelt, indem der Neue Europäische Fahrzyklus (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 bei 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. Die Auto-Umweltliste 2017 des VCS rechnet mit einem Faktor 1.7 zwischen Verbrauch gemäss NEFZ und Strombedarf im Alltag (VCS 2017). Die Empa-Ökobilanz rechnet mit einem Zuschlag von etwa 65 % auf den NEFZ Messwert (Althaus & Gauch 2010).

Bei Elektrofahrzeugen 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 Abnahme 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, 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. Das im ecoinvent-Datenbestand modellierte Elektroauto hat einen Verbrauch von 20 kWh/100km. Dieser Wert stimmt gut mit dem in der Empa-Studie verwendeten überein, welcher einen Realsituationszuschlag von 65 % enthält. Die Lade- und Entladeverluste sind in diesem Stromverbrauch berücksichtigt (Althaus & Gauch 2010).

5.2 Autos mit Verbrennungsmotoren und Hybridautos

Auch bei den Verbrennungsmotoren und Hybriden ist der Normverbrauch genau geregelt, damit die Normverbräuche untereinander vergleichbar sind (EU Richtlinie 715/2007/EG vom 20. Juni 2007). Der Normverbrauch wird wie bei den Elektroautos ohne Passagier und Gepäck im Labor gemessen und zusätzliche elektrische Verbräuche wie Klimaanlage, Licht etc. sind in den Messungen nicht enthalten. Zudem wird eine geregelte Fahrt simuliert, ohne Steigung und mit einer Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h.

Jedoch weicht der Realverbrauch deutlich von dem Normverbrauch ab, wie Resultate der Studie von ICCT (2017) zeigen. Für Benzin- und Dieseltreibene Fahrzeuge wurde ein um 39 % höherer Realverbrauch ermittelt. Für Hybride wurde ein um 51 % höherer Realverbrauch ermittelt, wobei deutlich weniger Daten vorhanden waren und die Unsicherheit des ermittelten Wertes für Hybride daher höher ist als für rein fossile Fahrzeuge. Der Normverbrauch der untersuchten Benzin-, Diesel- und Hybridautos wurde um diese Zuschläge erhöht, um den realen Treibstoffverbrauch abzubilden.

6 Hybrid und Plug-In Hybrid Fahrzeuge

Hybridfahrzeuge verfügen sowohl über einen Verbrennungs- als auch über einen Elektromotor und einen Batteriespeicher. Der Batteriespeicher wird über einen Generator mit überschüssiger Energie geladen. Da während der Beschleunigung sowohl der Elektro- als auch Verbrennungsmotor betrieben werden, kann bei gleicher Beschleunigung ein kleinerer Verbrennungsmotor eingesetzt werden. Der Verbrennungsmotor kann bei einem Hybridantrieb länger und häufiger in einem günstigen Wirkungsgradbereich betrieben werden. Zudem wird bei Bremsvorgängen und im Schubbetrieb der grössere Teil der Bremsenergie rekuperiert,

wodurch der Treibstoffbedarf und der Bremsabrieb erheblich gesenkt werden können (Althaus & Gauch 2010).

Neben den Umweltwirkungen reiner Elektroautos und rein fossil betriebener Fahrzeuge sind in Kapitel 7 auch die Umweltwirkungen eines Hybridautos auf Basis der Kennwerte des Toyota Prius III beschrieben.

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 versuchen die Vorzüge von beiden Konzepten zu vereinen. 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 Schadstoffausstoss 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 nicht abgebildet werden können.

7 Vergleich Umweltwirkungen Elektroauto mit fossil betriebenen Fahrzeugen

7.1 Basisvariante

In der Basisvariante werden die Umweltwirkungen von Autos mit verschiedenen Antriebskonzepten verglichen. Bei dieser Betrachtung werden das Elektroauto und das Plug-In Hybridauto mit dem Schweizer Verbraucherstrommix aufgeladen (siehe Kapitel 3). Die Auswirkungen von Annahmen zum Strommix, der für den Betrieb von Elektroautos eingesetzt wird, und zur Datengrundlage und Lebensdauer der Batterie auf die Resultate werden in den Unterkapiteln 7.2 und 7.3 diskutiert. Die Sachbilanz der Herstellung von Elektroautos basiert mit Ausnahme der Batterieherstellung auf den neu erhobenen Daten desecoinvent Datenbestands v3.1 (ecoinvent Centre 2014), welche in den KBOB Ökobilanzdatenbestand DQRv2:2016 eingebettet wurden (KBOB et al. 2016). Die Herstellung von NCM Li-Ionen Batterien wurde mit Daten aus Ellingsen et al. (2014) modelliert. Als Grundlage für die Modellierung des sparsamsten und des meistverkauften Autos der Golfklasse sowie des Hybrid- und Plug-In Hybridautos wurden die aktualisierten Sachbilanzen aus Stolz et al. (2016) verwendet. Die Bilanzen der hier gezeigten Flottenmixe basieren auf derselben Studie, während die Datensätze für Erdgas-Autos und zukünftige Leichtbaufahrzeuge aus dem KBOB Ökobilanzdatenbestand DQRv2:2016 entnommen wurden.

Das sparsamste Auto der Golfklasse (Klassenbester) ist laut der VCS Auto-Umweltliste (VCS 2015) ein Citroen C4 1.6 BlueHDI 100 (Diesel). Das meist verkaufte Auto der Golfklasse ist ein VW Golf 1.4 TSI DSG (Benzin). Die Modellierungen dieser beiden Fahrzeuge basieren auf den Datensätzen für mittelgrosse Diesel- bzw. Benzinautos, die die Grenzwerte des Emis-

sionsstandards EURO6 erfüllen (Stolz et al. 2016). Der Treibstoffbedarf und die Emissionen wurden an die Werte der hier bilanzierten Fahrzeuge angepasst, das Fahrzeuggewicht und der Bedarf an Strasseninfrastruktur wurden jedoch mit generischen Daten modelliert. Der Treibstoffverbrauch (inkl. Realsituationszuschlag) beträgt für das klassenbeste Auto der Golf-Klasse 4.6 l/100 km und für das meist verkaufte Auto der Golf-Klasse 7.1 l/100 km.

Für die Modellierung des Hybrid und Plug-In Hybrid Autos wurden, wie bereits in Unterkapitel 4.2 beschrieben, Angaben zum Toyota Prius III aus der Empa-Studie (Althaus & Gauch 2010) als Grundlage verwendet. Der Benzinverbrauch des Hybrid-Autos inklusive Realsituationszuschlag beträgt 5.6 l/100 km. Der Strom- und Treibstoffverbrauch sowie der elektrische Fahranteil von Plug-In Hybridautos hängen stark vom Fahrverhalten ab. In der Realität ist der elektrische Fahranteil meist deutlich tiefer als bei der Normverbrauchsmessung (Ligterink & Smokers 2016). Der elektrische Fahranteil von Plug-In Hybridautos wird basierend auf den Daten für verschiedene Fahrzeugmodelle aus einer Studie des niederländischen Forschungsinstituts TNO (Ligterink & Smokers 2016) und den in der Schweiz im Jahr 2017 neu zugelassenen Plug-In Hybridautos¹² ermittelt. Gemäss diesen Berechnungen werden 35 % der von Plug-In Hybriden gefahrenen Kilometer rein elektrisch zurückgelegt. Der Stromverbrauch wird identisch zum realen Verbrauch von Elektroautos (20 kWh/100 km) angenommen. Für den benzinbetriebenen Fahranteil (65 %) wird der Benzinverbrauch von Hybridautos eingesetzt und mit dem Realsituationszuschlag von Benzinautos (39 % gemäss ICCT (2017)) multipliziert.

Das im ecoinvent Datenbestand v3.1 modellierte und in den KBOB Ökobilanzdatenbestand DQRv2:2016 übernommene Elektroauto hat im Realbetrieb einen spezifischen Strombedarf von 20 kWh/100 km (KBOB et al. 2016). Dieser Wert stimmt gut mit dem in der Empa-Studie verwendeten überein (Althaus & Gauch 2010). Das Auto ist mit einem Satz NCM Lithium-Ionen-Batterien (318 kg, dies entspricht einer Speicherkapazität von 33.4 kWh; siehe Tabelle 3) bestückt, der eine Nutzungsdauer von 100'000 km aufweist und daher bei jedem zweiten Auto während der Nutzungsdauer des Autos (150'000 km) ersetzt werden muss¹³. Unter Berücksichtigung von Garantien von Autoherstellern wird angenommen, dass während der Nutzungsdauer des Autos 1.5 komplette Batteriesätze 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 einen Benzin-, Diesel- oder Elektromotor ausgelegt ist und daher einen direkten Vergleich der verschiedenen Antriebe ermöglicht.¹⁴ Diese Leichtbaufahrzeuge sind weiterhin in der Studie enthalten, obwohl sie unterdessen nicht mehr weiter entwickelt werden. Sie können als Wegmarke für die mögliche zukünftige Entwicklung für den Vergleich mit heutigen Autos hinzugezogen werden. Diese Leichtbaufahrzeuge der Kon-

¹² Persönliche Mitteilung Christoph Schreyer, BFE, 17.01.2018.

¹³ 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 zurück, was unterhalb der hier angenommenen Lebensleistung einer Batterie liegt. Auch die ecoinvent Datensätze zu Elektroautos und mobitool gehen von im Schnitt 1.5 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.

¹⁴ <http://www.loremo.com/>, Technische Informationen zu Loremo LS, Loremo GT und Loremo EV, Zugriff am 25.01.2010

zeptstudie haben ein Diesel- bzw. Stromverbrauch von 2.7 l/100 km respektive 11.9 kWh/100 km inklusive dem Realsituationszuschlag von 39 % resp. 70 %.

Die Flottenmixe basieren auf den im HBEFA (INFRAS 2014) erhobenen Transportleistungen und Verbräuchen der verschiedenen Grössen- und Emissionsklassen der Pkws in der Schweiz im Jahr 2015. Der Verbrauch eines durchschnittlichen Diesel Pkws beträgt 6.0 l/100 km und der Verbrauch eines durchschnittlichen Benzin Pkws beträgt 8.5 l/100 km (Stolz et al. 2016, Frischknecht et al. 2016). Beim Flottendurchschnitt der Diesel- und Benzinautos sowie beim Flottendurchschnitt Schweiz wurden die Stickoxidemissionen an die in der Realität gemessenen und gegenüber den Messwerten gemäss NEFZ erhöhten Emissionen angepasst. Auf diese Weise werden die Erkenntnisse aus dem sogenannten Dieselskandal berücksichtigt. Die entsprechenden Emissionsfaktoren basieren auf der Version 3.3+ des HBEFA.¹⁵ Die Stickoxidemissionen des sparsamsten Autos, das mit Diesel betrieben wird, sind ähnlich hoch wie die in HBEFA v3.3+ enthaltenen Emissionsfaktoren und wurden deshalb nicht angepasst.

Die bilanzierten Erdgas-Autos haben einen Realverbrauch von 7.7 Nm³/100 km, der vollständig durch fossiles Erdgas gedeckt wird (KBOB et al. 2016). Das an Schweizer Tankstellen erhältliche Erdgas enthält einen Anteil von mindestens 10 % Biogas (Stolz & Frischknecht 2017), der hier jedoch nicht berücksichtigt wird.

Als Strommix wird der an Schweizer Niederspannungssteckdosen gelieferte Strom eingesetzt (Verbraucher mix (exklusive zertifizierte Anteile), siehe Tabelle 2; in diesem Kapitel als „Strommix CH“ bezeichnet). Es werden der kumulierte nicht erneuerbare Energieaufwand, die Treibhausgas-Emissionen (IPCC 2013), die Umweltbelastung (bewertet mit der Methode der ökologischen Knappheit 2013, Frischknecht et al. 2008; Frischknecht & Büsser Knöpfel 2013) und die Erzeugung radioaktiver Abfälle verglichen. Die Ergebnisse sind bezogen auf einen Fahrzeugkilometer (vkm). Durch Division der Ergebnisse mit der Auslastung von durchschnittlich 1.6 Personen erhält man die Ergebnisse pro Personenkilometer (Tabelle A 1 im Anhang). Dadurch können die Ergebnisse mit denjenigen von anderen Verkehrsmitteln, wie beispielsweise der Bahn, verglichen werden.

Bei Dieselaautos wird zusätzlich zu den Partikelemissionen auch der Ausstoss von Dieseleruss berücksichtigt. Im Flottenmix von Dieselaautos sind rund 70 % der Fahrzeuge mit einem Partikelfilter ausgestattet (INFRAS 2014, Stolz et al. 2016). Pro Fahrzeugkilometer emittiert der Flottenmix der Dieselaautos (ca. 30 % ohne Partikelfilter und 70 % mit Partikelfilter) knapp 6 mg Dieseleruss und der Citroen C4 1.6 BlueHDI 100 (mit geregelter Partikelfilter, Klassenbester) rund 0.0004 mg Dieseleruss.¹⁶ Dieseleruss wird in der Methode der ökologischen Knappheit 2013 mit einem deutlich höheren Ökofaktor gewichtet als PM10 Emissionen (38'000 UBP/g Dieseleruss im Vergleich zu 140 UBP/g PM10)¹⁷.

Die Treibhausgas-Emissionen des heute durchschnittlichen in Betrieb stehenden fossil betriebenen Fahrzeugs liegen deutlich höher als diejenigen eines Elektroautos der Golf-Klasse (292 bis 337 Gramm pro vkm im Vergleich zu 172 Gramm pro vkm). Die Differenz bezüglich kumulierten Energieaufwands nicht erneuerbar ist hingegen deutlich geringer (4.7 bis 5.3 MJ Öl-eq pro vkm im Vergleich zu 4.2 MJ Öl-eq pro vkm). Die Gesamtumweltbelastung ermit-

¹⁵ Persönliche Mitteilung Philipp Hallauer, BAFU, 13.12.2017.

¹⁶ Der Anteil von Dieseleruss an den Partikelemissionen von Dieselaautos basiert auf dem File „PMDR-Bewertung für Diesel-Pw_v1.xlsx“, das vom BAFU im März 2011 bereitgestellt wurde. Die Partikelemissionen der aktualisierten Sachbilanzen für den Betrieb von Dieselaautos und für Dieselflottenmixe aus Stolz et al. (2016) wurden mit dem Anteil von Dieseleruss multipliziert, um die absoluten Dieselerussemissionen zu bestimmen.

¹⁷ Dieseleruss wird in der aktualisierten Methode der Ökologischen Knappheit deutlich höher gewichtet (38'000 UBP'13/g Dieseleruss) als bisher (17'000 UBP'06/g Dieseleruss).

telt mit der Methode der ökologischen Knappheit 2013 liegt beim Elektrofahrzeug rund 35 % höher als beim Erdgas-Auto und rund 9 % höher als beim Flottenmix der Benzinautos, aber rund 33 % tiefer als beim Flottenmix der Dieselaautos. Die Erzeugung radioaktiver Abfälle pro pkm ist beim Elektroauto am höchsten. Das sparsamste Auto der Golfklasse (Klassenbester (Diesel)) emittiert rund 40 % mehr Treibhausgas als das mit Schweizer Strom betriebene Elektroauto, verursacht aber eine tiefere Umweltbelastung und benötigt etwas weniger nicht erneuerbare Primärenergie. Der meist verkaufte Golf (ein Benziner) verursacht rund 79 % höhere Treibhausgas-Emissionen als das Elektroauto und benötigt rund 16 % mehr nicht erneuerbare Primärenergie. Die Umweltbelastung dieses Autos ist 14 % tiefer als diejenige des Elektroautos.

Tabelle 6 Kumulierter Energieaufwand (erneuerbar, nicht erneuerbar), Treibhausgas-Emissionen, Umweltbelastung (Methode der ökologischen Knappheit 2013) und radioaktive Abfälle pro vkm mit verschiedenen Personenwagen

	Verbrauch	KEA, erneuerbar	KEA, nicht erneuerbar	Treibhausgas-emissionen	Umweltbelastung	radioaktive Abfälle
	pro 100 km	MJ Öl-eq	MJ Öl-eq	g CO ₂ -eq	UBP'13	mm ³
Diesel, Flottendurchschnitt	6.0 Liter ²	0.22	4.66	292	602	0.45
Benzin, Flottendurchschnitt	8.5 Liter ²	0.19	5.26	337	374	0.41
Flottendurchschnitt Schweiz	7.5 Liter ²	0.20	5.03	320	463	0.43
Erdgas, Flottendurchschnitt	7.7 Nm ³³	0.21	5.19	290	302	0.44
Diesel, Klassenbester	4.6 Liter ⁴	0.21	3.90	240	298	0.44
Benzin, meist verkauft	7.1 Liter ⁴	0.22	4.89	306	350	0.46
Elektroauto, CH Strommix ¹	20 kWh ⁵	0.61	4.23	172	407	1.54
Hybrid	5.6 Liter ⁶	0.20	4.21	258	333	0.47
Plug-In Hybrid	3.4 Liter ⁷	0.34	3.96	211	329	0.80
Diesel, cityCar, Euro5	2.7 Liter ⁸	0.06	1.73	113	132	0.15
Elektro cityCar, CH Strommix ¹	11.9 kWh ⁸	0.31	1.88	67	148	0.78

¹: Verbrauchermix Schweiz gemäss Stromkennzeichnung 2014, ohne separat verkaufte zertifizierte Stromprodukte; Diese Modellierung wird in den nachfolgenden Sensitivitätsanalysen als Basisvariante verwendet.

²: Verbrauch gemäss Handbuch für Emissionsfaktoren, HBEFA v 3.2 (INFRAS 2014), und mobitool (Frischknecht et al. 2016).

³: Verbrauch gemäss KBOB Ökobilanzdatenbestand DQRv2:2016 (KBOB et al. 2016) und Jungbluth et al. (2007).

⁴: inklusive Realsituations-Zuschlag für Benzin- und Dieselaautos von 39 % gemäss Informationen aus dem Bericht von ICCT (2017).

⁵: Realverbrauch gemäss Empa-Studie (Althaus & Gauch 2010).

⁶: Verbrauch gemäss Empa-Studie (Althaus & Gauch 2010), inklusive Realsituations-Zuschlag von 51 % gemäss Informationen aus der Studie ICCT (2017).

⁷: Rund 35 % der von Plug-In Hybriden gefahrenen Kilometer werden rein elektrisch zurückgelegt (ermittelt basierend auf TNO-Studie (Ligterink & Smokers 2016)). Für den benzinbetriebenen Fahranteil (65 %) wird der Benzinverbrauch von Hybridautos eingesetzt und mit dem Realsituations-Zuschlag von Benzinautos (39 % gemäss ICCT (2017)) multipliziert.

⁸: Verbrauch gemäss Herstellerangaben, www.loremo.com, inklusive Realsituations-Zuschlag (39 % für Diesel-, 70 % für Elektroantrieb gemäss ICCT (2017) und VCS (2015)).

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 (Betrieb) zwischen 54 und 63 % ausmachen,

stammen die wesentlichen Beiträge zur Klimawirkung des Elektroautos aus der Herstellung der Batterien und des Fahrzeugs (siehe Abbildung 1). 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 neu berücksichtigten Kältemittlemissionen verursachen die Treibhausgasemissionen des Betriebes des Elektroautos.

Die Aufwendungen und Emissionen zur Herstellung des Autos und der Batterie werden anteilmässig auf die erwartete Kilometerleistung (Fahrzeug 150'000 km, Batterie: 100'000 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 mit 172 g CO₂-eq/vkm (107 g CO₂-eq/pkm) deutlich höher als in Vergleichsstudien der Schweiz. Die PSI-Studie im Auftrag des EKZ (Bauer & Simons 2010) errechnete einen Wert von rund 70 g CO₂-eq/km, die Empa-Studie im Auftrag der AXPO (Althaus & Gauch 2010) einen Wert von umgerechnet 60 g CO₂-eq/km, jeweils bei Anwendung des Schweizer Strommixes. Der Hauptunterschied liegt in der Bilanzierung der Herstellung der Batterie und in der Batterielebensdauer. Der AXPO-Studie liegen andere Daten zur Li-Ionen-Batterie zugrunde (Notter et al. 2010) und in der PSI-Studie wurde die Zebra-Batterie bilanziert. Unter Verwendung desecoinvent Datensatzes (basierend auf Notter et al. 2010) zur Batterieherstellung resultierten 139 g CO₂-eq/km (siehe Tabelle 8). Im Vergleich mit aktuellen Studien liegen die in dieser Ökobilanz ermittelten spezifischen Treibhausgasemissionen für ein Elektroauto tiefer. Die Studie des Umweltbundesamtes (Helms et al. 2016) errechnete einen Wert von ca. 200 g CO₂-eq/vkm, die Studie von Bauer et al. (2015) einen Wert von 210 g CO₂-eq/km. Der Hauptgrund für die höheren Treibhausgasemissionen der Vergleichsstudien ist, dass der Betrieb der Elektroautos mit dem deutschen (Helms et al. 2016) bzw. dem europäischen (Bauer et al. 2015) Strommix modelliert wurde. Beide Strommixe weisen eine deutlich höhere Treibhausgasintensität auf als der Schweizer Verbrauchermix. Die Treibhausgasemissionen der Fahrzeugherstellung betragen in beiden Studien rund 50 g CO₂-eq/km und sind damit deutlich tiefer im Vergleich zur vorliegenden Studie (110 g CO₂-eq/km; siehe Abbildung 1). Gründe für diese tiefen Treibhausgasemissionen sind die deutlich längere Fahrzeug- und Batterielebensdauer (Helms et al. 2016: Fahrzeug und Batterie 168'000 km; Bauer et al. 2015: Fahrzeug 240'000 km, Batterie 150'000 km). Zudem verwendeten Bauer et al. (2015) die Sachbilanz für Lithium-Ionen Batterien von Notter et al. (2010), die eine deutlich tiefere Treibhausgasintensität aufweist (siehe Tabelle 4).

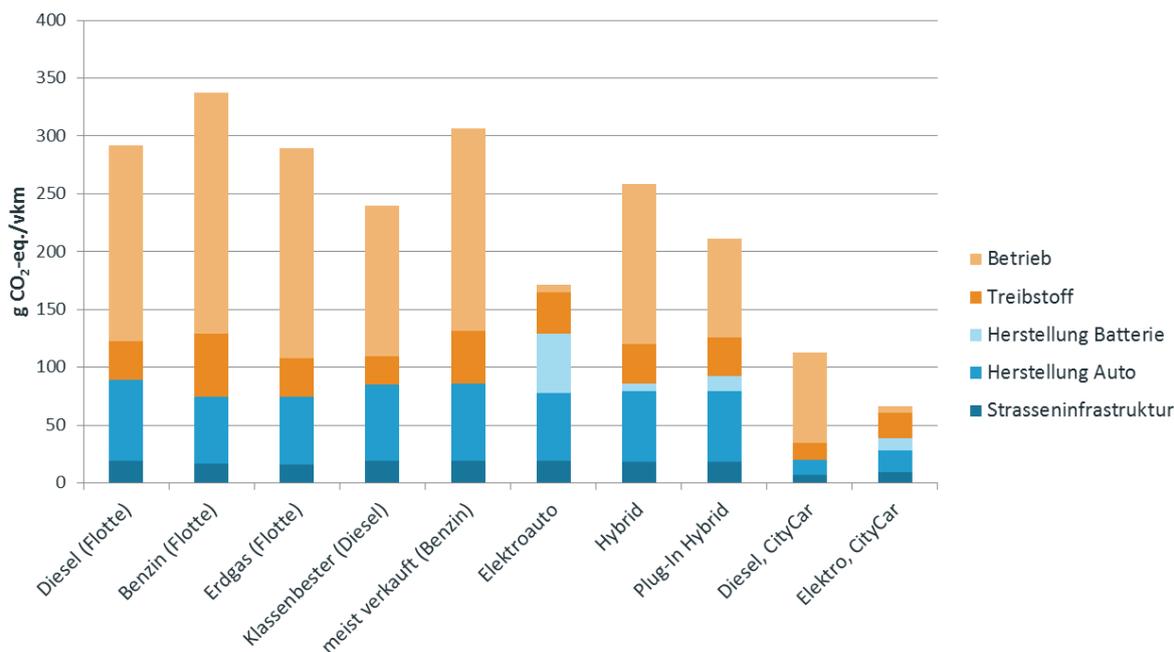


Abbildung 1 Dominanzanalyse der Treibhausgas-Emissionen des Fahrens von 1 vkm mit verschiedenen Personenwagen. Treibstoffverbrauch: Bei „Diesel“, „Benzin“ und „Erdgas“ handelt es sich um den Verbrauch des Flottendurchschnitts gemäss HBEFA v3.2, bei „Benzin, meistverkauft“, „Diesel, Klassenbester“ und „Hybrid“ um den Realverbrauch bestehender Fahrzeuge, bei „Elektroauto“ um den angenommenen Realverbrauch eines Autos der unteren Mittelklasse.

Die Emissionen am Auspuff (Betrieb) der fossil betriebenen Autos sind für über einen Drittel, beim Dieselflottenmix sogar für rund 60 % der Gesamtumweltbelastung bewertet mit der Methode der ökologischen Knappheit 2013 verantwortlich (siehe Abbildung 2). Die Treibstoffbereitstellung, die Fahrzeug-Herstellung (inklusive Unterhalt und Entsorgung) sowie die Strasseninfrastruktur steuern namhafte Anteile zur Gesamtbelastung bei. Bei heutigen Elektroautos tragen die Herstellung des Autos und die Batterieherstellung mit 27 % respektive 41 % die grössten Anteile zur Gesamtbelastung bei.

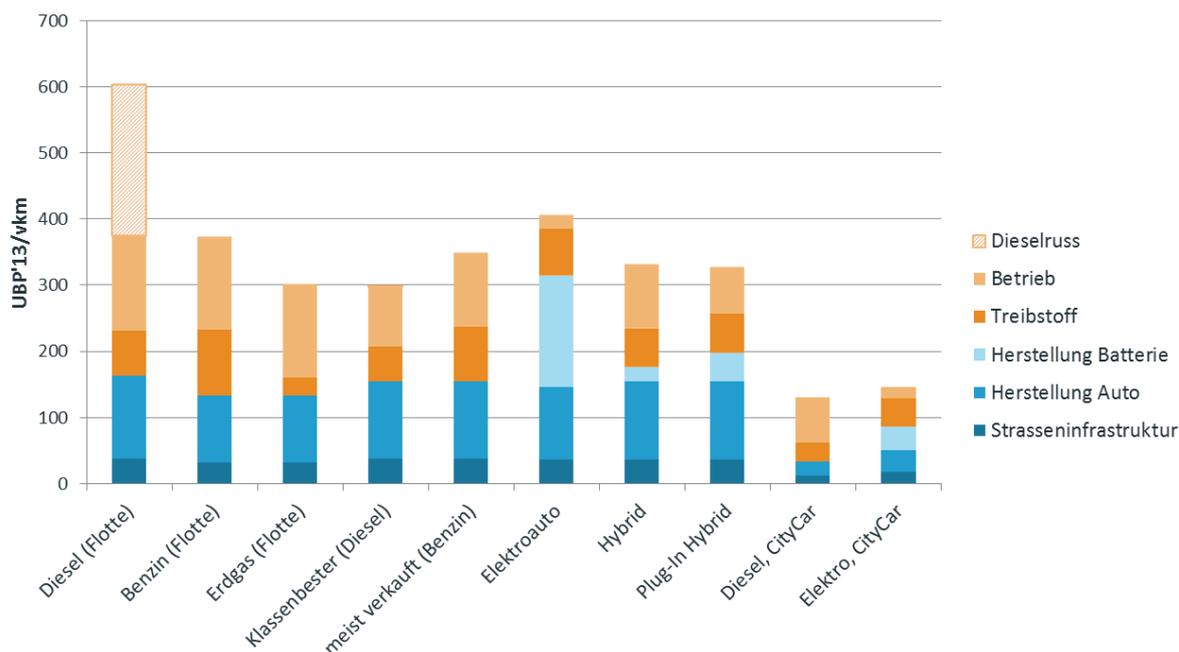


Abbildung 2 Dominanzanalyse der Umweltbelastung (bewertet mit der Methode der ökologischen Knappheit 2013) des Fahrens von 1 vkm mit verschiedenen Personenwagen. Treibstoffverbrauch: Bei „Diesel“, „Benzin“ und „Erdgas“ handelt es sich um den Verbrauch des Flottendurchschnitts gemäss HBEFA v3.2, bei „Benzin, meistverkauft“ und „Diesel, Klassenbester“ um den Realverbrauch bestehender Fahrzeuge, bei „Elektroauto“ um den angenommenen Realverbrauch eines Autos der unteren Mittelklasse.

In Abbildung 3 werden die einzelnen Kategorien der Umweltbelastung gezeigt.¹⁸ Für alle Autos steuern die Treibhausgas-Emissionen sowie die Hauptluftschadstoff- und Partikelemissionen in die Luft den grössten Anteil bei, gefolgt vom Verbrauch von Energie- und mineralischen Primärressourcen. Bei den Elektroautos tragen die Abfälle (hier vor allem radioaktive Abfälle) einen namhaften Beitrag zur Gesamtumweltbelastung bei. Bei den Luftschadstoffen sind vor allem Dieselruss (Flottenmix Dieselaautos), Stickoxide (NO_x), Schwefeldioxid (SO₂) und Partikel (PM10 und PM2.5) von Bedeutung. Beim Flottenmix Benzinauto und beim meistverkauften Benzinauto ist zudem Benzol relevant, das beim Kaltstart und bei der regulären Verbrennung von Benzin emittiert wird. Die Umweltbelastung von Schwermetallemissionen in die Luft ist vor allem für das Elektroauto von Bedeutung. Die Emissionen von Cadmium und Blei tragen 66 bzw. 26 % zur Umweltbelastung in der Kategorie Schwermetallemissionen bei und werden hauptsächlich durch die Herstellung von Primärkupfer, das für die Anode der NCM Lithium-Ionen Batterie eingesetzt wird, verursacht.

¹⁸ Methodische Grundlage und Anwendung auf die Schweiz (Frischknecht & Büsser Knöpfel 2013)

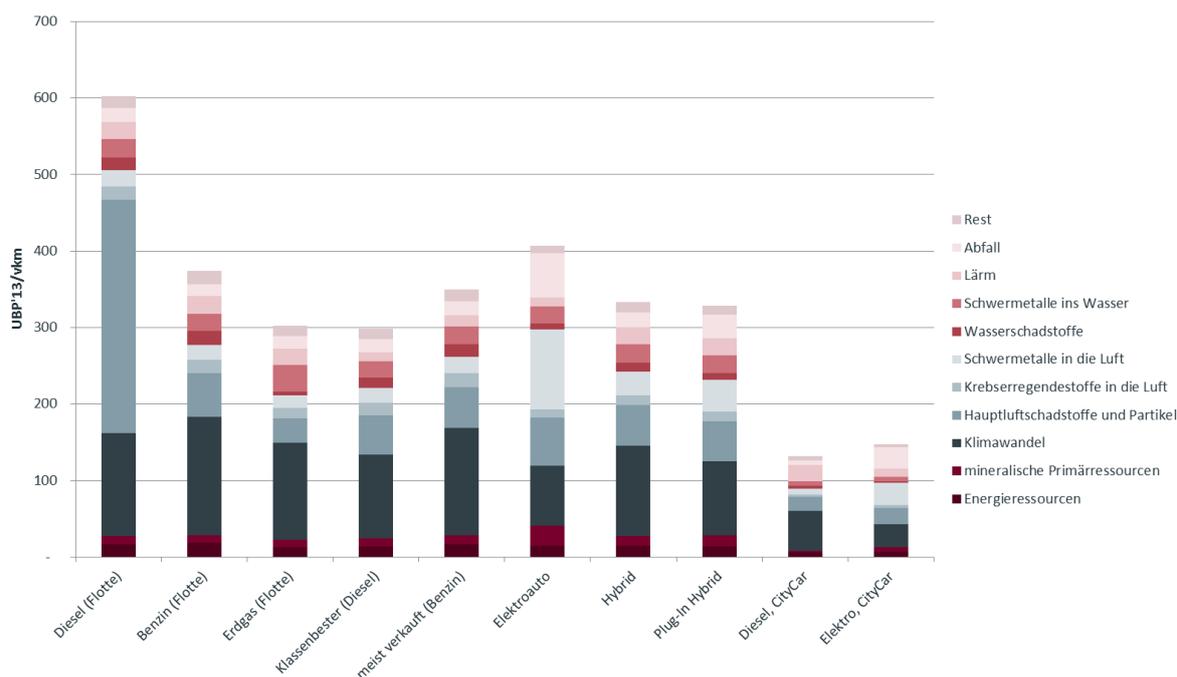


Abbildung 3 Kategorien der Umweltbelastung (bewertet mit der Methode der ökologischen Knappheit 2013) des Fahrens von 1 vkm mit verschiedenen Personenwagen. Treibstoffverbrauch: Bei „Diesel“, „Benzin“ und „Erdgas“ handelt es sich um den Verbrauch des Flottendurchschnitts gemäss HBEFA v3.2, bei „Benzin, 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 Umweltwirkungen der Strombereitstellung variieren je nach eingesetztem Stromprodukt sehr stark. Deshalb kann die Strombereitstellung bei der Ökobilanz von Elektrofahrzeugen eine wesentliche Rolle spielen. Es können ein durchschnittlicher Liefermix, Grenzstrommische oder vertraglich vereinbarte Strommische eingesetzt werden (siehe auch Frischknecht & Stucki 2010 oder Tabelle 1). Aus diesem Grund werden in diesem Abschnitt die Ergebnisse bei Anwendung der in Kapitel 3 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 Ellingsen et al. (2014) basierend auf den Angaben der Firma Miljøbil Grenland. Die Treibhausgas-Emissionen liegen zwischen 138 g CO₂-eq/vkm (zertifizierter Strom) und 386 g CO₂-eq/vkm (Strom aus Braunkohlekraftwerk). Mit Strom aus erneuerbaren Energien oder aus Kernkraftwerken liegen die Emissionen durchwegs unter 154 g CO₂-eq pro Fahrzeugkilometer.

Der nicht erneuerbare kumulierte Energieaufwand liegt zwischen 2.59 MJ Öl-eq/vkm (zertifizierter Strom) und 5.55 MJ Öl-eq/vkm (Strom aus Kernkraftwerk). Elektroautos, die mit Strom aus erneuerbaren Energien angetrieben werden, benötigen deutlich weniger als 3 MJ Öl-eq nicht erneuerbare Primärenergie pro Fahrzeugkilometer.

Die Gesamtumweltbelastung eines gefahrenen Fahrzeugkilometers variiert zwischen 344 UBP (zertifizierter Strom) und 486 UBP (Strom aus Steinkohlekraftwerk). Angetrieben

mit Strom aus erneuerbaren Energien und aus einem Erdgas befeuerten GuD-Kraftwerk verursachen Elektroautos maximal 396 UBP/vkm.

Der Anfall radioaktiver Abfälle ist bei den Strommixen mit Kernenergieanteil erhöht und beim mit Kernkraft betriebenen Elektroauto am höchsten. Strom aus erneuerbaren und fossilen Quellen erzeugt 60 bis 70 % weniger radioaktive Abfälle (bezogen auf den Schweizer Strommix beziehungsweise auf Kernkraft).

Tabelle 7 Kumulierter Energieaufwand, Umweltbelastung (Methode der ökologischen Knappheit 2013), Treibhausgas-Emissionen und radioaktive Abfälle pro vkm mit einem Elektroauto, geladen mit Elektrizität unterschiedlicher Herkunft

	KEA, erneuerbar	KEA, nicht erneuerbar	Treibhausgas-emissionen	Umweltbelastung	radioaktive Abfälle
Strom für Elektroauto von ...	MJ Öl-eq	MJ Öl-eq	g CO ₂ -eq	UBP'13	mm ³
Produktionsmix Schweiz	0.71	3.78	141.6	378	1.36
Konsummix Schweiz	0.61	4.23	171.7	407	1.54
zertifizierter Strommix	1.05	2.59	138.3	344	0.64
GuD Kraftwerk	0.23	4.14	227.5	396	0.64
Steinkohle Deutschland ¹	0.25	5.32	378.6	486	0.66
Braunkohle Deutschland ¹	0.23	5.18	385.6	476	0.65
Kernkraftwerk Schweiz ¹	0.23	5.55	140.1	425	2.47
Photovoltaik Schweiz ¹	1.10	2.80	154.3	369	0.66
Windkraft Schweiz ¹	1.72	2.63	140.6	350	0.64
ENTSO-E Mix	0.44	4.62	239.3	443	1.35

¹: Durchschnitt der in Betrieb stehenden Anlagen.

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. Bei Verwendung der bisher imecoinvent Datenbestand implementierten Sachbilanz zu Li-Ionen-Batterien von Notter et al. (2010) liegen die Treibhausgas-Emissionen rund 19 % resp. 40 % tiefer als diejenigen der Ökobilanz basierend auf Industriedaten beziehungsweise einer Input-Output Modellierung (siehe Tabelle 8). Wie in Kapitel 4 ausgeführt, erachten wir die Bilanz von Ellingsen et al. (2014) auf Basis von Primärdaten eines Batterieherstellers als realitätsnäher. Im Unterkapitel 4.1 werden die wesentlichen Gründe für die Unterschiede in den Batteriebilanzen beschrieben.

Tabelle 8 Kumulierter Energieaufwand (KEA) erneuerbar und nicht erneuerbar, Treibhausgas-Emissionen, Umweltbelastung (Methode der ökologischen Knappheit 2013) und radioaktive Abfälle pro vkm mit einem Elektroauto, verschiedene Sachbilanzen Li-Ionen-Batterie

	KEA, erneuerbar	KEA, nicht erneuerbar	Treibhausgas-emissionen	Umweltbelastung	radioaktive Abfälle
Elektroauto gefahren mit ...	MJ Öl-eq	MJ Öl-eq	g CO ₂ -eq	UBP'13	mm ³
Li-Ionen-Batterie Ellingsen et al. 2014	0.61	4.23	172	407	1.54
Li-Ionen-Batterie Input-Output (USA)	0.57	5.59	232	356	1.33
Li-Ionen-Batterie Notter et al. 2010	0.59	3.65	139	298	1.37

In der Basisvariante wird mit Ausnahme des CityCars davon ausgegangen, dass die Batterie nach 100'000 km 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 2013) und radioaktive Abfälle pro vkm mit einem Elektroauto, eineinhalb, keine, beziehungsweise 2 Ersatzbatterien gemäss Hersteller-Modellierung

	Betriebsdauer Batterie	KEA, erneuerbar	KEA, nicht erneuerbar	Treibhausgas-emissionen	Umweltbelastung	radioaktive Abfälle
Elektroauto gefahren mit ...	in km	MJ Öl-eq	MJ Öl-eq	g CO ₂ -eq	UBP'13	mm ³
0.5 Ersatzbatterie (Basisvariante)	100'000	0.61	4.23	172	407	1.54
keine Ersatzbatterie	150'000	0.59	3.94	156	352	1.47
2 Ersatzbatterien	50'000	0.64	5.09	220	571	1.76

Die Variation der Batterie-Lebensdauer wirkt sich am stärksten auf die Höhe der Gesamtumweltbelastung aus. Hier ist eine Veränderung um -14 % resp. +41 % zu beobachten. Die Treibhausgas-Emissionen nehmen um 9 % ab, wenn die Batterie über eine Fahrdistanz von 150'000 km genutzt werden kann. Wenn die Batterie während der Fahrzeuglebensdauer zweimal ersetzt werden muss, steigen die Treibhausgas-Emissionen pro Fahrzeugkilometer um 28 %. Der kumulierte Energieaufwand nicht erneuerbar variiert um -7 % resp. +20 %. Die Variation der Erzeugung radioaktiver Abfälle ist mit -5 % resp. +14 % eher gering.

7.4 Fazit

Die Ökobilanzergebnisse des Fahrens mit einem Elektroauto zeigen eine grosse Bandbreite auf. Der für den Betrieb von Elektroautos eingesetzte Strommix hat einen starken Einfluss auf die Treibhausgasemissionen und die übrigen Umweltkennwerte. Das Elektroauto mit den Annahmen der Basisvariante (Sachbilanz der Batterieherstellung gemäss Ellingsen et al. (2014) und Ersatz der Batterie bei jedem zweitem Auto) verursacht Treibhausgas-Emissionen von rund 140 Gramm CO₂-eq pro Fahrzeugkilometer, wenn es mit dem zertifizierten Strommix aus erneuerbaren Energien betrieben wird. Wird das Elektroauto hingegen mit Strom aus deutschen Braunkohlekraftwerken geladen, so steigen die Treibhausgas-Emissionen auf mehr als das Zweifache (390 Gramm CO₂-eq pro Fahrzeugkilometer). Beim Betrieb mit dem Schweizer Verbrauchermix betragen die Treibhausgas-Emissionen des Elektroautos rund 170 Gramm CO₂-eq pro Fahrzeugkilometer. Der Strommix wirkt sich auch auf die übrigen Umweltindikatoren deutlich aus. Beispielsweise weisen Elektroautos, welche mit Strom aus (mehrheitlich) fossilen Quellen geladen werden, hohe spezifische Treibhausgas-Emissionen auf, produzieren aber relativ wenig radioaktive Abfälle. Werden die Fahrzeuge mit Strom aus Kernkraftwerken geladen, sind die Treibhausgas-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.

Die Datengrundlage und die Lebensdauer der Batterie haben ebenfalls einen grossen Einfluss auf die Umweltauswirkungen von Elektroautos. Ein mit dem Schweizer Verbraucher-Strommix betriebenes Elektroauto verursacht je nach verwendeter Datengrundlage für die Batterieherstellung Treibhausgas-Emissionen von 140 Gramm CO₂-eq (Sachbilanz gemäss Notter et al. (2010)) bis 230 Gramm CO₂-eq (Input-Output-Bilanz der USA gemäss Suh (2010)) pro Fahrzeugkilometer. Die Treibhausgas-Emissionen des Fahrens mit Elektroautos

gemäss der in der Basisvariante verwendeten Sachbilanz der Batterieherstellung (Ellingsen et al. 2014) liegen mit rund 170 Gramm CO₂-eq pro Fahrzeugkilometer zwischen diesen Werten. Die Variation der angenommenen Batterielebensdauer (kein bzw. zwei Batteriewechsel während der Nutzungsdauer des Elektroautos gegenüber einem Batteriewechsel bei jedem zweiten Elektroauto gemäss der Basisvariante) führt zu einer ähnlichen Bandbreite der Ergebnisse, wenn die Batterieherstellung mit der Sachbilanz von Ellingsen et al. (2014) modelliert wird.

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

Heute bestehen noch grosse Unsicherheiten bezüglich der Lebensdauer und Herstellungsaufwände der Batterien und dem Strombedarf der Elektroautos im Alltag. Auch das Emissionsverhalten neuer Benzin- und Dieselaautos und deren Treibstoffbedarf im Alltag sind mit Unsicherheiten behaftet.

7.5 Unterschiede zur bisherigen Version

Die wesentlichen Veränderungen in den Ökobilanzen von Elektroautos und fossil betriebenen Autos im Vergleich zur bisherigen Version dieses Argumentariums (Frischknecht 2014) sind in den folgenden Bereichen zu beobachten:

- Wechsel der Bezugsgrösse von Personen- auf Fahrzeugkilometer
- Aktualisierte Materialisierung aller Fahrzeuge
- Umweltwirkungen Batterieherstellung
- Realsituationszuschlag fossil betriebene Autos
- Umweltkennwerte Schweizer Strom
- Wechsel von UBP 06 auf UBP 13

Neu werden die Ergebnisse pro Fahrzeugkilometer und nicht mehr pro Personenkilometer präsentiert. Bei Personenwagen wird mit einer durchschnittlichen Auslastung von 1.6 Personen gerechnet. Dadurch sind die Umweltwirkungen der vorliegenden Version generell um einen Faktor 1.6 höher. Um die beiden Versionen im Folgenden zu vergleichen, müssen die Umweltwirkungen der vorliegenden Version durch 1.6 dividiert werden.

Die Aktualisierung der Materialisierung aller Fahrzeuge hat zur Folge, dass in der vorliegenden Version die Fahrzeugherstellung deutlich höhere Umweltwirkungen verursacht. Beim Elektroauto beispielsweise führt die aktualisierte Materialisierung des Fahrzeuges zu 50 % höheren Treibhausgasemissionen und zu einer über 80 % höheren Gesamtumweltbelastung.

Neben der Fahrzeugherstellung hat auch die Aktualisierung der Batterieherstellung eine Veränderung der Umweltauswirkungen des Elektroautos zur Folge. Die Veränderungen sind einerseits auf die neue Sachbilanz der Batterieherstellung sowie andererseits auf die Anzahl Batteriewechsel während der Nutzungsdauer des Elektroautos zurückzuführen. Die Gesamtumweltbelastung und der Primärenergiebedarf der Batterieherstellung (pro kg Batterie) sind in der vorliegenden Version verglichen zur bisherigen Version¹⁹ infolge des höheren Kupferbe-

¹⁹ In der bisherigen Version dieser Studie wurde die Batterieherstellung mit einem Datensatz aus der Datenbank von treeze modelliert. Die damals verwendete Sachbilanz basiert auf dem Umweltbericht eines japanischen Herstellers und wurde auf die verschiedenen Produkte dieses Unternehmens alloziert (Frischknecht 2014).

darfs deutlich höher, die Treibhausgasemissionen sind 10 % tiefer. Jedoch wird in der vorliegenden Version nur noch mit 1.5 anstatt zwei kompletten Batteriensätzen während der Nutzungsdauer des Elektroautos gerechnet, was den Anstieg der Umweltbelastung dämpft und den Rückgang der Treibhausgasemissionen verstärkt. Insgesamt verursacht die Batterie verglichen zur bisherigen Version eine deutlich höhere Gesamtumweltbelastung, aber über 30 % tiefere Treibhausgasemissionen.

Der Realsituationszuschlag wurde für die beiden Fahrzeuge der Golfklasse mit Verbrennungsmotor (meist verkaufter und klassenbesten) von 20 % auf 39 % erhöht. Andererseits wurden auch die NEFZ-Verbräuche des klassenbesten und meist verkauften Fahrzeuges der Golf-Klasse aktualisiert. Diese liegen deutlich unter den NEFZ-Treibstoffverbräuchen der bisherigen Version. Insgesamt haben sich daher die Treibstoffverbräuche des klassenbesten und des meist verkauften Fahrzeuges der Golf-Klasse im Vergleich zur bisherigen Version leicht verringert. Dem Diesel und Elektro City Car wurden in der vorliegenden Version neu auch ein Realsituationszuschlag von 39 % respektive 70 % angerechnet. Dadurch sind die Umweltbelastungen des Betriebes und der Treibstoffbereitstellung der beiden CityCars deutlich höher.

Die Umweltwirkungen des Schweizer Verbraucher-Strommixes haben sich im Vergleich zur bisherigen Version deutlich verändert. Insbesondere die Treibhausgas-Emissionen haben um 22 % zugenommen. Der Grund dafür liegt hauptsächlich in der neuen Modellierung der nicht überprüfaren Energieträger, für die neu der europäische Residualstrommix eingesetzt wird (Messmer & Frischknecht 2016). Dieser wird zu 57 % in fossilen Kraftwerken erzeugt und weist darum eine höhere Treibhausgasintensität auf als der bisher verwendete UCTE-Strommix. Zudem hat der Anteil der nicht überprüfaren Energieträger am Verbrauchermix leicht zugenommen. Im Gegensatz zu den Treibhausgas-Emissionen haben die Gesamtumweltbelastung, der nicht erneuerbare Primärenergiebedarf und die radioaktiven Abfälle des Schweizer Verbraucher-Strommixes gegenüber der bisherigen Version abgenommen, was vor allem auf einen geringeren Anteil von Kernkraftwerken zurückzuführen ist.

Durch den Wechsel von der Methode der ökologischen Knappheit 2006 zur Methode der ökologischen Knappheit 2013 werden die Treibhausgasemissionen und die Bereitstellung fossiler Brennstoffe/Rohstoffe in der vorliegenden Version stärker gewichtet. Dies führt zu einem höheren Beitrag des Betriebs zur Gesamtumweltbelastung der Autos mit Verbrennungsmotor. Zudem wurde in der vorliegenden Version auch für die Dieselmotoremissionen der höhere Ökofaktor der Methode der ökologischen Knappheit 2013 verwendet.

Insgesamt führen diese Veränderungen dazu, dass die Gesamtumweltbelastung aller Fahrzeuge teilweise deutlich zugenommen hat. Die spezifischen Treibhausgasemissionen hingegen haben sich gegenüber der bisherigen Version nur leicht verändert.

8 Verminderungspotenzial der Umweltbelastung durch Elektroautos

8.1 Übersicht

Die Verminderungspotenziale werden unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus den vorhergehenden Kapiteln dieses Berichts ausgewiesen. Als Referenz wird das Schweizer Durchschnittsauto für das Jahr 2014 gewählt (Flottenmix Diesel und Benzin, siehe Tabelle 6). Die Verkehrsleistung der inländischen Pkw in der Schweiz betrug in diesem Jahr insgesamt 49'589 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 (knapp 5'600 Mio. Personenkilometer oder rund 307'000 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)
- durch ein verbrauchsarmes Dieselloauto vom Typ Citroen C4 1.6 BlueHID (mit einem Verbrauch von 4.6 l Diesel/100 km²⁰)
- durch das meistverkaufte Benzinauto vom Typ VW Golf 1.4 TSI DSG (mit einem Verbrauch von 7.1 l Benzin/100 km²⁰)
- durch ein Hybridauto vom Typ Toyota Prius III (mit einem Verbrauch von 5.6 l/100km²¹) ersetzt wird.

8.2 Klimagas und Umweltbelastung

Falls alle erstmals in Verkehr gesetzten Neuwagen Elektroautos sind, können die Klimagas-Emissionen um rund 514'000 Tonnen CO₂-eq pro Jahr reduziert werden (siehe Tabelle 10). Sind alle Neuwagen verbrauchsarme Dieselfahrzeuge beziehungsweise entsprechen sie dem meistverkauften VW Golf, können die Emissionen um 278'000 Tonnen beziehungsweise um 46'000 Tonnen CO₂-eq pro Jahr reduziert werden. Der nicht erneuerbare Primärenergiebedarf der heutigen Neuwagenflotte kann mit Elektroautos um knapp 2'800 TJ, mit verbrauchsarmen Dieselfahrzeugen um rund 3'900 TJ und mit dem beliebtesten VW Golf um rund 490 TJ Öl-Äquivalente reduziert werden. Mit Elektroautos werden andererseits knapp 1'400 TJ zusätzliche erneuerbare Primärenergie benötigt. Die Gesamtumweltbelastung der heutigen Mobilität mit Personenwagen kann durch Ersatz mittels Elektroautos um gut 190 Mia. UBP respektive 410 Mia. UBP (mit zertifiziertem Strom) verringert werden. Beim Ersatz mit verbrauchsarmen Dieselfahrzeugen, beziehungsweise mit dem beliebtesten VW Golf oder Hybrid kann die Gesamtumweltbelastung um rund 570 Mia. UBP, um 390 Mia. UBP, resp. um rund 450 Mia. UBP verringert werden. Der jährliche Anfall radioaktiver Abfälle wird durch den Einsatz von Elektroautos um rund 3.9 m³ erhöht, während beim Einsatz verbrauchsarmer Dieselfahrzeuge eine leichte Zunahme von 0.04 m³ zu beobachten ist. Auch die Emission von radioaktivem C-14²² wird durch den Einsatz von Elektrofahrzeugen um 16 GBq erhöht, durch den Einsatz verbrauchsarmer Dieselfahrzeuge hingegen um knapp 0.3 GBq 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 das Reduktionspotential von C-14 Emissionen durch den Einsatz des meist verkauften VW Golf (Benziner) weniger hoch ist.

²⁰ Normverbrauch plus 39 % Realsituations-Zuschlag, gemäss ICCT (2017).

²¹ Normverbrauch plus 51 % Realsituations-Zuschlag, gemäss ICCT (2017).

²² 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.

Tabelle 10 Reduktionspotenzial kumulierter Energieaufwand (KEA) erneuerbar und nicht erneuerbar, Treibhausgas-Emissionen, Umweltbelastung (Ökologische Knappheit 2013) und radioaktive Abfälle pro Jahr durch den Ersatz von rund 307'000 herkömmlichen Autos durch Elektroautos, durch Hybride, durch verbrauchsarme Dieselfahrzeuge des Typs Citroen C4 1.6 BlueHDI beziehungsweise durch den meistverkauften VW Golf.

	KEA, erneuerbar	KEA, nicht erneuerbar	Treibhausgas-emissionen	Umweltbelastung	radioaktive Abfälle	C-14
	TJ Öl-eq	TJ Öl-eq	1'000t CO ₂ -eq	Mia. UBP'13	m ³	MBq
Elektroauto ¹⁾	-1'394	2'784	514	194	-3.86	-16'085
Elektroauto (mit zert. Strom)	-2'953	8'482	630	410	-0.72	-1'988
Hybrid	1	2'852	214	450	-0.12	-35
Benzin, meist verkauft	-48	491	46	391	-0.11	18
Diesel, Klassenbesten	-33	3'931	278	570	-0.04	262

¹⁾: Für diese Berechnungen werden die Ergebnisse der Basisvariante des Elektroautos (in Tabelle 6) verwendet.

8.3 Luftschadstoffe

Das Reduktionspotenzial an Luftschadstoffen liegt bei jährlich rund 1'250 Tonnen NO_x für Elektroautos und gut 1'210 Tonnen für den meist verkauften VW Golf (siehe Tabelle 11). Dies liegt im Wesentlichen am deutlich tieferen Verbrauch und am höheren Emissionsstandard (Euro 6) im Vergleich zum heutigen Durchschnittsfahrzeug. Die NO_x-Emissionen des Elektroautos stammen vorwiegend aus der Herstellung der Batterie (insbesondere der Stromproduktion in ostasiatischen Kohlekraftwerken) und des Autos sowie dem Einsatz von europäischem Strom im Betrieb (Importanteil des Schweizer Strommixes aus nicht überprüfbaren Energieträgern) und der Herstellung von Materialien wie Primärstahl und -kupfer.

Die Herstellung von Li-Ionen-Batterien führt zu Partikel-Mehremissionen beim Elektroauto von 106 Tonnen pro Jahr im Vergleich zum heutigen Flottenmix. Diese Erhöhung der Partikelemissionen beim Wechsel auf Elektroautos ist auf die hohen Partikelemissionen der Gewinnung des in der Batterie verwendeten Kupfers und des für die Batterieherstellung eingesetzten Strommixes mit einem hohen Anteil von Strom aus Kohlekraftwerken zurückzuführen. Ebenfalls von Bedeutung sind die Emissionen der Erzeugung von Strom aus nicht überprüfbaren Energieträgern in europäischen Kraftwerken für den Schweizer Verbraucher-Strommix, der für den Betrieb der Elektroautos eingesetzt wird. Der Anteil der Partikelemissionen durch Strassen- und Reifenabrieb beträgt beim Elektroauto 9 %. Eine Reduktion der Bremsabrieb-Emissionen durch Rekuperation wurde in der Sachbilanz von Elektroautos bereits berücksichtigt.

Beim Benützen eines verbrauchsarmen Dieselaautos mit Euro 6 Emissionsstandard und geregtem Partikelfilter beziehungsweise des meist verkauften VW Golf (1.4 TSI DSG) kann hingegen eine Reduktion der Partikel-Emissionen von 42 Tonnen beziehungsweise 15 Tonnen erzielt werden. Der Unterschied zwischen Diesel- und Benzinauto ist hauptsächlich durch die unterschiedlich hohen Aufwendungen und Emissionen in der Treibstoffbereitstellung begründet.²³ Die jährlichen Partikel-Emissionen am Auspuff der Autos können je nach Autotyp um zwischen rund 11 Tonnen (meist verkauftes Benzinauto) und knapp 16 Tonnen (klassenbestes Dieselaauto) reduziert werden. Rund 70 % oder zwischen 7.7 und 12 Tonnen dieser Partikel Emissionen sind Dieseldiesel-Emissionen. Die Reduktion der Dieseldiesel-Emissionen mit dem verbrauchsarmen Dieselaauto ist nicht ein Verdienst dieses Fahrzeugs sondern eine Folge der

²³ Dieseltreibstoff wird in Raffinerien mit einem deutlich geringeren Aufwand hergestellt als Benzin.

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 ausgestattet, was dazu führt, dass dieses Fahrzeug mehr Partikel (Anzahl und Masse) emittiert als der verbrauchsarme Citroen C4 1.6 BlueHDI mit Dieselmotor und geregeltem Partikelfilter.

Tabelle 11 Reduktionspotenzial Luftschadstoffe durch den Einsatz von Elektroautos, durch verbrauchsarme Dieselfahrzeuge des Typs Citroen C4 1.6 BlueHDI beziehungsweise durch den meistverkauften VW Golf.

	Stickoxide	Partikel	Partikel, Auspuff	Dieselmotoren, Auspuff
	Tonnen	Tonnen	Tonnen	Tonnen
Elektroauto ¹⁾	1'245	-106	15.7	11.7
Elektroauto (mit zert. Strom)	1'417	-54	15.7	11.7
Hybrid	1'340	48	12.0	8.6
Benzin, meist verkauft	1'215	15	11.0	7.7
Diesel, Klassenbester	671	42	15.7	11.7

¹⁾: Für diese Berechnungen werden die Ergebnisse der Basisvariante des Elektroautos (in Tabelle 6) verwendet.

Gemäss Mikrozensus sind 12 % der Fahrten mit Pkw kürzer als 1 km und 30 % kürzer als 3 km (BFS/ARE 2012). Das bedeutet für die Luftschadstoffe: Die Autos fahren mit kaltem Motor, was signifikant höhere Luftemissionen verursacht, weil die Abgasnachbehandlungssysteme noch nicht auf Betriebstemperatur erwärmt sind. Die Fahrten unter 3 km machen allerdings lediglich rund 7 bis 8 % der gesamten zurückgelegten Distanzen (Kilometerleistung) aus (Boulouchos 2011). Rund 30 % der zurückgelegten Kilometer (nicht der Anzahl Fahrten) stammen von Fahrten von 15 km Länge und weniger.

Elektroautos können somit lokal in Zonen mit hoher Luftschadstoff-Belastung zur Senkung der Immissionen beitragen. Jedoch entstehen im Ausland hohe Luftschadstoff-Emissionen bei der Herstellung von Batterien (spezifische ostasiatische Stromproduktion inklusive Kohlekraftwerke in China) und Fahrzeugen.

8.4 Lärmbelastung

In der Methode ökologische Knappheit 2013 wird neu Verkehrslärm bewertet. Für den Personwagen wird eine durchschnittliche Lärmemission von 72 dB(A) angenommen, welche für spezifische Fahrzeuge mit bekannten Lärmemissionen angepasst werden kann (Frischknecht & Büsser Knöpfel 2013).

Die technischen Spezifikationen der in Tabelle 5 aufgeführten Elektroautos enthalten keine Angaben zum Lärm-Typenprüfwert (der Typenprüfwert muss nicht unbedingt den Lärm-Emissionen im Realverkehr entsprechen, jedoch gibt er eine Grössenordnung an). Gemäss der Auto-Umweltliste 2015 des VCS (VCS 2015) liegt der Lärm-Typenprüfwert des VW Golf-E bei 69 dB(A) und der Lärmwert des Mitsubishi i-MiEV liegt bei 66dB(A). 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

Neuwagen liegt bei knapp 72 dB(A).²⁴ Der Lärm-Typenprüfwert des Citroen C4 1.6 BlueHDI (Klassenbester) liegt bei 69 dB(A), derjenige des VW Golf 1.4 TSI DSG (meist verkaufter) bei 70 dB(A). Ein Unterschied von 3 dB(A) entspricht energetisch der Halbierung des Verkehrs, 10 dB(A) entsprechen ungefähr der Hälfte des wahrgenommenen Lärms durch das menschliche Gehör.

Bei modernen Pkw wird das Abrollgeräusch bei konstanter Geschwindigkeit ab ca. 20 km/h dominant, bei Tempi oberhalb wird die Differenz zunehmend kleiner. Bei beschleunigter Fahrweise verschiebt sich diese Grenze nach oben. Grösster Nutzen entsteht eindeutig in urbanem Stop-and-go-Verkehr, wo eine verbreitet eingesetzte Elektromobilität lärmseitig eine starke Verbesserung bringen würde. Ab Ausserorts-Geschwindigkeiten ist indes keine Verbesserung zu erwarten.

8.5 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.²⁵ In diesem Sinne führt ein Kraftwerkszubau nicht zu einer Erhöhung der spezifischen Landinanspruchnahme pro gefahrenen Kilometer.

8.6 Einsatz mineralischer Rohstoffe

8.6.1 Übersicht

Sowohl bei Benzin- und Dieselaautos als auch bei Elektroautos werden Rohstoffe eingesetzt, deren heute bekannte Reserven²⁶ oder deren Produktionskapazitäten begrenzt sind. In den nachfolgenden Abschnitten wird die heutige und mögliche zukünftige Situation von einzelnen für Pkw relevanten Rohstoffen beleuchtet.

8.6.2 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

²⁴ Auszug TARGA, Februar 2011, Persönliche Mitteilung N. Egli, 28.03.2011

²⁵ Die durch das Kraftwerk während einem Jahr genutzte Fläche wird auf die Jahresproduktion des Kraftwerks aufgeteilt.

²⁶ 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.

ausbeutbaren Weltressourcen bei 100'000 Tonnen (Angerer et al. 2009, S.290). Mit einer statistischen Reichweite von knapp 200 Jahren handelt es sich um keine geologisch knappe Ressource. 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.

8.6.3 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 Benzinautos enthält einen Bedarf von rund 16 kg Kupfer (ecoinvent Centre 2014). Das Elektroauto weist mit rund 34 kg Kupfer einen gut doppelt so hohen Bedarf auf (Elektromotor). Die Batterie weist einen zusätzlichen Kupferbedarf von ca. 39 kg auf (Ellingsen et al. 2014). Der Kupferbedarf eines durchschnittlichen Benzinautos liegt somit leicht unter den vorgenannten Erfahrungswerten. Der Mehrbedarf an Kupfer für Elektroautos (ohne Batterie) im Vergleich mit konventionellen Autos 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.

8.6.4 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 14 Millionen Tonnen geschätzt, die Ressourcen auf rund 41 Millionen Tonnen (Meridian International Research 2008; USGS 2016). Die Jahresproduktion lag im Jahr 2015 gemäss derselben Quelle bei 32'500 Tonnen Lithium-Metall. Durch geplante Inbetriebnahmen weiterer Minen kann im optimalen Fall mit einer Ausdehnung der Jahresproduktion auf knapp 310'000 Tonnen Li_2CO_3 oder 58'000 Tonnen Lithium-Metall im Jahr 2020 gerechnet werden. Davon stehen rund 45'000 Tonnen Li_2CO_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 durchschnitt-

lichen 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 Automobilssektor 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.

8.6.5 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.

8.6.6 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 führen²⁷, 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

²⁷ Der Neodym-Bedarf in Nd-Fe-B-Permanentmagneten liegt bei ca. 4000 Tonnen (Angerer et al. 2009).

Rückstände an.²⁸ Im KBOB Ökobilanzdatenbestand DQRv2:2016 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. Der Bedarf an Seltenen Erden liegt beimecoinvent Datensatz zum Elektromotor, der im Elektro- und Hybridauto eingesetzt wird, bei 38 g pro kg Elektromotor. In den Batterie-Datensätzen ist jedoch kein Bedarf an Metallen der Seltenen Erden ausgewiesen.

8.6.7 Fazit

Die Rohstoffverfügbarkeit ist eher eine Frage begrenzter Produktionskapazitäten und geopolitischer Einschränkungen denn eine der geologischen Knappheit. Dies gilt für Lithium und Kobalt 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 Umweltwirkungen 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 der Sachbilanz der Batterie-Herstellung keine Metalle der Seltenen Erden berücksichtigt, da in den verfügbaren Unterlagen zur Materialzusammensetzung keine Angaben gemacht werden.

8.7 Konflikte zwischen der Öko-Strom-Produktion und verschiedenen Umweltbereichen

In einer Ökobilanz werden die Umweltwirkungen 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 Umweltwirkungen, wie dies für die nationalen Schutzgüter Natur und Landschaft erforderlich wäre.

Lokale Auswirkungen auf Natur und Landschaft durch den Bau neuer Kraftwerkskapazitäten (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 Umweltwirkungen 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.

²⁸ <http://www.actu-environnement.com>; Interview mit Christian Hocquard vom 2. Juni 2010, Zugriff am 22. Februar 2011.

9 Folgerungen und Ausblick

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 CO₂-Intensität des Schweizer Strommixes von gut 180 g CO₂-eq/kWh, einer Lebensleistung der rund 300 kg schweren Batterie von 100'000 km und einer Emissionsintensität der Batterieherstellung von rund 15 kg CO₂-eq pro kg Batterie. Unter diesen Annahmen kann der Wechsel von einem durchschnittlichen Auto zu einem Elektroauto die Treibhausgas-Emissionen knapp doppelt so stark reduzieren wie beim Wechsel zu einem verbrauchsarmen Dieselauto derselben Klasse. Im Vergleich zum heute meist verkauften VW Golf Modell (1.4 TSI DSG) können die Treibhausgas-Emissionen durch die Benützung eines Elektroautos sogar 11-mal stärker gesenkt werden. Das Reduktionspotenzial liegt somit zwischen 46'000 und 514'000 Tonnen CO₂-eq pro Jahr, was rund 0.10 bis 1.1 % der jährlichen Schweizer Treibhausgas-Emissionen (Territorialprinzip) entspricht (BAFU 2017).

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 und die Verwendung von erneuerbaren Energien in der Batterieherstellung verringern die klimaschädigenden Emissionen des Elektroautos massgeblich. Durch die Verwendung von zertifiziertem Strom weist das Elektroauto für die Mehrheit der Umweltindikatoren tiefere oder ähnlich hohe Belastungen auf wie das Klassenbeste Fahrzeug. 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 Fahrzeugenker individuell beeinflussbar und haben einen grossen Einfluss auf die Ökobilanz von Elektroautos. 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 2013²⁹, und der kumulierte nicht erneuerbare Energieaufwand können durch den Einsatz eines sparsamen Dieselautos der unteren Mittelklasse (Golf-Klasse) stärker reduziert werden als durch den Einsatz eines Elektroautos derselben Klasse und unter den hier getroffenen Annahmen.

Werden Elektrofahrzeuge mit Strom aus Kernkraftwerken betrieben, erhöht sich die Menge des anfallenden hochradioaktiven Abfalls gegenüber einem sparsamen Dieselfahrzeug um mehr als einen Faktor 5, bei einem um 42 % tieferen Ausstoss an Klimagasen.

Die Vorteile von Elektrofahrzeugen zeigen sich vor allem bei einer differenzierten Betrachtung der Umweltwirkungen. 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 eine Verbesserung bei der Belastung mit Luftschadstoffen, da beim Betrieb lokal keine Emissionen entstehen. Andererseits ermöglichen Elektroautos aber keine Reduktion des

²⁹ 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.

Bedarfs an Strassenflächen und leisten damit der Zersiedelung ähnlich Vorschub wie Benzin- und Dieselaautos.

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 zwischen verschiedenen Antriebskonzepten (Diesel oder Elektro) bei den Leichtbaufahrzeugen sind gering. Eine deutliche Reduktion des spezifischen Verbrauchs durch den Bau von kleineren und leichteren Fahrzeugen ist daher in erster Linie anzustreben. Die Wahl des geeigneten und umweltfreundlichen Antriebskonzeptes kommt erst an zweiter Stelle.

Insgesamt ist die Informationssituation bezüglich Benzin-, Diesel- und Elektroautos verbesserungsfähig. Unsicherheiten bestehen insbesondere im Bereich der Lebensdauer und Herstellungsaufwände der Batterie, im spezifischen Strom- beziehungsweise Treibstoffbedarf im Alltag und im alltäglichen Emissionsverhalten von Diesel- und Benzinautos.

Die aktuell in der Schweiz angebotenen Elektroautos lassen sich grob in zwei Klassen einteilen: Kleinwagen oder untere Mittelklasse mit Renault Zoé bzw. Nissan Leaf und VW e-Golf als typischen Vertretern und Elektroautos der oberen Mittelklasse und der Luxusklasse, zu denen beispielsweise der Tesla Model S gehört.³⁰ Die vorliegende Studie fokussierte auf Autos mit Verbrennungs- oder Elektromotoren der unteren Mittelklasse. Ein Vergleich der Umweltauswirkungen von Autos der oberen Mittelklasse oder der Luxusklasse wäre ebenfalls interessant, hätte den Rahmen der Studie aber gesprengt.

Die Stromerzeugung wurde in der vorliegenden Ökobilanz näherungsweise als statisch angenommen, obwohl sich der Schweizer Verbraucher-Strommix in Zukunft deutlich verändern wird. Die im neuen Energiegesetz gesetzten Ziele sehen einen Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien (Wasserkraft, Windkraft und Photovoltaik) und einen Ausstieg aus der Kernenergie vor. Über die Nutzungsdauer eines Elektroautos können sich somit die Umweltauswirkungen der Stromerzeugung deutlich verändern. Anstelle einer dynamischen Modellierung der prognostizierten Veränderungen des Verbraucher-Strommixes wurde der heutige Strommix für den Betrieb von Elektroautos eingesetzt. Zusätzlich wurden die Umweltauswirkungen des Betriebs von Elektroautos mit alternativen Strommixen in einer Sensitivitätsanalyse untersucht. Daraus lassen sich die Konsequenzen eines zukünftigen Strommixes auf die Umweltbilanz von Elektroautos grob abschätzen.

Batterien werden momentan intensiv erforscht, neue Materialien werden entwickelt und Herstellungsprozesse werden optimiert. Dies führt einerseits zu einer Reduktion des Strombedarfs für die Herstellung von Batteriezellen und zu einem verminderten Einsatz knapper Rohstoffe wie beispielsweise Kobalt. Andererseits wird die Energiedichte von Batterien laufend gesteigert. Diese Entwicklungen werden voraussichtlich zu einer Reduktion der Umweltauswirkungen pro Kilowattstunde Batteriekapazität von zukünftigen Batterien führen. Die hier beschriebene Ökobilanz von Elektroautos beschränkt sich auf heute verfügbare Batterien.

³⁰ <http://www.verbrauchskatalog.ch/>, Zugriff am 8. März 2018

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.
- BAFU 2017 BAFU (2017) Entwicklung der Emissionen von Treibhausgasen seit 1990, retrieved from: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/daten-indikatoren-karten/daten/treibhausgasinventar.html>.
- 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.
- Bauer et al. 2015 Bauer C., Hofer J., Althaus H.-J., Del Duce A. and Simons A. (2015) The environmental performance of current and future passenger vehicles: Life Cycle Assessment based on a novel scenario analysis framework. *In: Applied Energy*, **157**, pp. 871-883, 10.1016/j.apenergy.2015.01.019.
- BFS/ARE 2012 BFS/ARE (2012) Mobilität in der Schweiz: Ergebnisse des Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2010. Bundesamt für Statistik, Bundesamt für Raumentwicklung, Neuchâtel, Bern, retrieved from: <http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/11/07/01/02/05.html>.
- BMVI 2015 BMVI B. f. V. u. d. I. (2015) Bewertung der Praxistauglichkeit und Umweltwirkungen von Elektrofahrzeugen – Zwischenbericht.
- Boulouchos 2011 Boulouchos K. (2011) Mobilität der Zukunft: Herausforderungen, Optionen und Transformationspfade. In: *2. Schweizer Forum Elektromobilität* (ed. Mobilitätsakademie), Verkehrshaus Luzern.
- Bundesamt für Statistik / Bundesamt für Raumentwicklung 2017 Bundesamt für Statistik / Bundesamt für Raumentwicklung (2017) Verkehrsverhalten der Bevölkerung. Ergebnisse des Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2015, Neuchâtel und Bern.
- Del Duce et al. 2016 Del Duce A., Gauch M. and Althaus H.-J. (2016) Electric passenger car transport and passenger car life cycle inventories in ecoinvent version 3. *In: International Journal of Life Cycle Assessment*, **24**(9), pp. 1314-1326, doi: 10.1007/s11367-014-0792-4.
- 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 2014 ecoinvent Centre (2014) ecoinvent data v3.1. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Zürich, Switzerland, retrieved from: www.ecoinvent.org.
- Ellingsen et al. 2014 Ellingsen L. A.-W., Majeau-Bettez G., Singh B., Kumar Srivastava A., Valøen L. O. and Hammer Strømman A. (2014) Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack. *In: Journal of Industrial Ecology*, **18**(1), pp. 113-124, DOI: 10.1111/jiec.12072.

- 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. 2007a Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.-J., Doka G., Dones R., Heck T., Hellweg S., Hischer R., Nemecek T., Rebitzer G. and Spielmann M. (2007a) Overview and Methodology. ecoinvent report No. 1, v2.0. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH, retrieved from: www.ecoinvent.org.
- Frischknecht et al. 2007b Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.-J., Bauer C., Doka G., Dones R., Hellweg S., Hischer R., Humbert S., Margni M. and Nemecek T. (2007b) 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.
- 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.
- 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.
- Frischknecht & Büsser Knöpfel 2013 Frischknecht R. and Büsser Knöpfel S. (2013) Ökofaktoren Schweiz 2013 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit. Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz. Umwelt-Wissen Nr. 1330. Bundesamt für Umwelt, Bern, retrieved from: <http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01750/index.html?lang=de>.
- Frischknecht 2014 Frischknecht R. (2014) Umweltaspekte von Elektroautos, Ein Argumentarium. treeze, Uster.
- Frischknecht et al. 2015 Frischknecht R., Wyss F., Buesser S., Lützkendorf T. and Balouktsi M. (2015) Cumulative energy demand in LCA: the energy harvested approach. *In: Int J LCA*, **20**(7), pp. 957-969, DOI: 10.1007/s11367-015-0897-4.
- Frischknecht et al. 2016 Frischknecht R., Messmer A., Stolz P. and Tuchschnid M. (2016) mobitool - Grundlagenbericht. Hintergrund, Methodik & Emissionsfaktoren. Schweizerische Bundesbahnen SBB, Bundesamt für Energie BFE, Swisscom, Öbu, Bern, retrieved from: http://www.mobitool.ch/typo_static/fileadmin/tools/mobitool-Hintergrundbericht.pdf.
- Habermacher & Hellweg 2011 Habermacher F. and Hellweg S. (2011) Modeling Material Inventories and Environmental Impacts of Electric Passenger Cars. ETH Zürich, Zürich.
- Helms et al. 2016 Helms H., Julius J., Claudia K., Giegrich J., Liebich A., Vogt R. and Lambrecht U. (2016) Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen. Umweltbundesamt.
- Horst et al. 2009 Horst J., Frey G. and Leprich U. (2009) Auswirkungen von Elektroautos auf den Kraftwerkspark und die CO₂-Emissionen in Deutschland. WWF Deutschland, Frankfurt am Main.
- ICCT 2017 ICCT (2017) FROM LABORATORY TO ROAD. A 2017 update of official and "real-world" fuel consumption and CO₂ values for passenger cars in Europe. The International Council on Clean Transportation.
- INFRAS 2014 INFRAS (2014) HBEFA Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs, Version 3.2, Bern, CH.
- IPCC 2013 IPCC (2013) The IPCC fifth Assessment Report - Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Working Group I, IPCC Secretariat, Geneva, Switzerland.
- Jakob et al. 2009 Jakob M., Volkart K. and D. W. (2009) CO₂-Intensität des Stromabsatzes an Schweizer Kunden. TEP Energy GmbH, Zürich.

- Jungbluth et al. 2007 Jungbluth N., Chudacoff M., Dauriat A., Dinkel F., Doka G., Faist Emmenegger M., Gnansounou E., Kljun N., Schleiss K., Spielmann M., Stettler C. and Sutter J. (2007) Life Cycle Inventories of Bioenergy. ecoinvent report No. 17, v2.0. ESU-services, Uster, CH, retrieved from: www.ecoinvent.org.
- KBOB et al. 2016 KBOB, eco-bau and IPB (2016) KBOB Ökobilanzdatenbestand DQRv2:2016; Grundlage für die KBOB-Empfehlung 2009/1:2016: Ökobilanzdaten im Baubereich, Stand 2016. Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren c/o BBL Bundesamt für Bauten und Logistik, retrieved from: www.lc-inventories.ch.
- Ligterink & Smokers 2016 Ligterink N. E. and Smokers R. T. M. (2016) Monitoring van plug-in hybride voertuigen (PHEVs) april 2012 t/m maart 2016. TNO, Delft.
- 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.
- Messmer & Frischknecht 2016 Messmer A. and Frischknecht R. (2016) Umweltbilanz Strommix Schweiz 2014. treeze Ltd., Uster.
- 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.
- Romare & Dahllöf 2017 Romare M. and Dahllöf L. (2017) The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries. IVL Swedish Environmental Research Institute, Stockholm.
- Stolz et al. 2016 Stolz P., Messmer A. and Frischknecht R. (2016) Life Cycle Inventories of Road and Non-Road Transport Services. treeze Ltd., Uster CH.
- Stolz & Frischknecht 2017 Stolz P. and Frischknecht R. (2017) Energieetikette für Personenwagen: Umweltkennwerte 2017 der Strom- und Treibstoffbereitstellung. treeze Ltd., Uster, CH.
- Suh 2010 Suh S. (2010) CEDA 4.0 User's Guide. Bren School of Environmental Science and Management, University of California, Santa Barbara.
- swissgrid 2016 swissgrid (2016) Cockpit Stromkennzeichnung Schweiz, Stand Mai 2016. Swissgrid AG, Zürich.
- USGS 2016 USGS (2016) Lithium. In: *Minerals Yearbook Volume 1, Metals and Minerals*. pp. 100-101. U.S. Geological Survey, U.S. Department of the Interior, Reston, Virginia, United States of America retrieved from: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/>.
- VCS 2015 VCS (2015) Auto Umweltliste 2015, März 2015. VCS Verkehrsclub der Schweiz.
- VCS 2017 VCS (2017) Auto Umweltliste 2017, März 2017. VCS Verkehrsclub der Schweiz.
- 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 Energieressourcen, 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-_{eq} 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 Frischknecht¹, Hans-Jörg Althaus², Roberto Dones³, Roland Hischier², Niels Jungbluth⁴, Thomas Nemecek³, Alex Primas⁵, Gregor Wernet⁷

¹ecoinvent Centre, Empa, Überlandstrasse 129, 8600 Dübendorf, Switzerland
²Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research (Empa), ³Paul Scherrer Institute (PSI),
⁴ESU-services Ltd., ⁵Agroscope Reckenholz-Tänikon Research Station (ART),
⁶Baerle & Hofmann, ⁷Swiss 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:

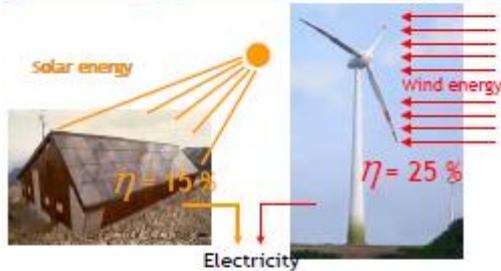
Renewable energy *harvested* is the key information from a total energy demand perspective leading to best achievable consistency.

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 MJ-eq/MJ_{IN}

Conclusions

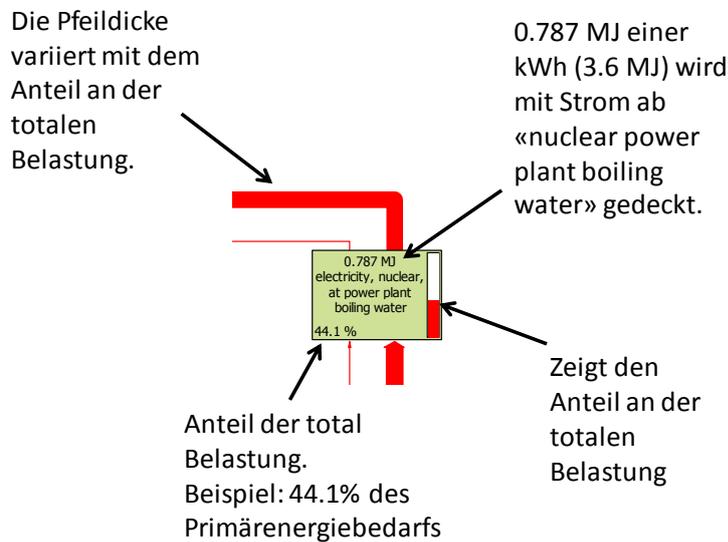
- Consistent modelling of energy resource input
- "Amount harvested" is most sensible and practical

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 2013) 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 Analysen wurden mit SimaPro v8.4.0 durchgeführt und basieren auf dem KBOB Ökobilanzdatenbestand DQRv2:2016.

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

In der folgenden Grafik werden die verschiedenen Komponenten der Flussdiagramme erklärt:



Produktionsmix Schweiz

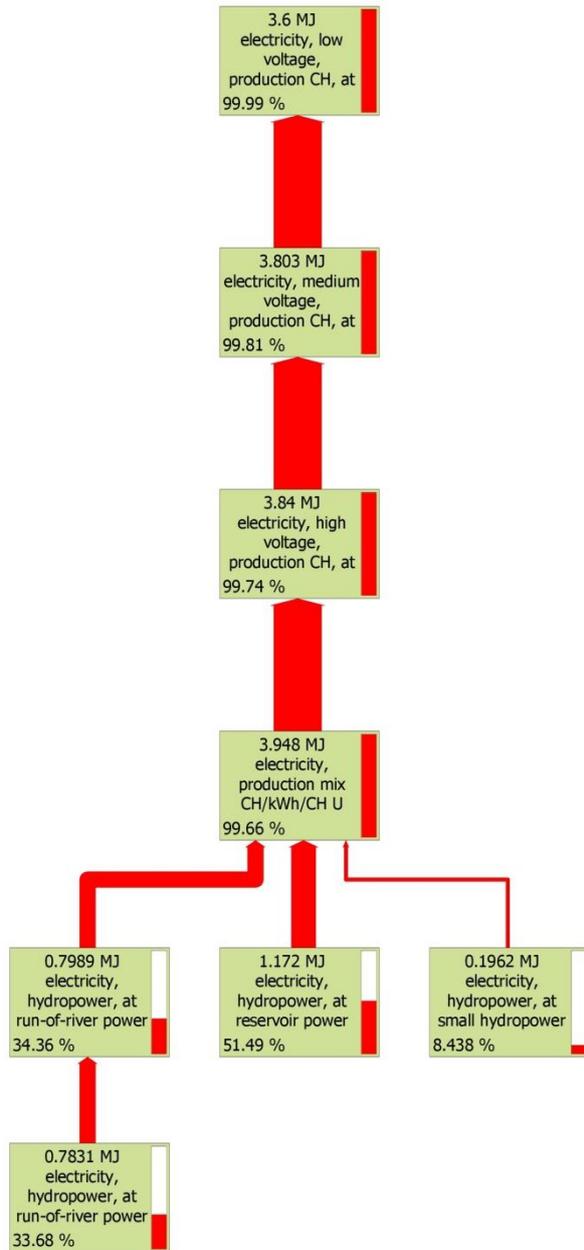


Abbildung A 1 Herkunft Kumulierter Energieaufwand, erneuerbar, Produktionsmix Schweiz

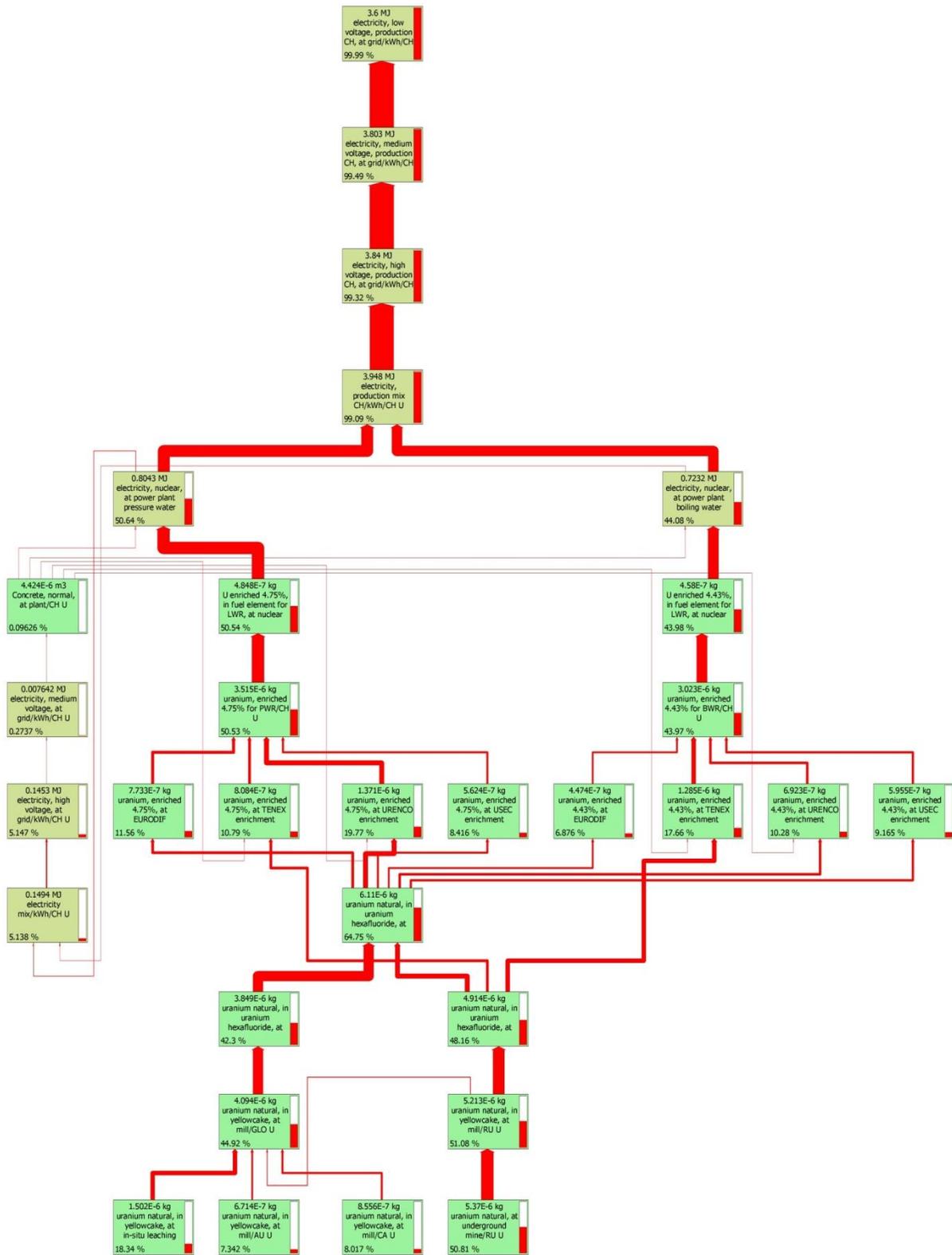


Abbildung A 2 Herkunft Kumulierter Energieaufwand, nicht erneuerbar, Produktionsmix Schweiz

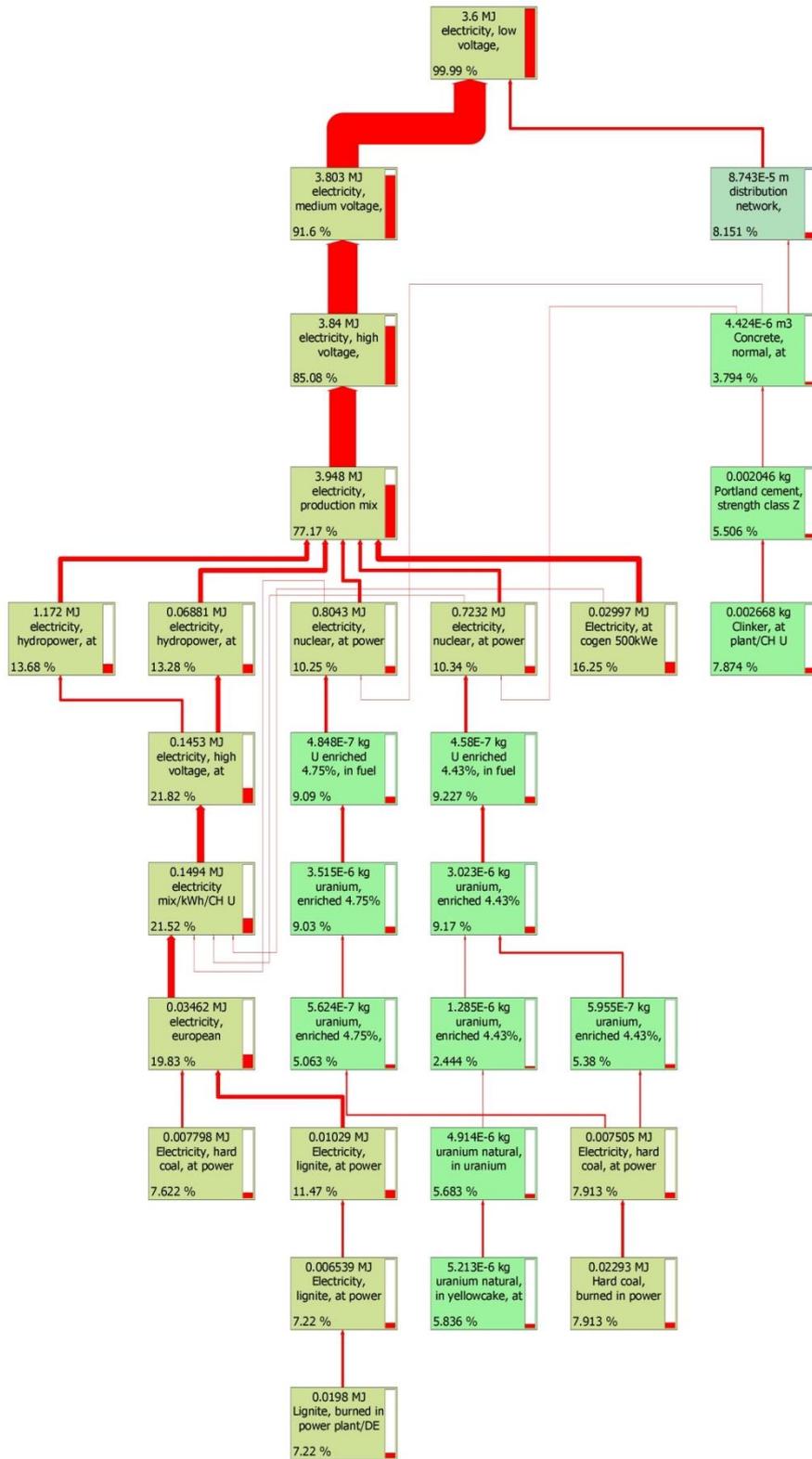


Abbildung A 3 Herkunft Treibhausgas-Emissionen, Produktionsmix Schweiz

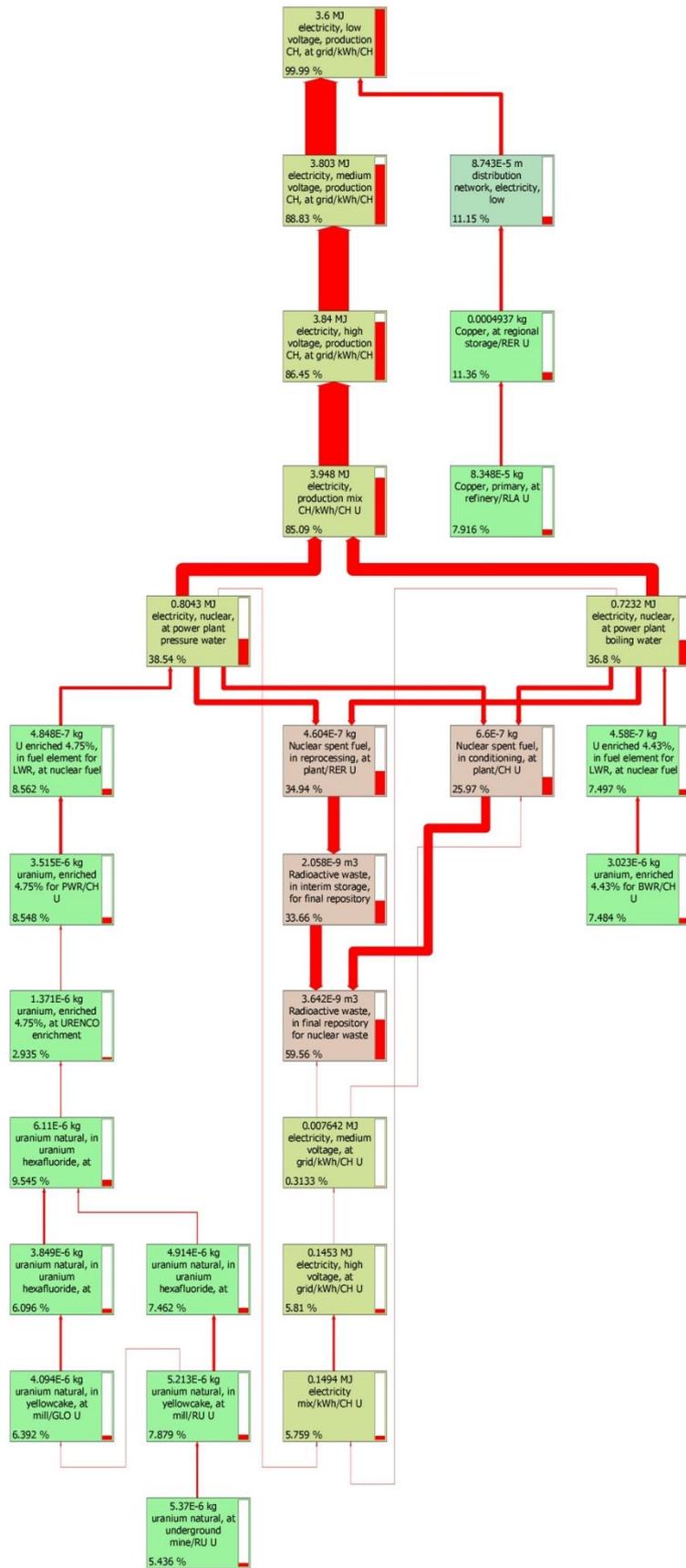


Abbildung A 4 Herkunft Umweltbelastung (Methode der ökologischen Knappheit 2013), Produktionsmix Schweiz

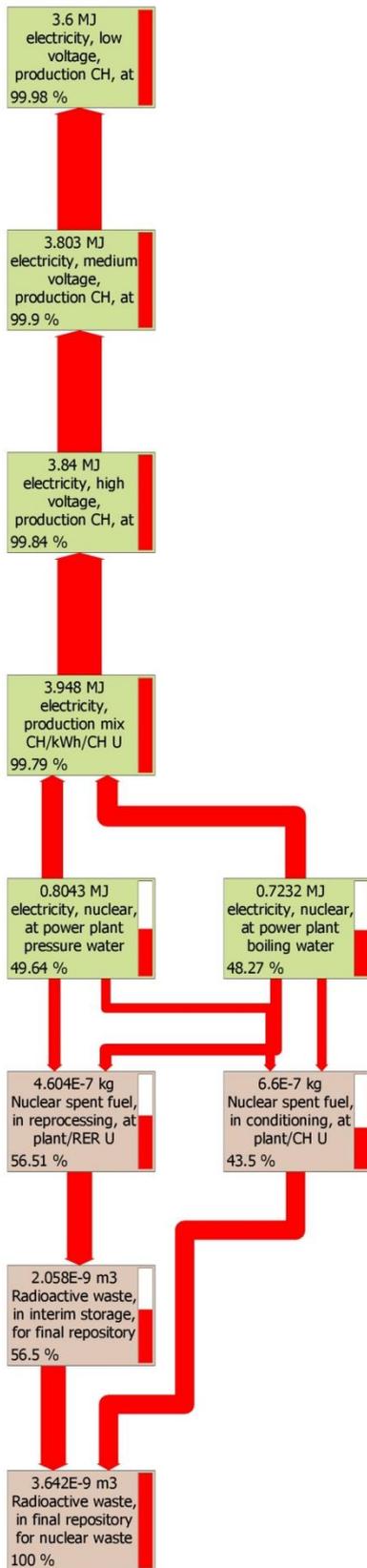


Abbildung A 5 Herkunft radioaktive Abfälle, Produktionsmix Schweiz

Verbrauchermix Schweiz (exkl. Anteil zertifizierter Strom)

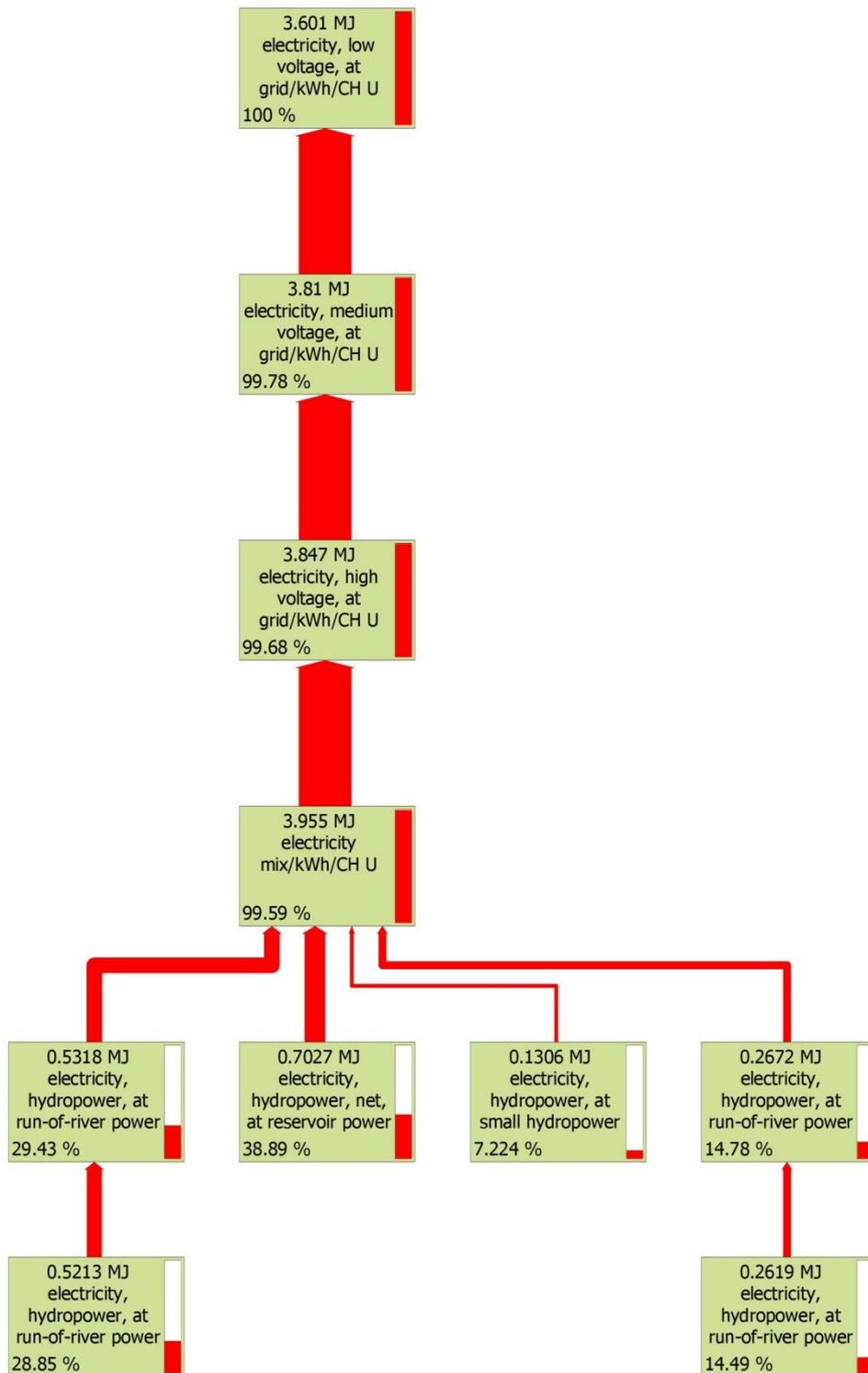


Abbildung A 6 Herkunft Kumulierter Energieaufwand, erneuerbar, Verbrauchermix Schweiz

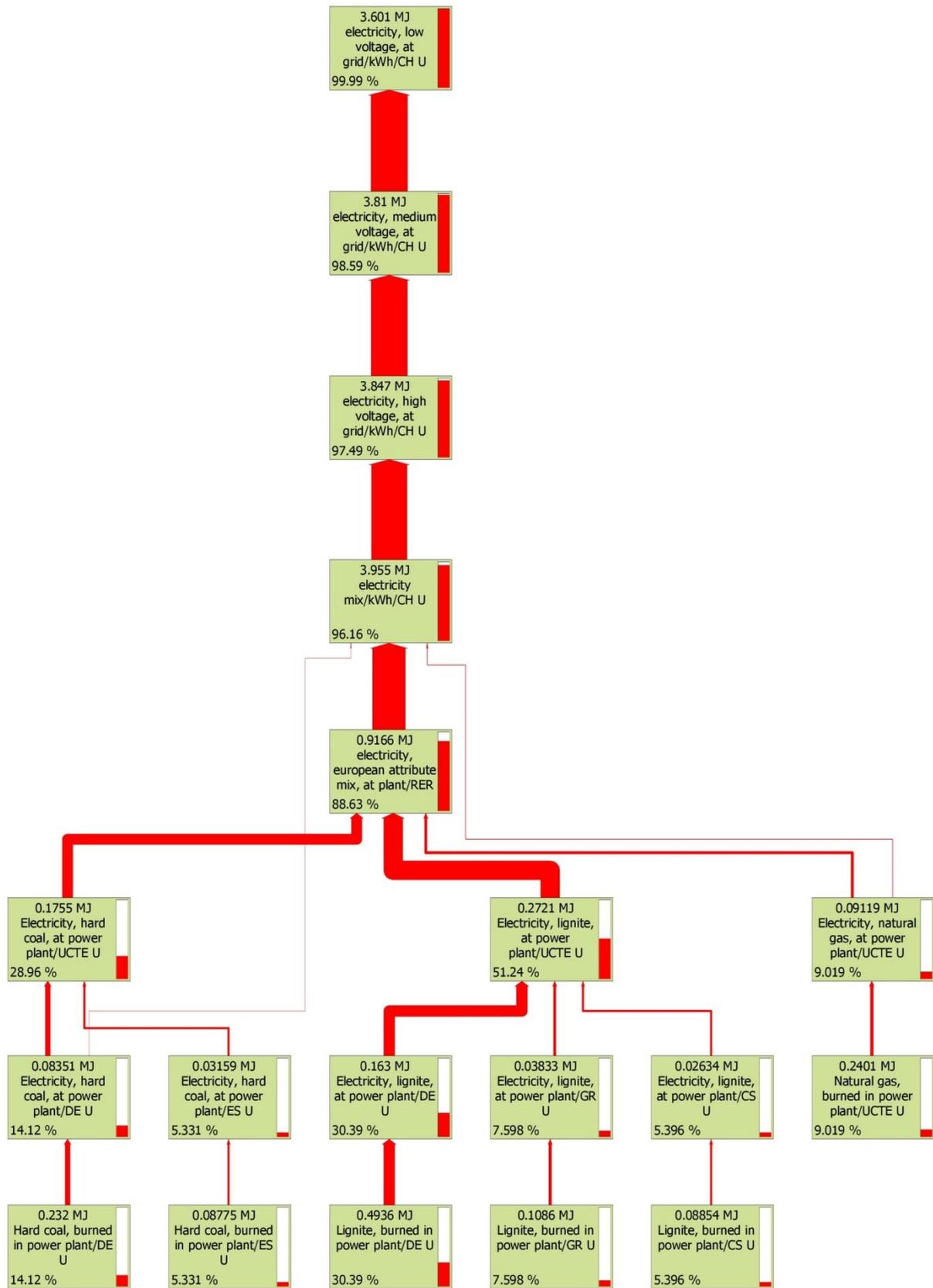


Abbildung A 8 Herkunft Treibhausgas-Emissionen, Verbrauchermix Schweiz

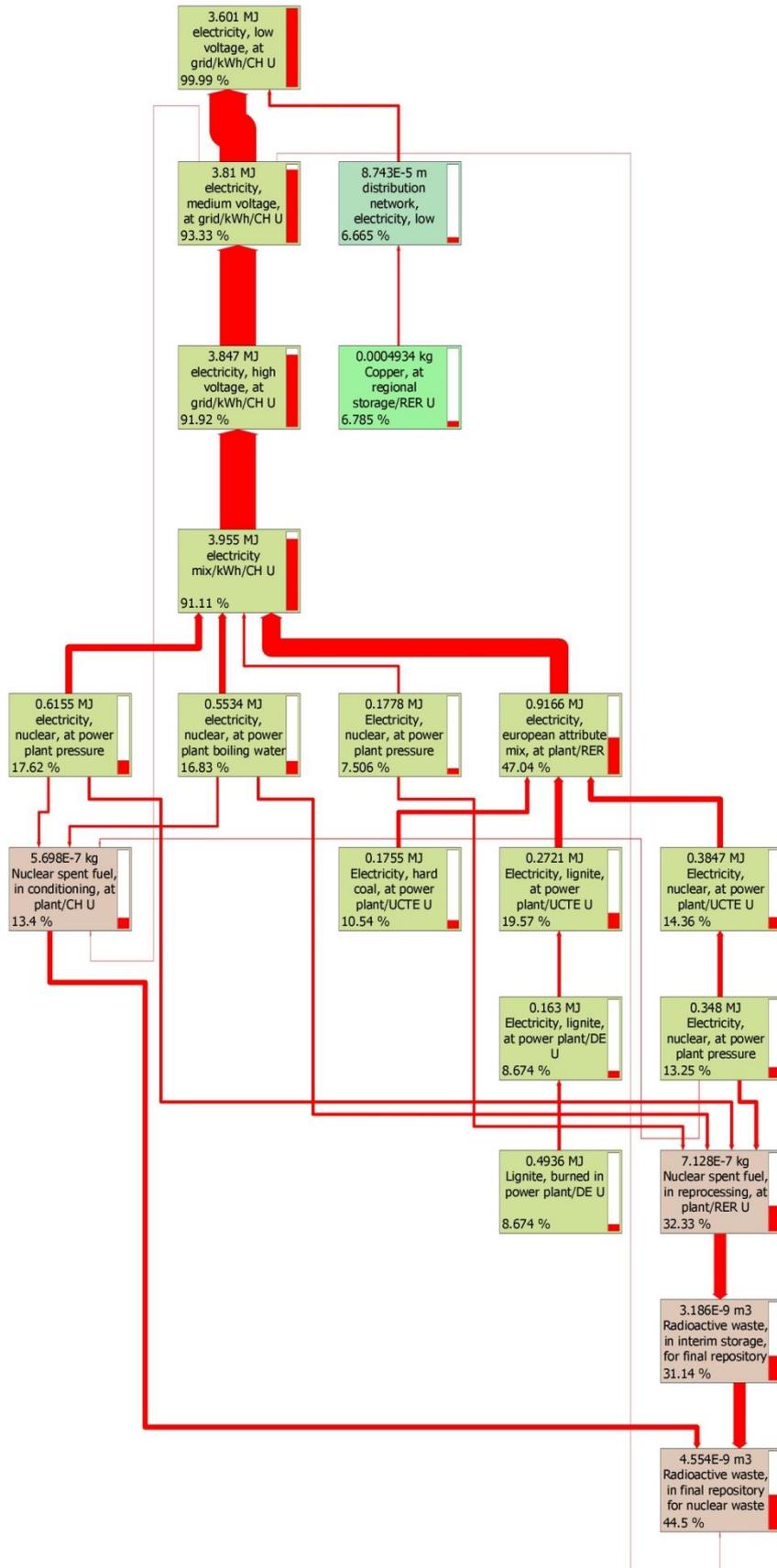


Abbildung A 9 Herkunft Umweltbelastung (Methode der ökologischen Knappheit 2013), Verbrauchermix Schweiz

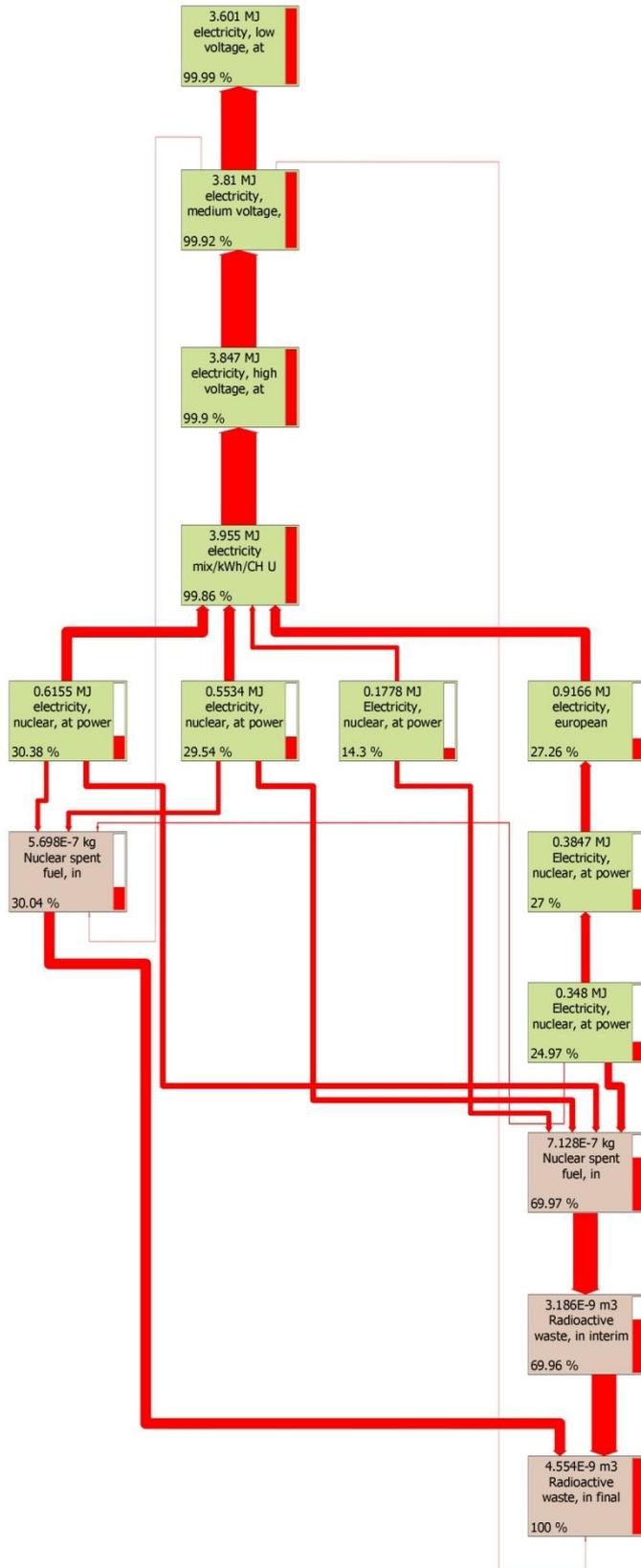


Abbildung A 10 Herkunft radioaktive Abfälle, Verbrauchermix Schweiz

Zertifizierter Strommix Schweiz

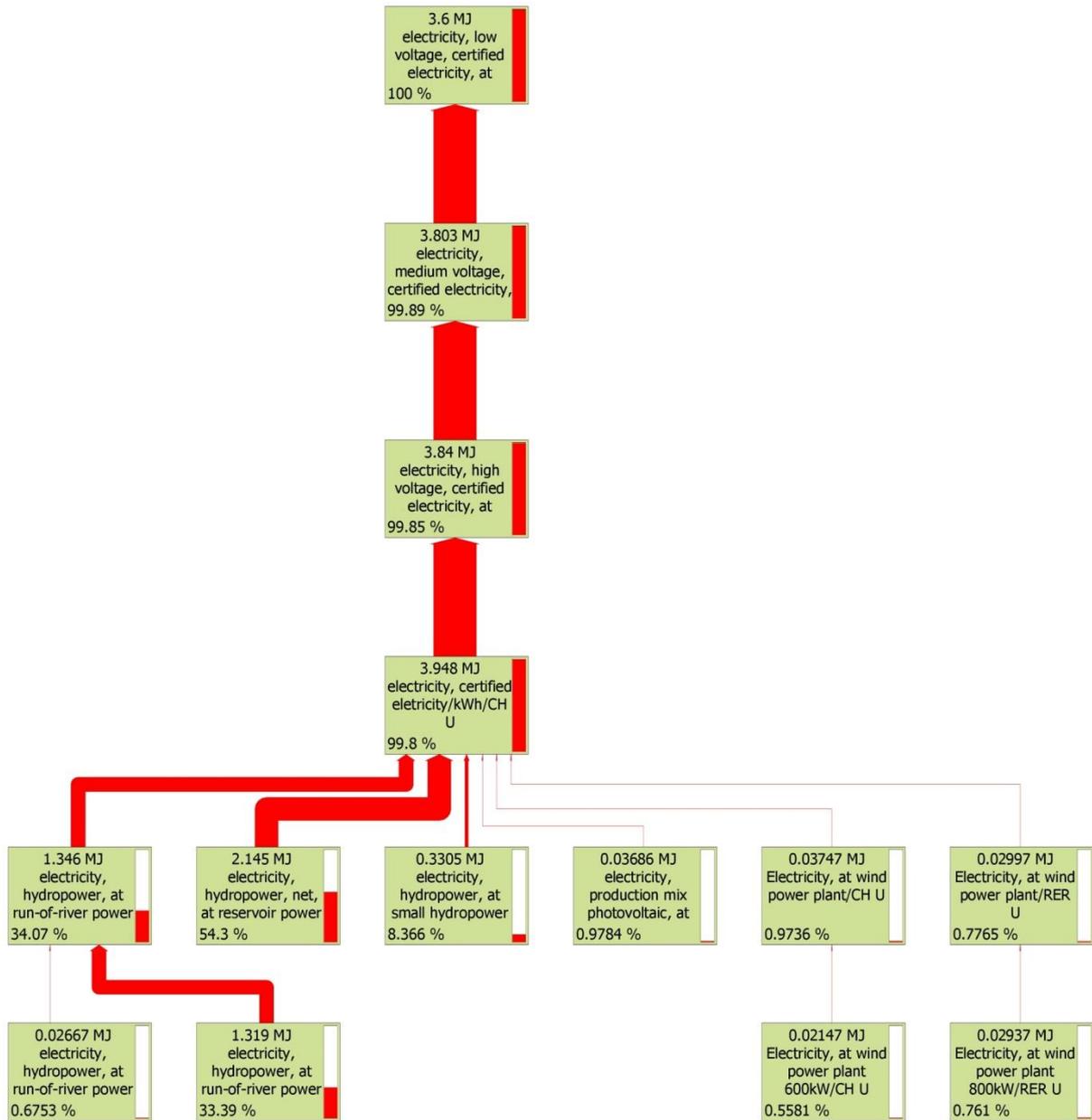


Abbildung A 11 Herkunft Kumulierter Energieaufwand, erneuerbar, Zertifizierter Strommix Schweiz; Abschneidekriterium 0.5%

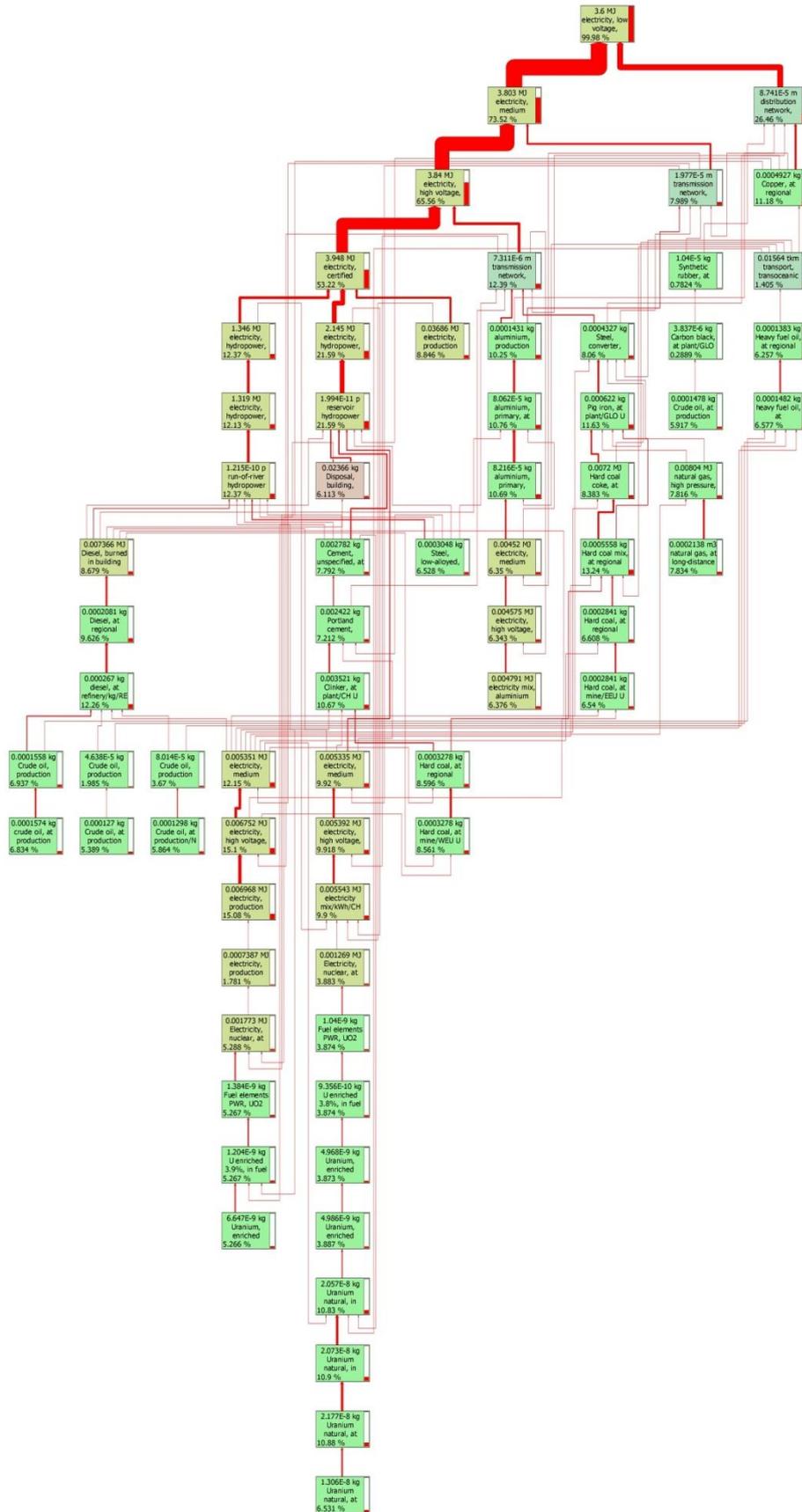


Abbildung A 12 Herkunft Kumulierter Energieaufwand, nicht erneuerbar, Zertifizierter Strommix Schweiz

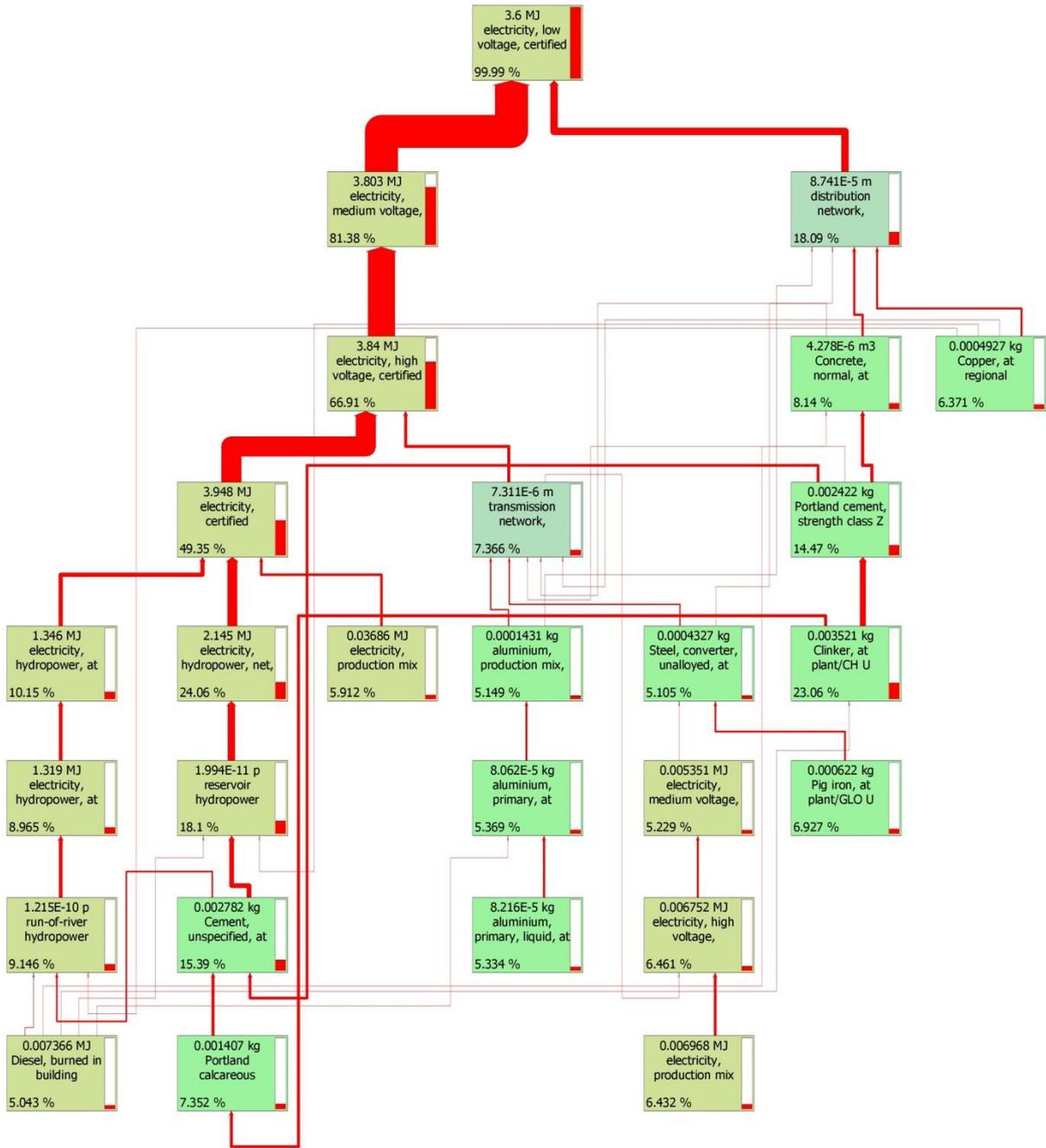


Abbildung A 13 Herkunft Treibhausgas-Emissionen, Zertifizierter Strommix Schweiz

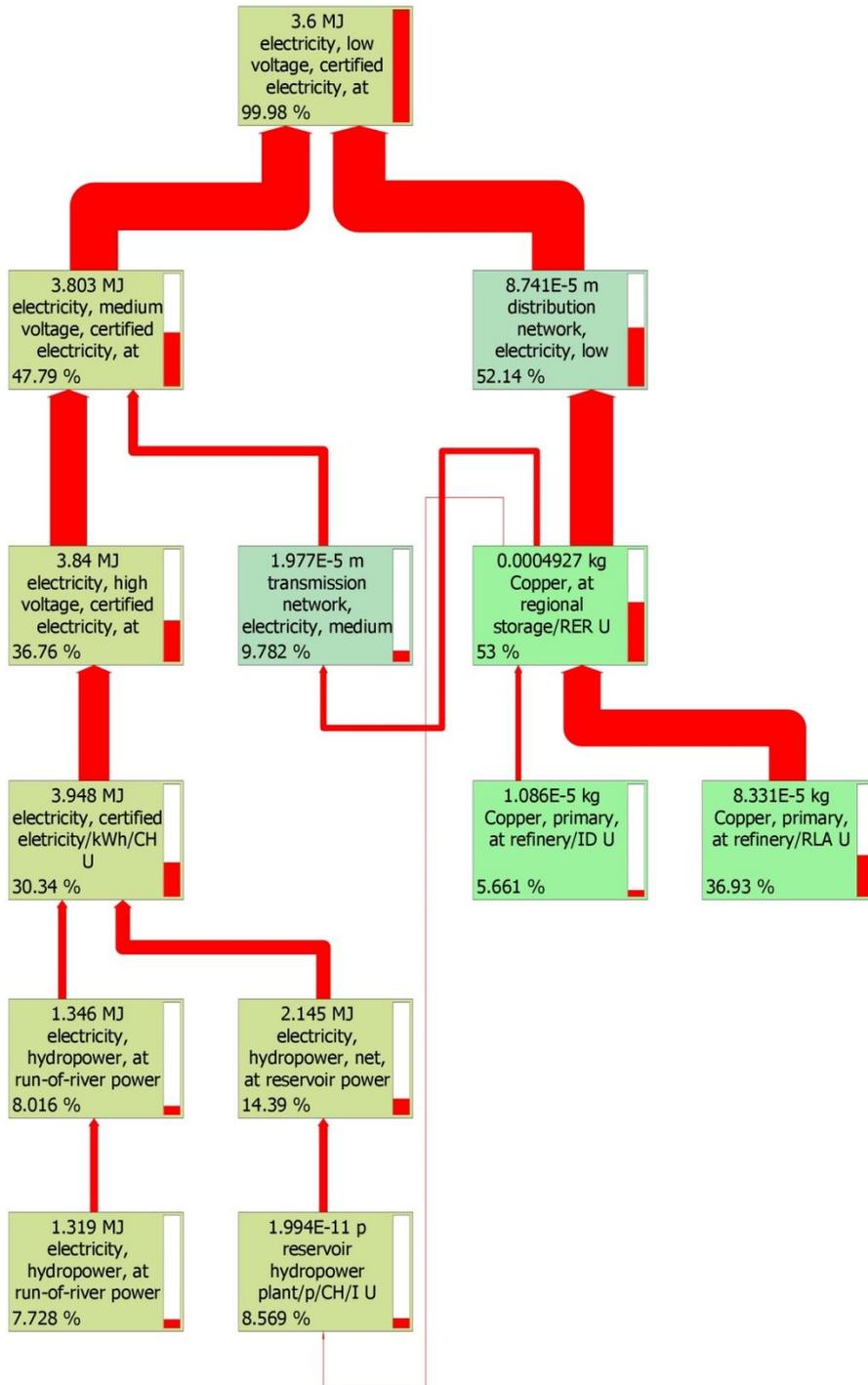


Abbildung A 14 Herkunft Umweltbelastung (Methode der ökologischen Knappheit 2013), Zertifizierter Strommix Schweiz

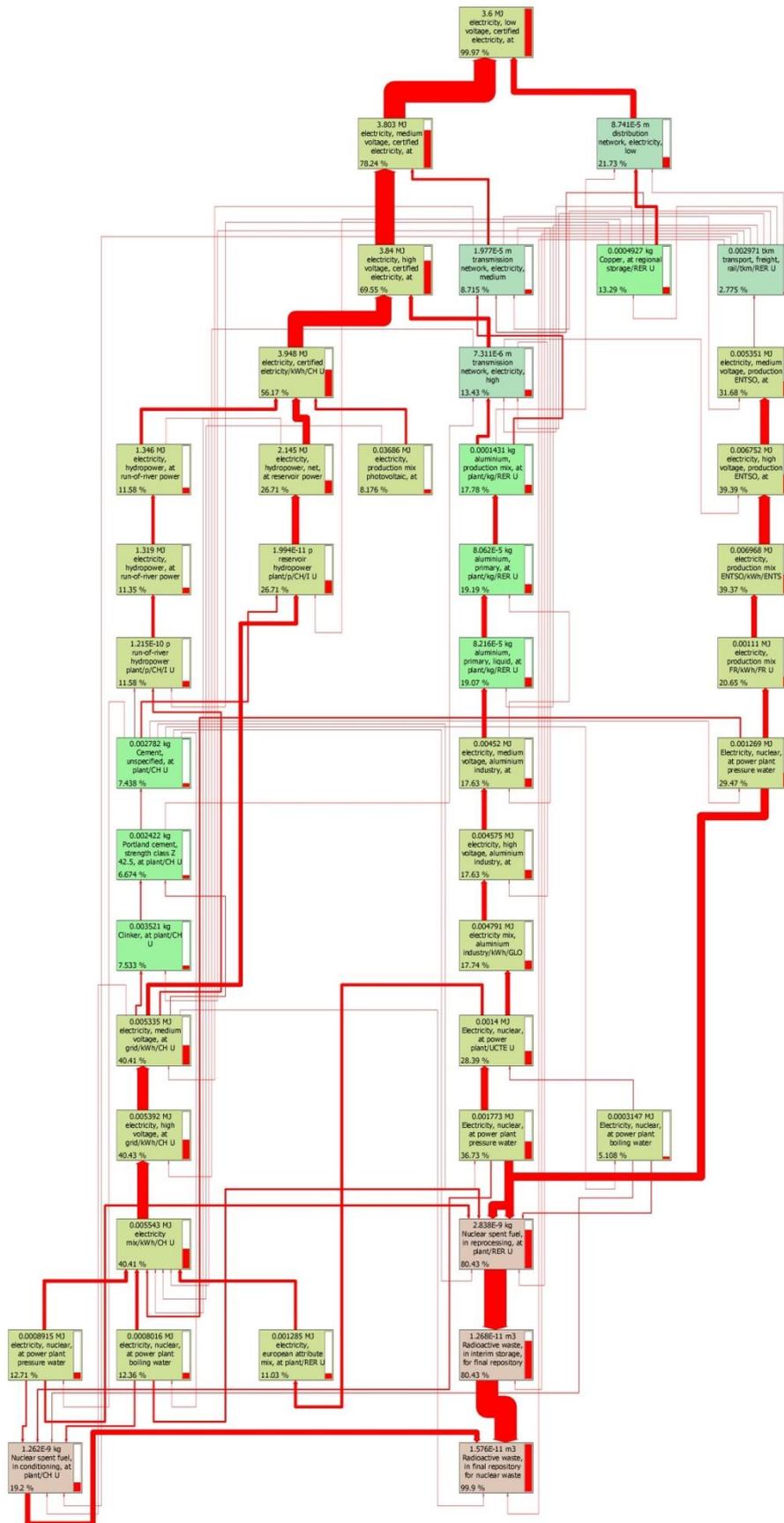


Abbildung A 15 Herkunft radioaktive Abfälle, Zertifizierter Strommix Schweiz

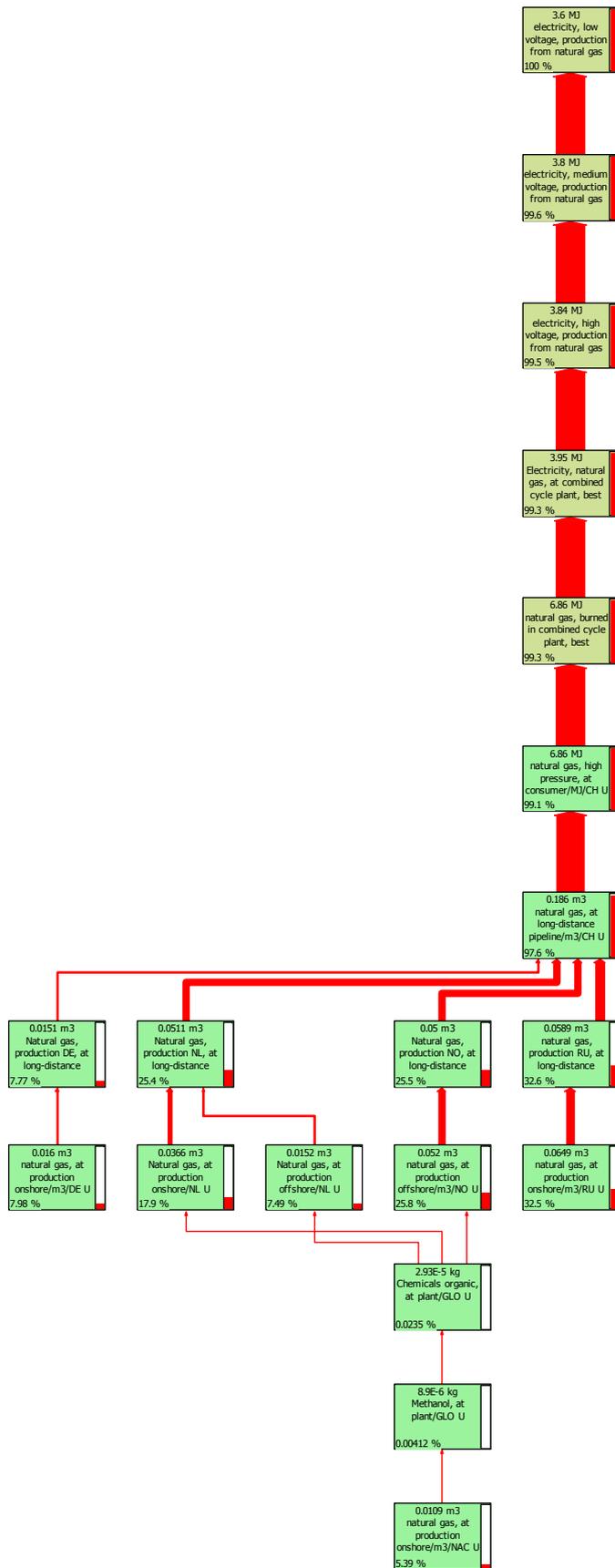


Abbildung A 17 Herkunft Kumulierter Energieaufwand, nicht erneuerbar, GuD Kraftwerk

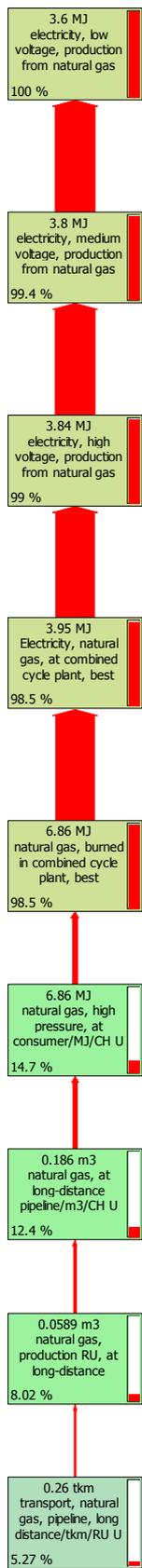


Abbildung A 18 Herkunft Treibhausgas-Emissionen, GuD Kraftwerk

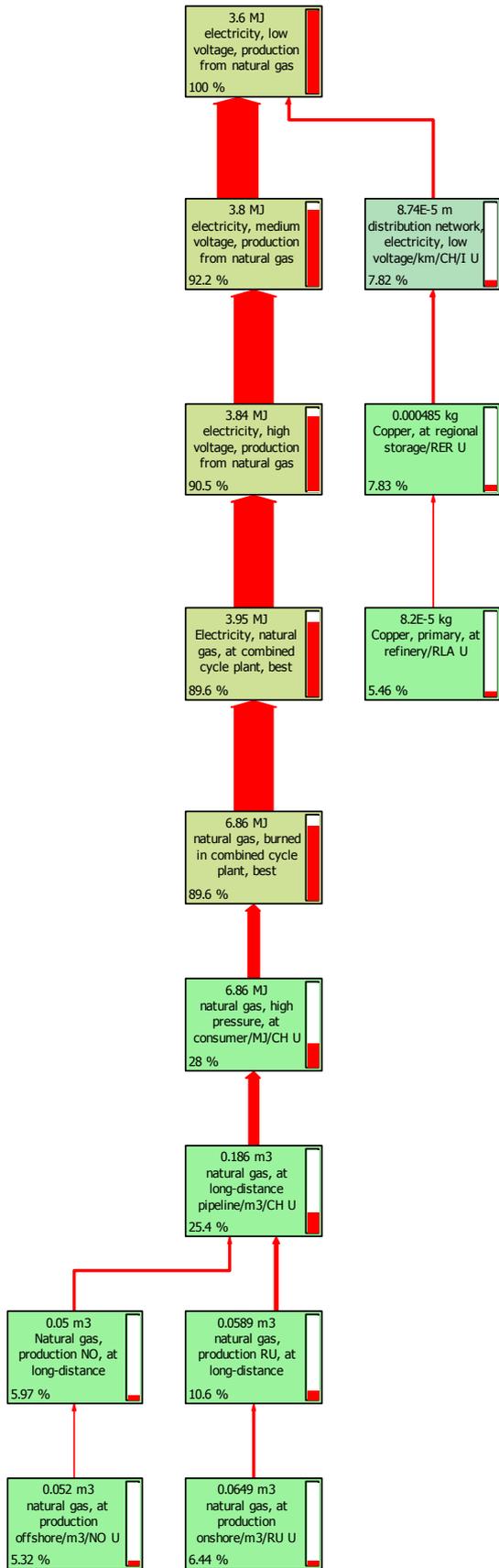


Abbildung A 19 Herkunft Umweltbelastung (Methode der ökologischen Knappheit 2013), GuD Kraftwerk

Steinkohlekraftwerk Deutschland

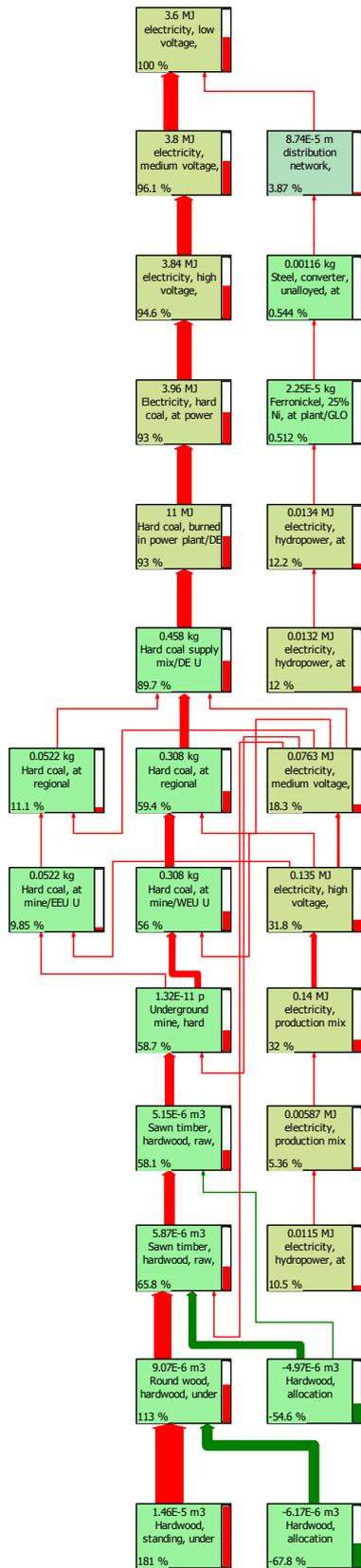


Abbildung A 21 Herkunft Kumulierter Energieaufwand, erneuerbar, Steinkohlekraftwerk Deutschland

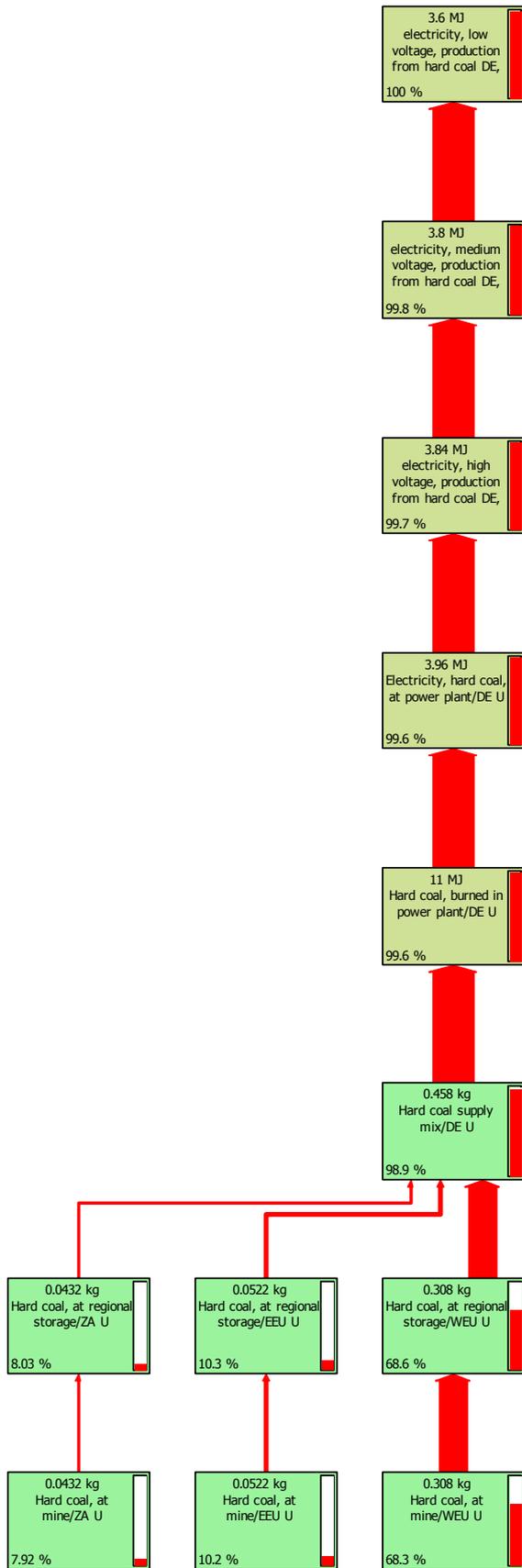


Abbildung A 22 Herkunft Kumulierter Energieaufwand, nicht erneuerbar, Steinkohlekraftwerk Deutschland

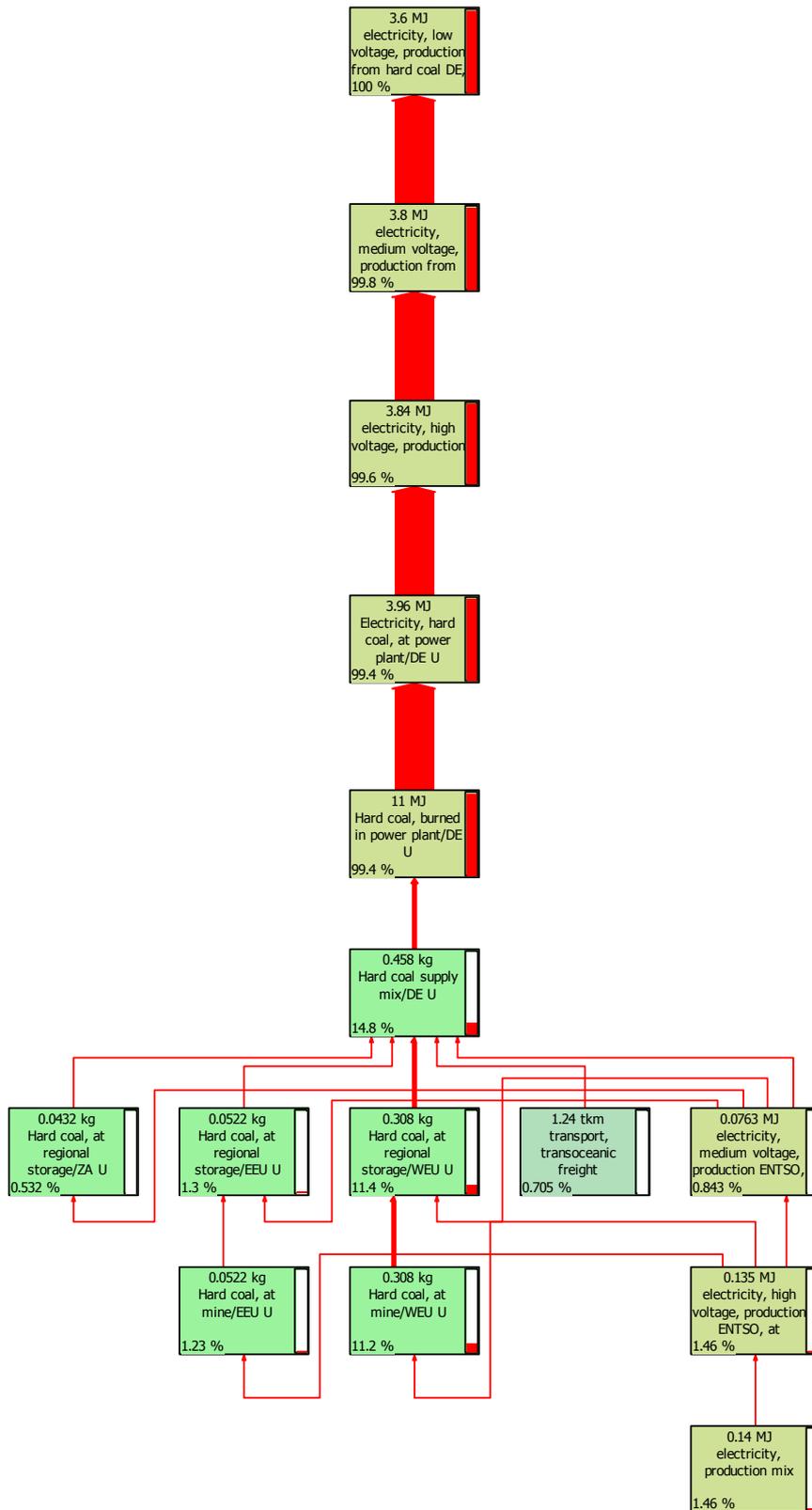


Abbildung A 23 Herkunft Treibhausgas-Emissionen, Steinkohlekraftwerk Deutschland, Abschneidekriterium 0.5 %

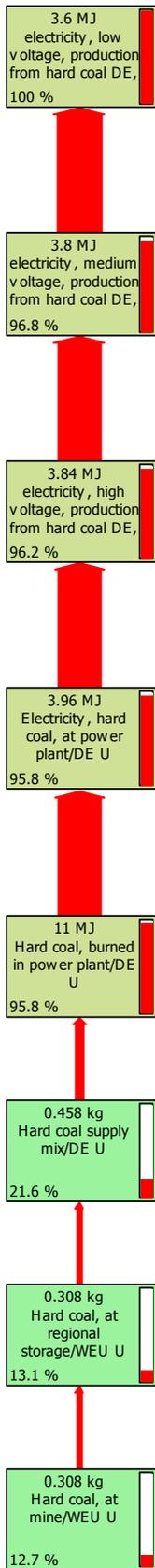


Abbildung A 24 Herkunft Umweltbelastung (Methode der ökologischen Knappheit 2013), Steinkohlekraftwerk Deutschland

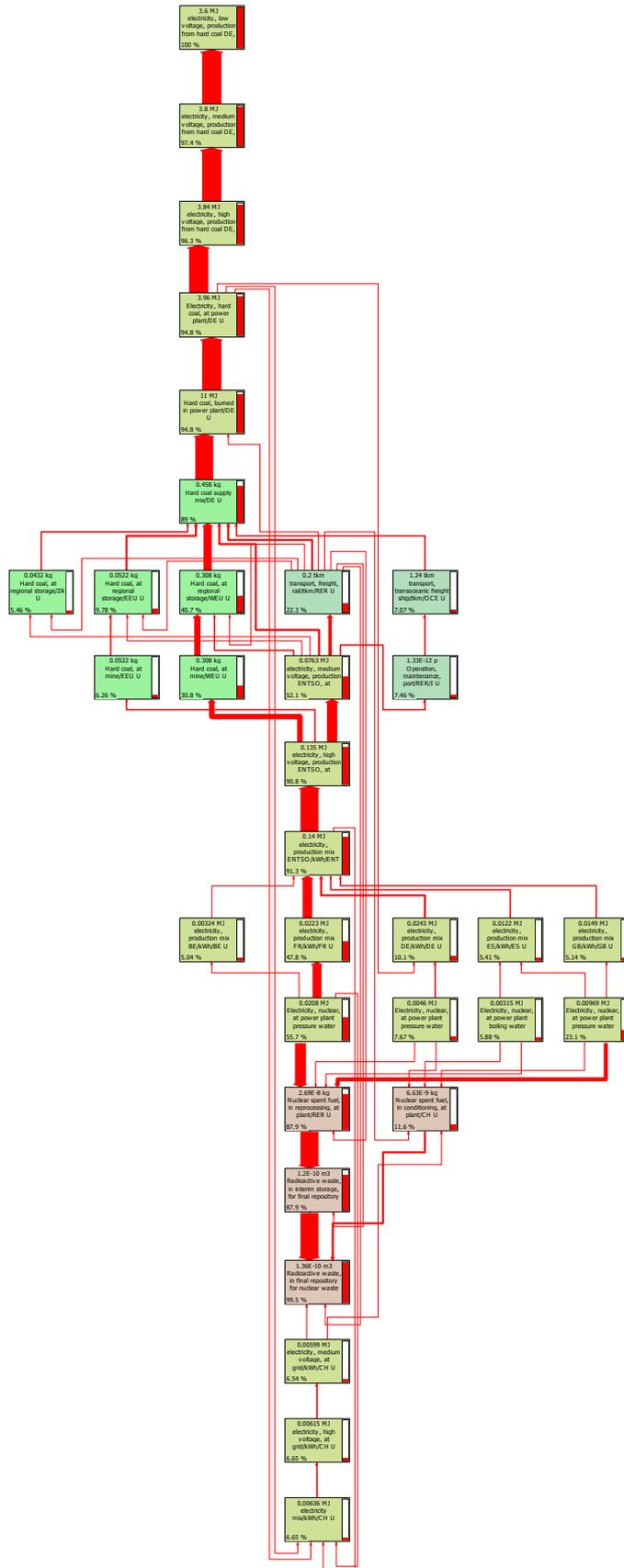


Abbildung A 25 Herkunft radioaktive Abfälle, Steinkohlekraftwerk Deutschland

Kernkraftwerk Schweiz

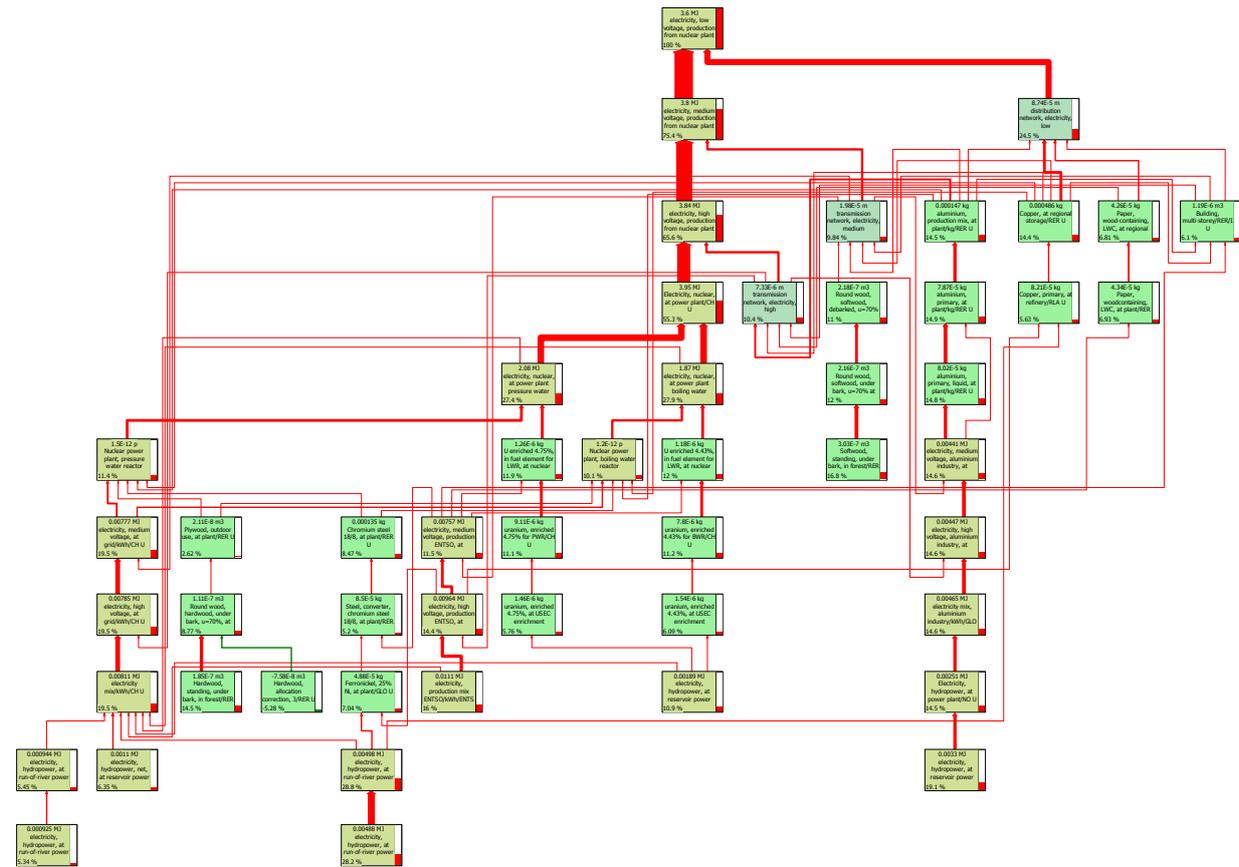


Abbildung A 26 Herkunft Kumulierter Energieaufwand, erneuerbar, Kernkraftwerk Schweiz

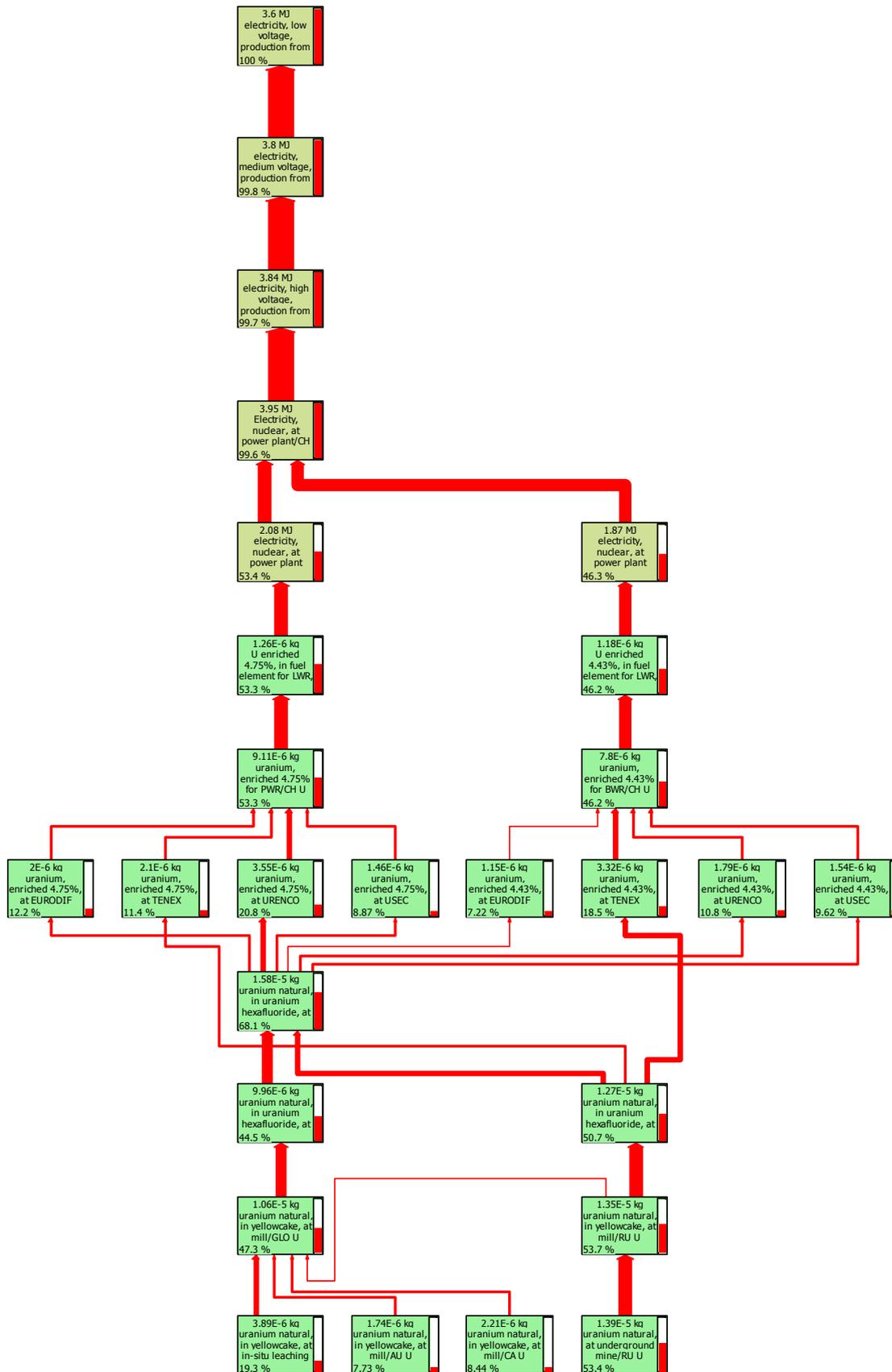


Abbildung A 27 Herkunft Kumulierter Energieaufwand, nicht erneuerbar, Kernkraftwerk Schweiz

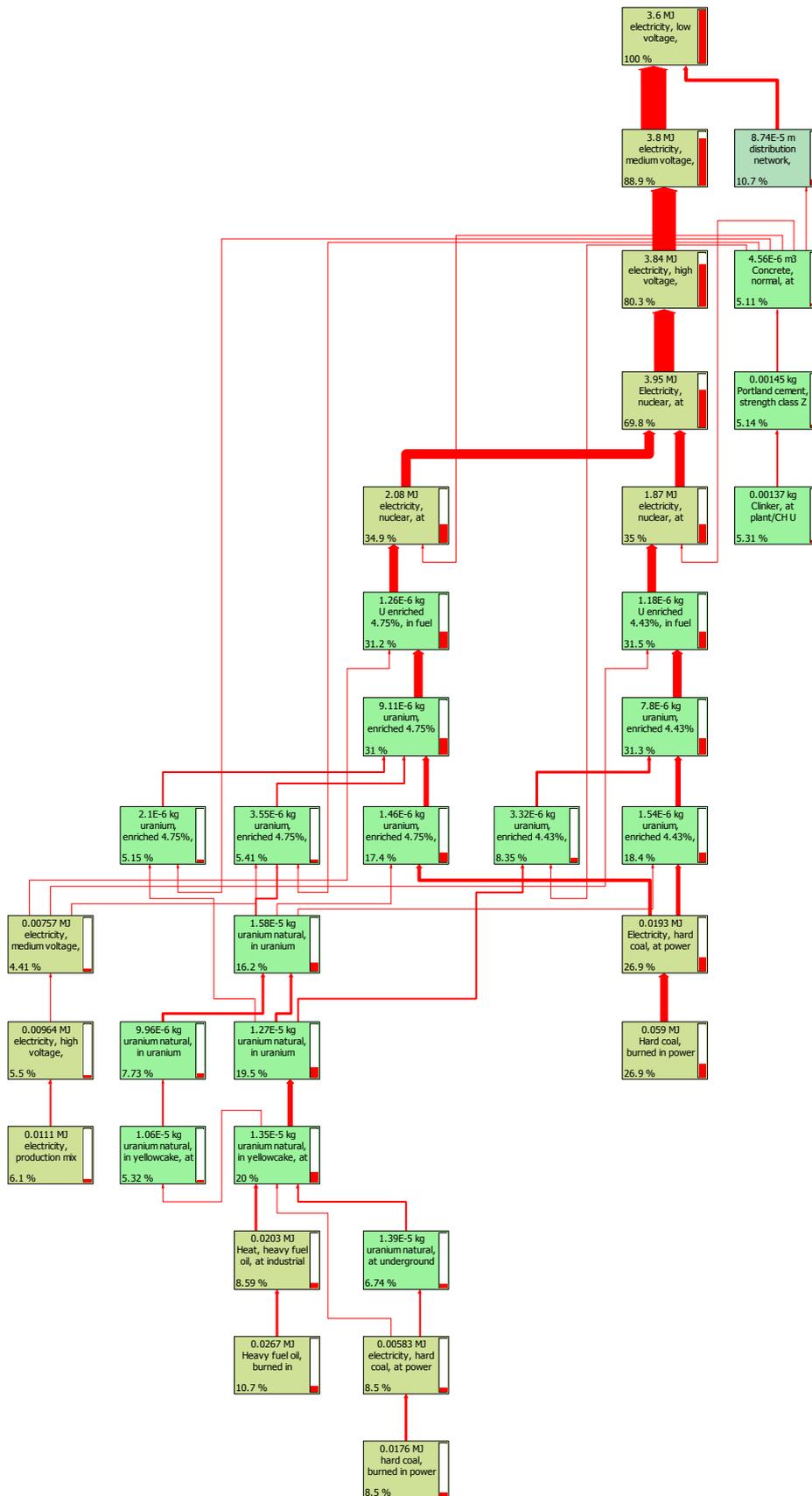


Abbildung A 28 Herkunft Treibhausgas-Emissionen, Kernkraftwerk Schweiz

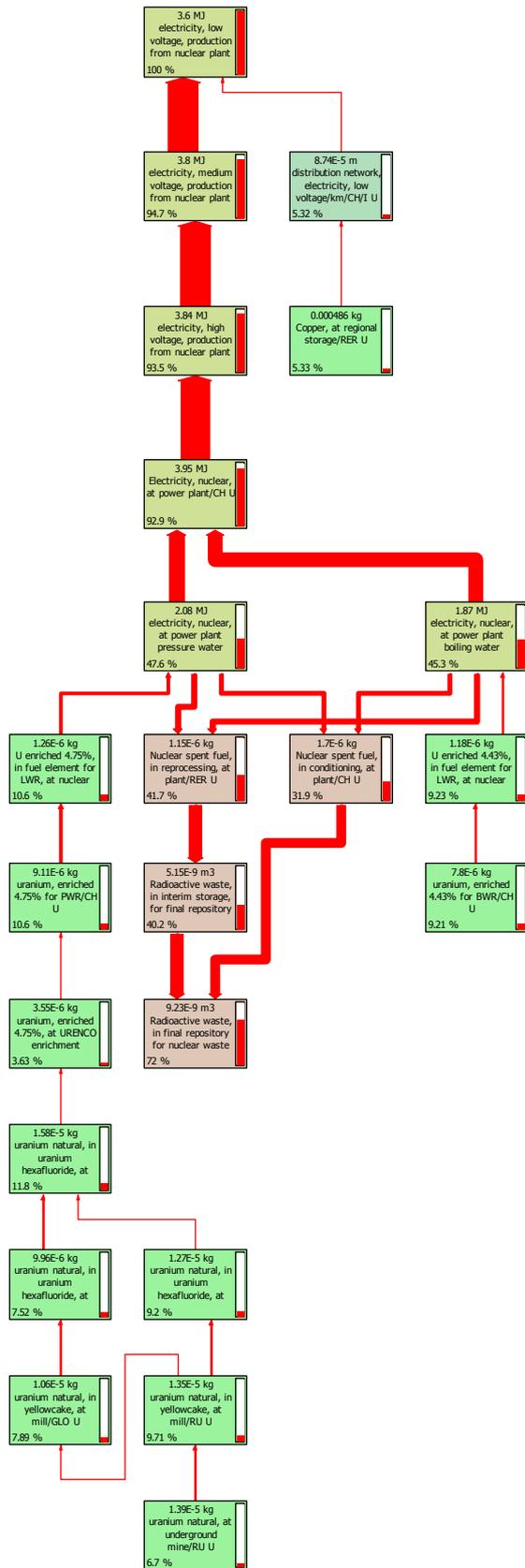


Abbildung A 29 Herkunft Umweltbelastung (Methode der ökologischen Knappheit 2013), Kernkraftwerk Schweiz

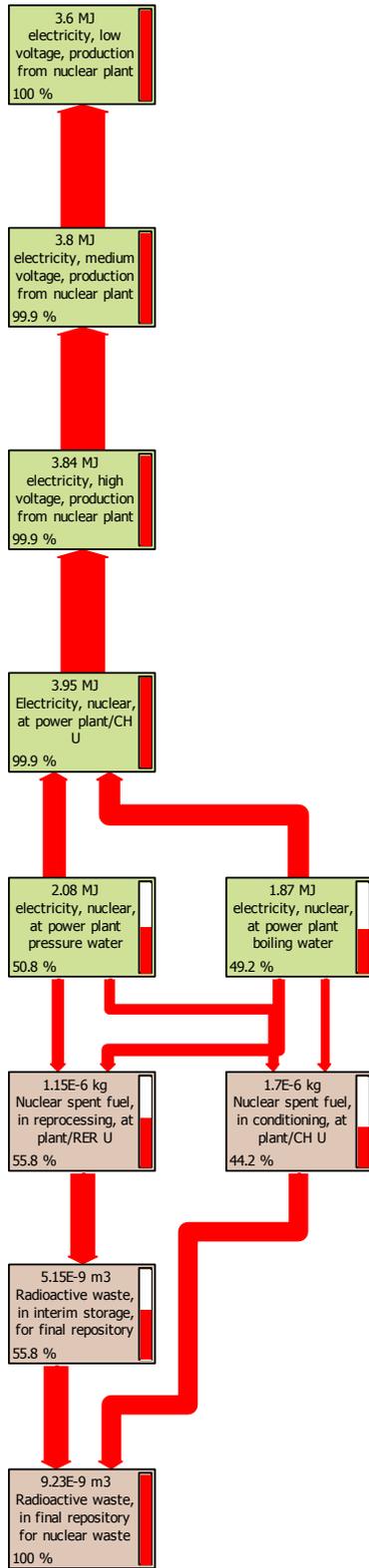


Abbildung A 30 Herkunft radioaktive Abfälle, Kernkraftwerk Schweiz

Windkraftwerk Schweiz

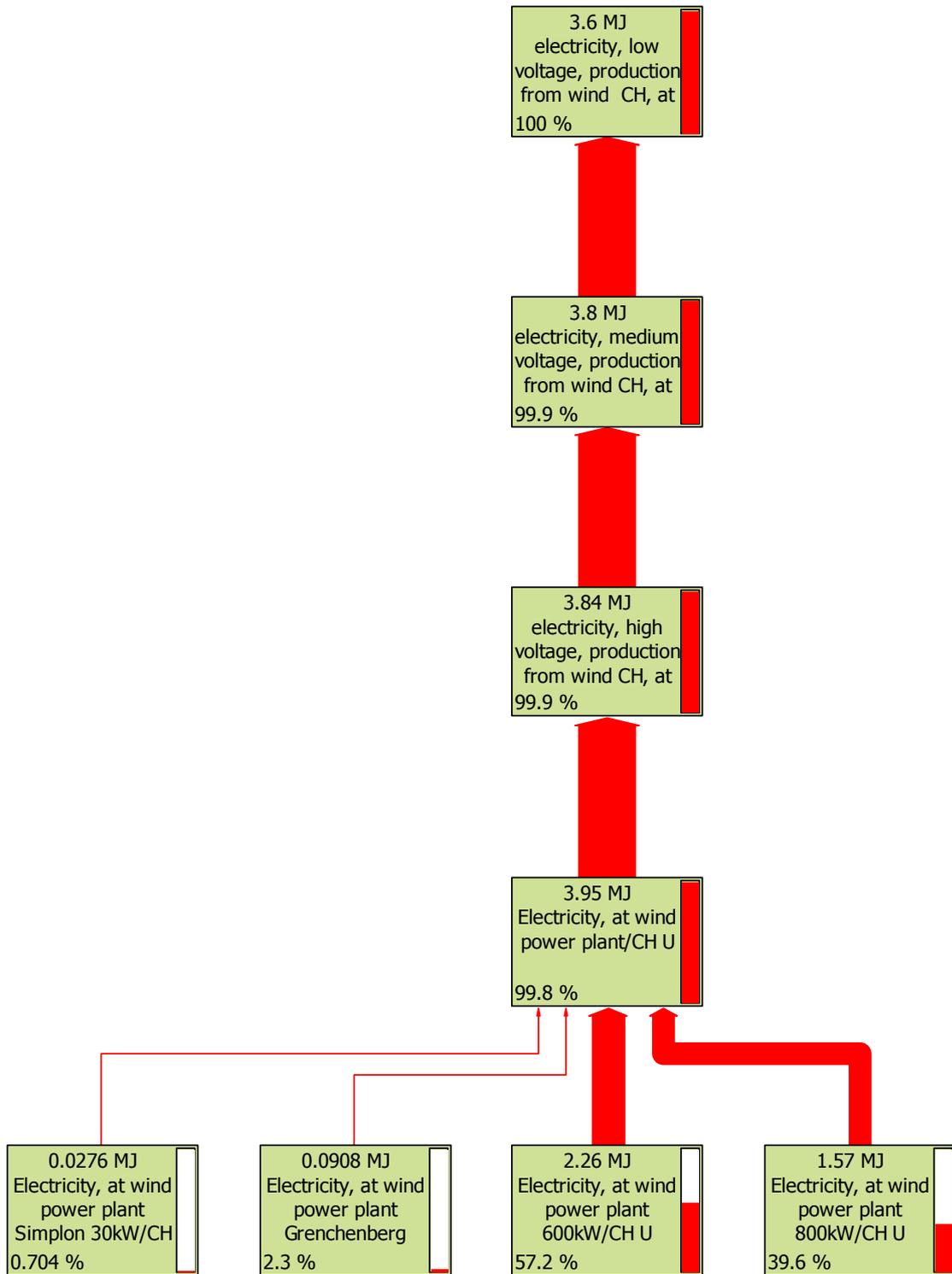


Abbildung A 31 Herkunft Kumulierter Energieaufwand, erneuerbar, Windkraftwerk Schweiz, Abschneidekriterium 0.5 %

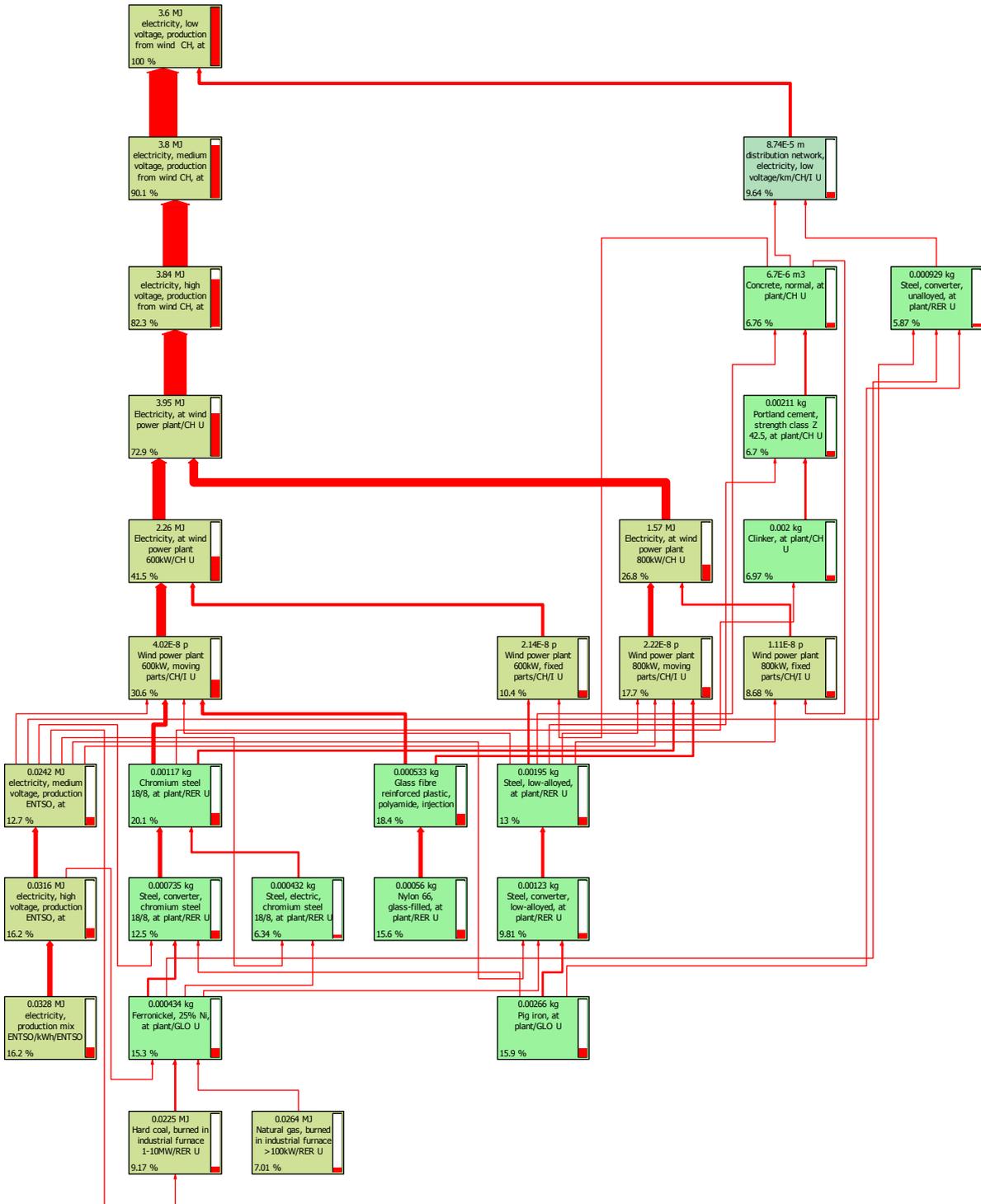


Abbildung A 33 Herkunft Treibhausgas-Emissionen, Windkraftwerk Schweiz

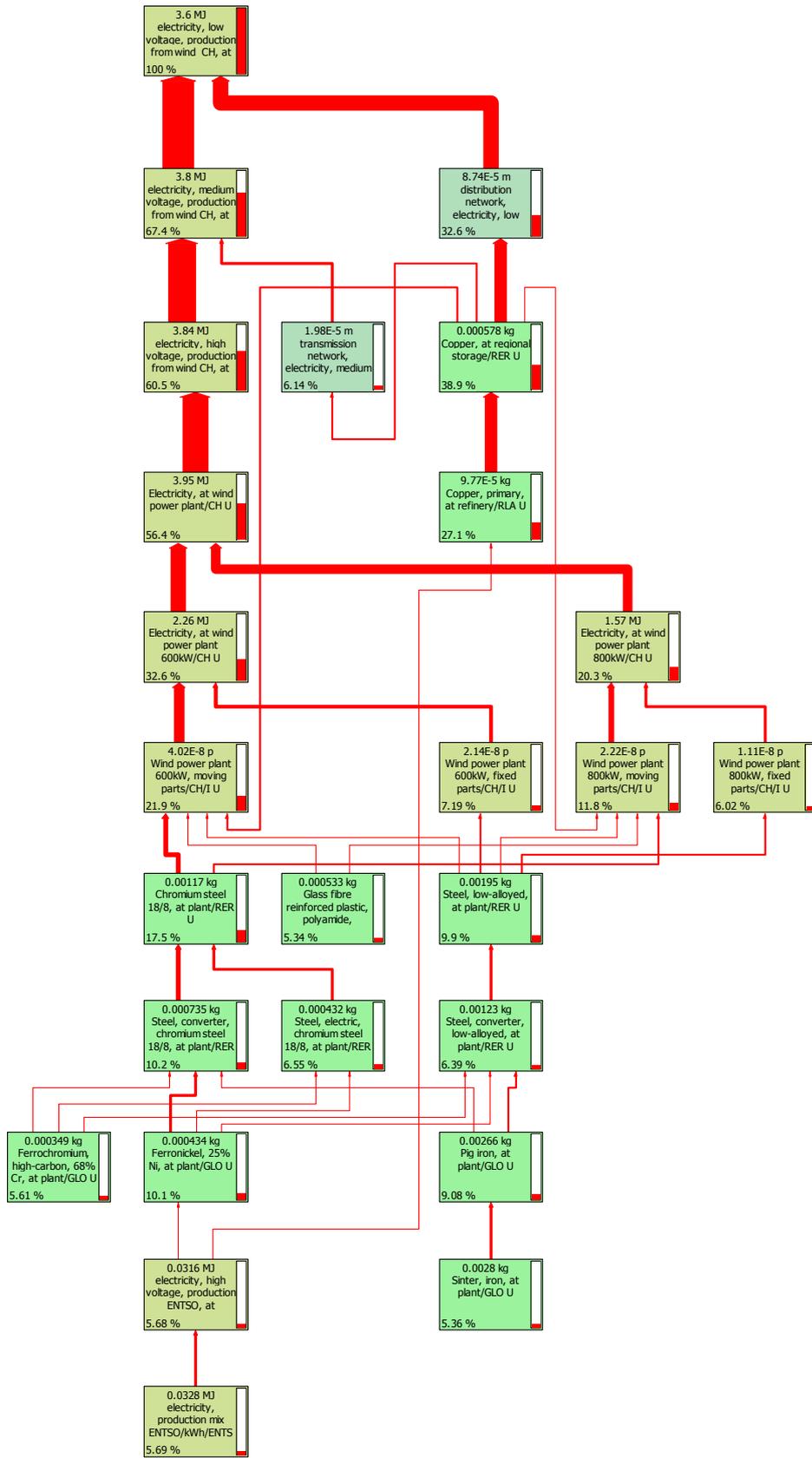


Abbildung A 34 Herkunft Umweltbelastung (Methode der ökologischen Knappheit 2013), Windkraftwerk Schweiz

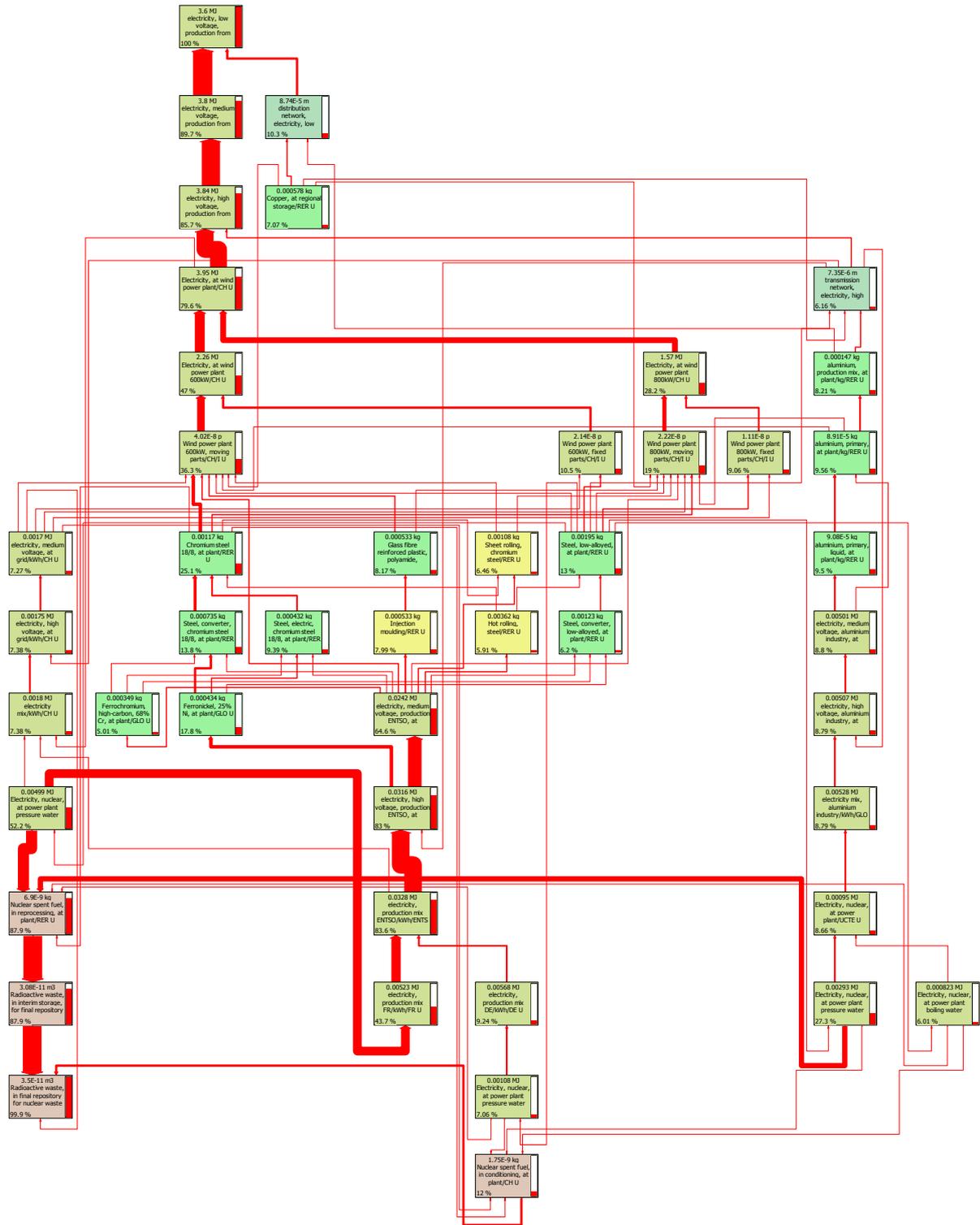


Abbildung A 35 Herkunft radioaktive Abfälle, Windkraftwerk Schweiz

Photovoltaik Schweiz

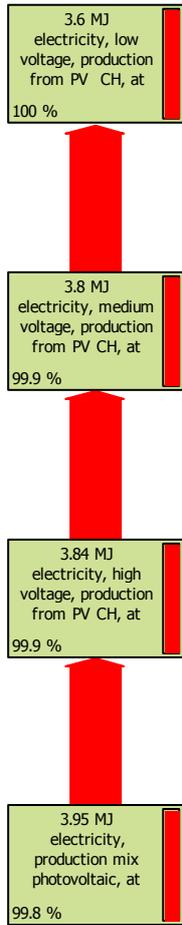


Abbildung A 36 Herkunft Kumulierter Energieaufwand, erneuerbar, Photovoltaik Schweiz

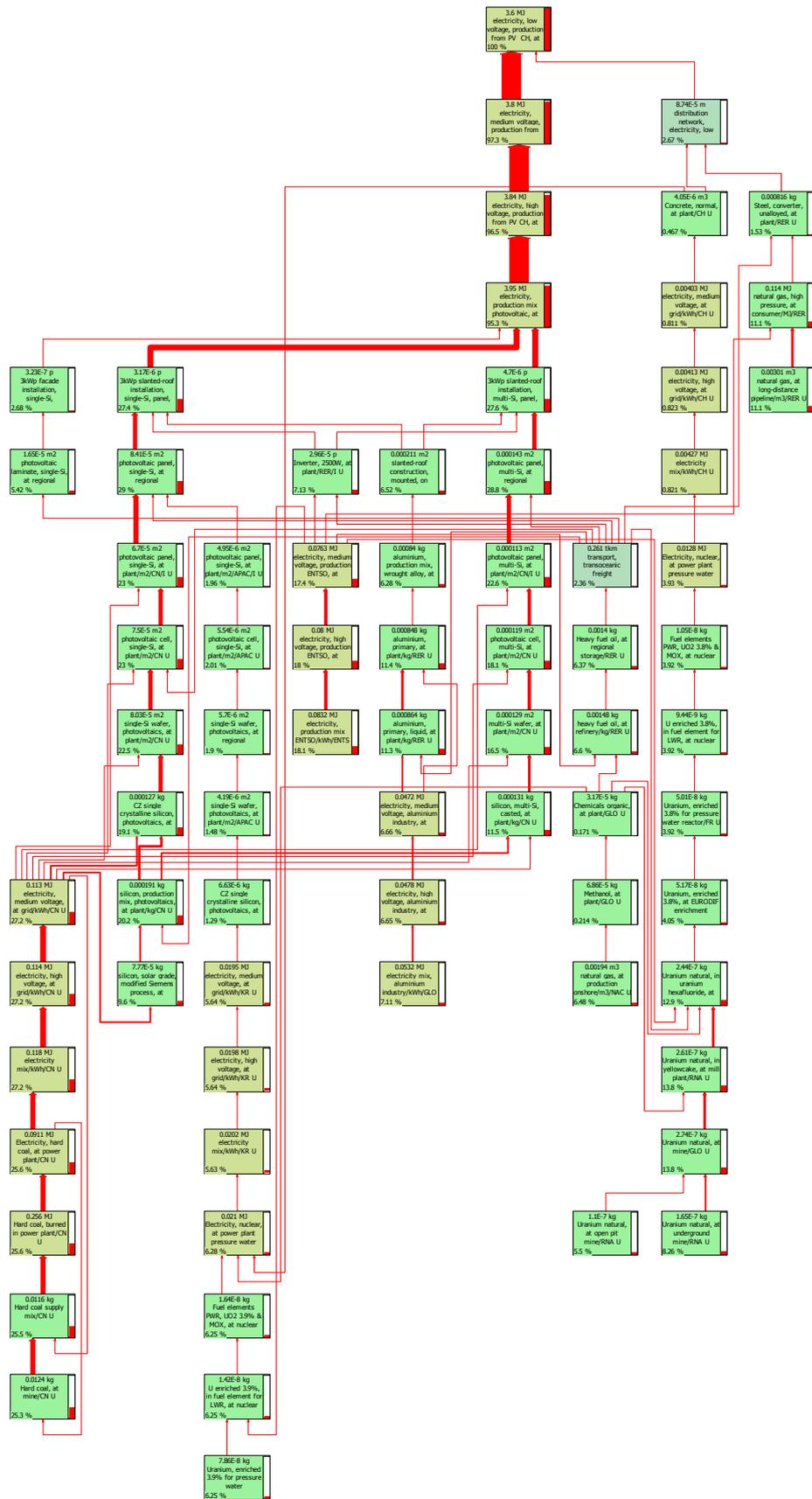


Abbildung A 37 Herkunft Kumulierter Energieaufwand, nicht erneuerbar, Photovoltaik Schweiz

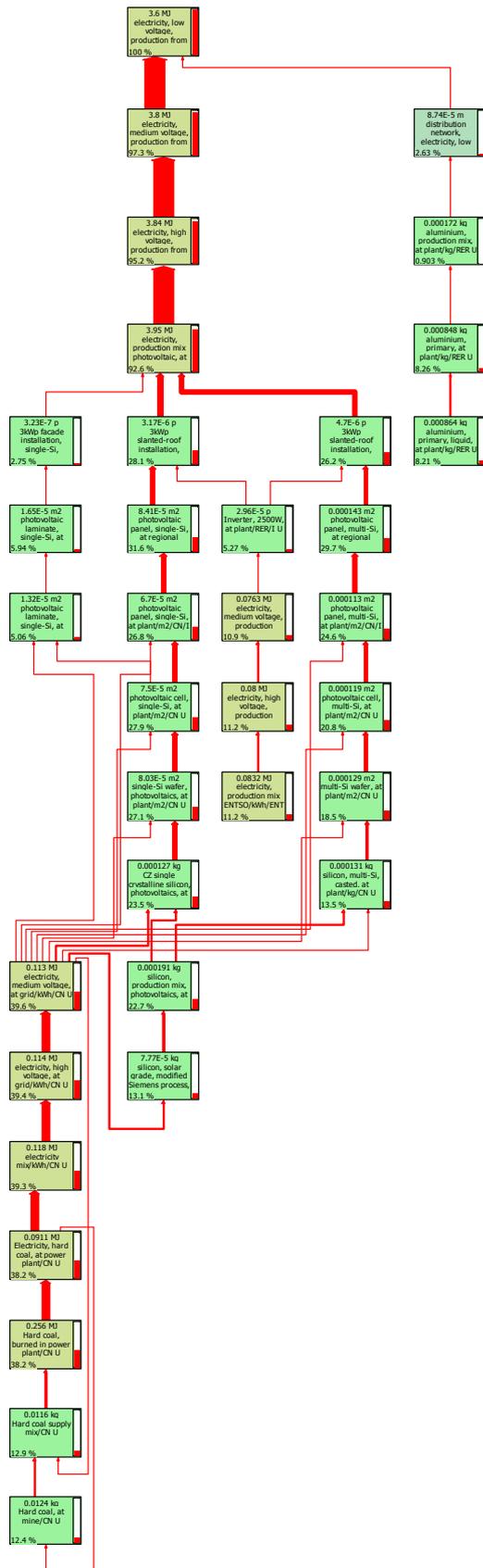


Abbildung A 38 Herkunft Treibhausgas-Emissionen, Photovoltaik Schweiz

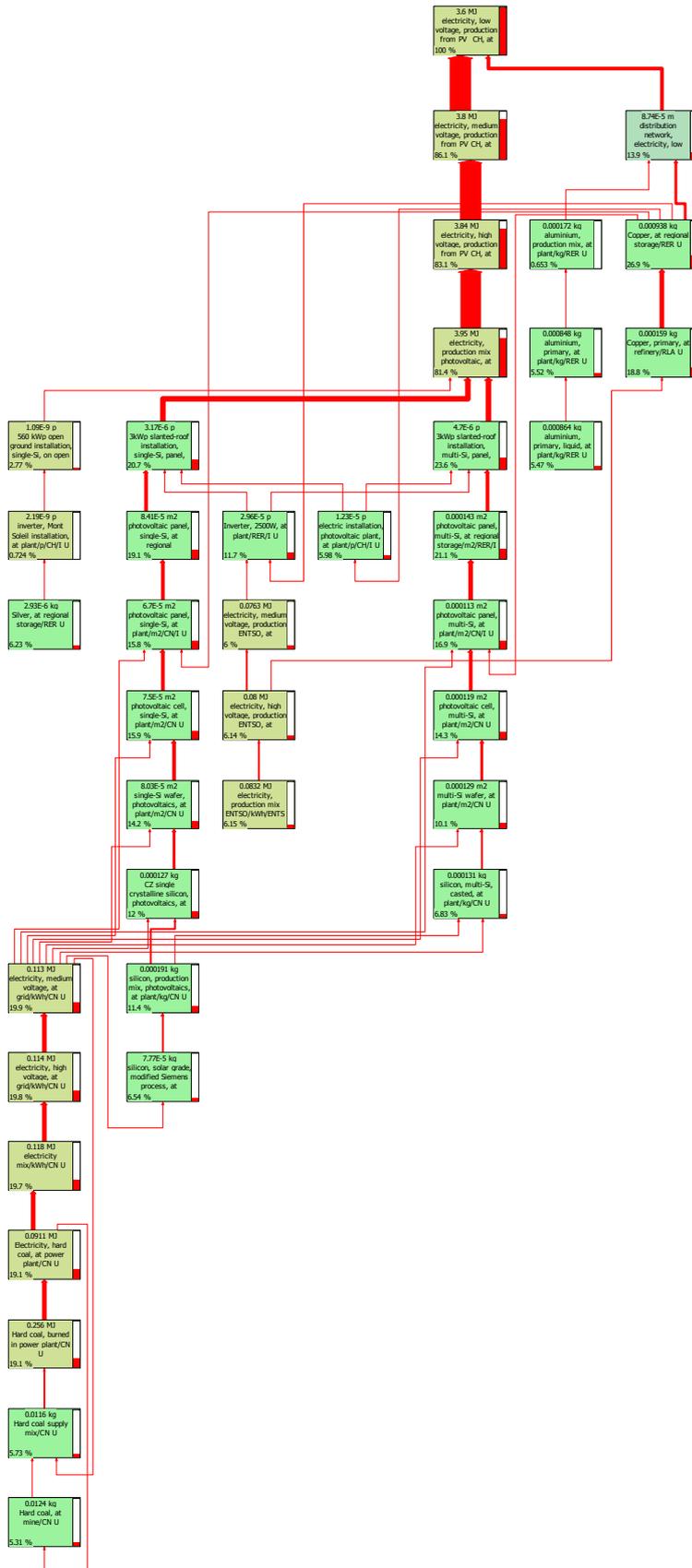


Abbildung A 39 Herkunft Umweltbelastung (Methode der ökologischen Knappheit 2013), Photovoltaik Schweiz

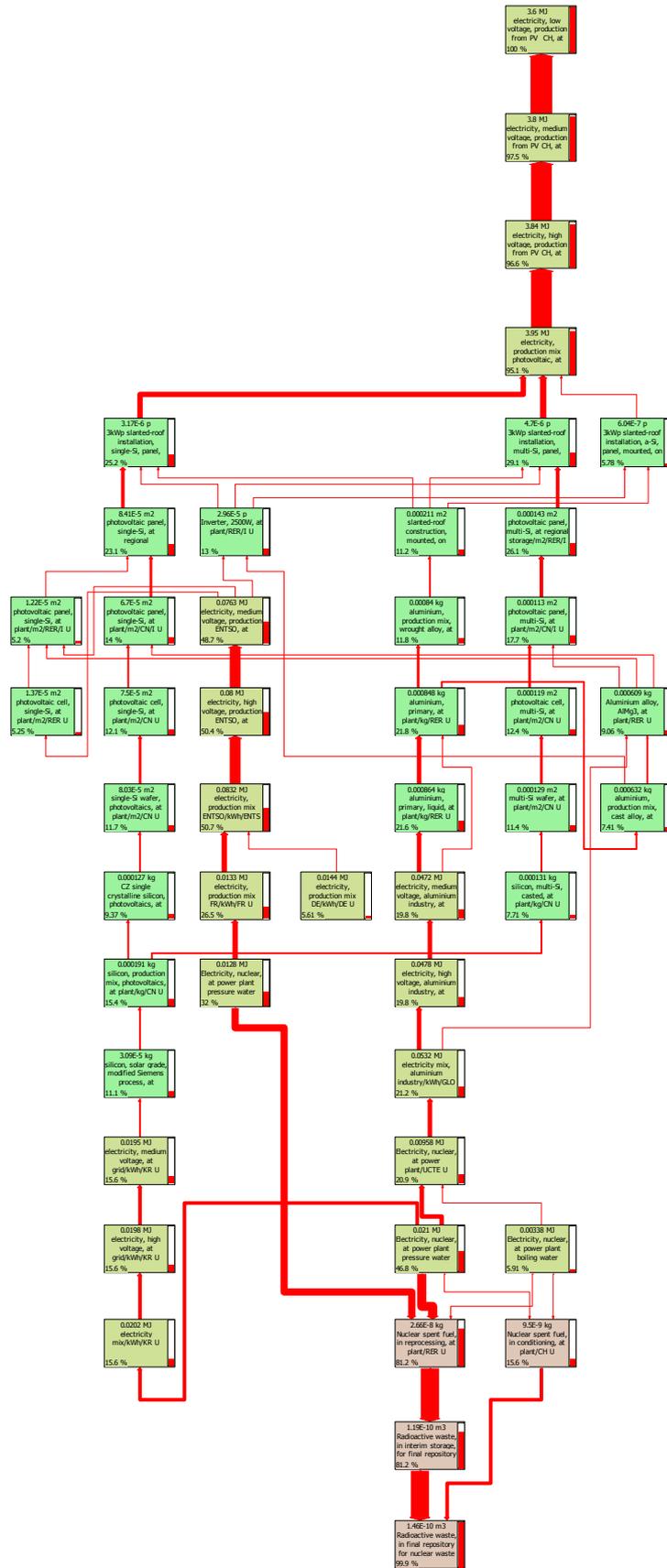


Abbildung A 40 Herkunft radioaktive Abfälle, Photovoltaik Schweiz

Strommix ENTSO-E

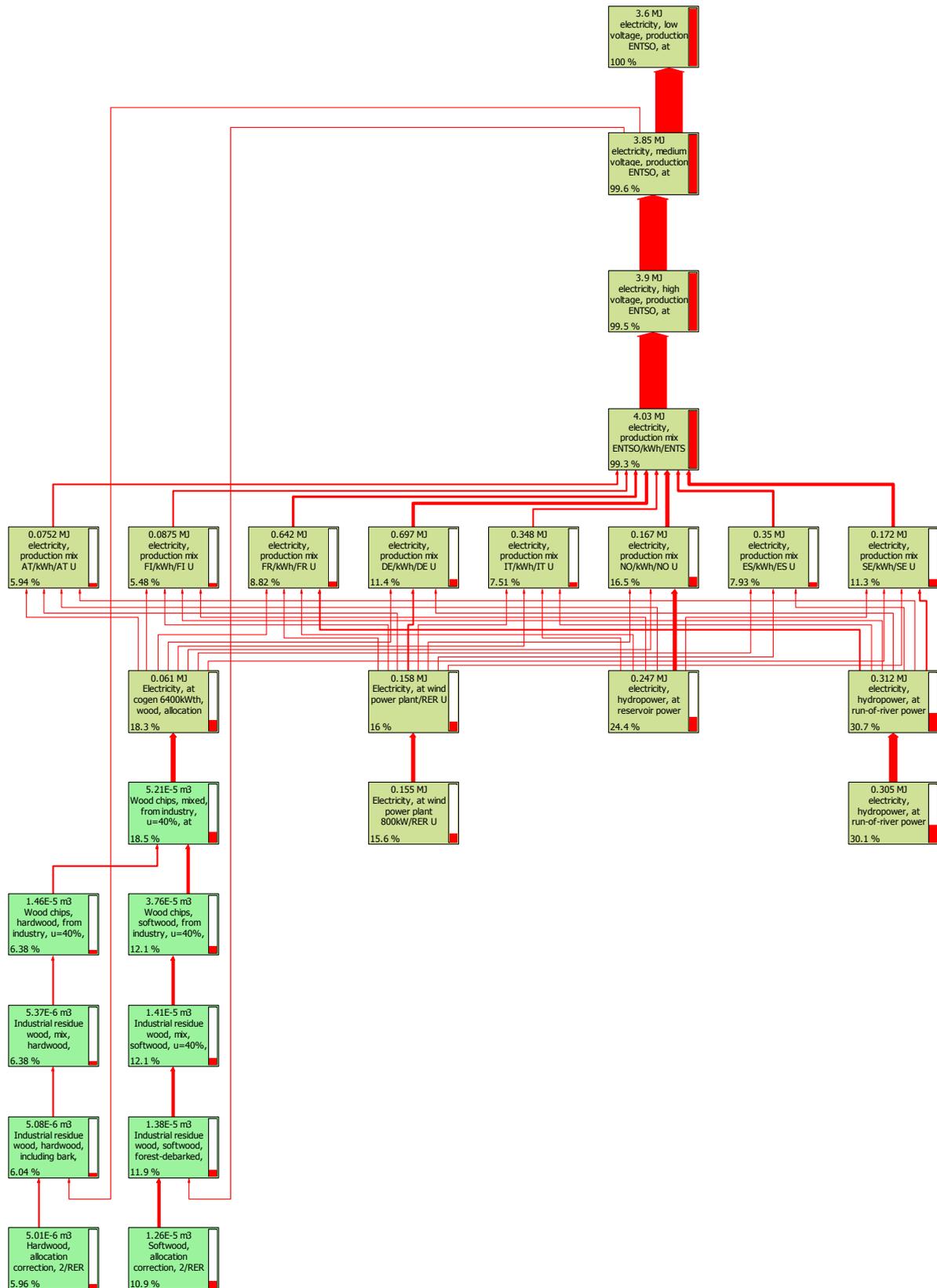


Abbildung A 41 Herkunft Kumulierter Energieaufwand, erneuerbar, Strommix ENTSO-E

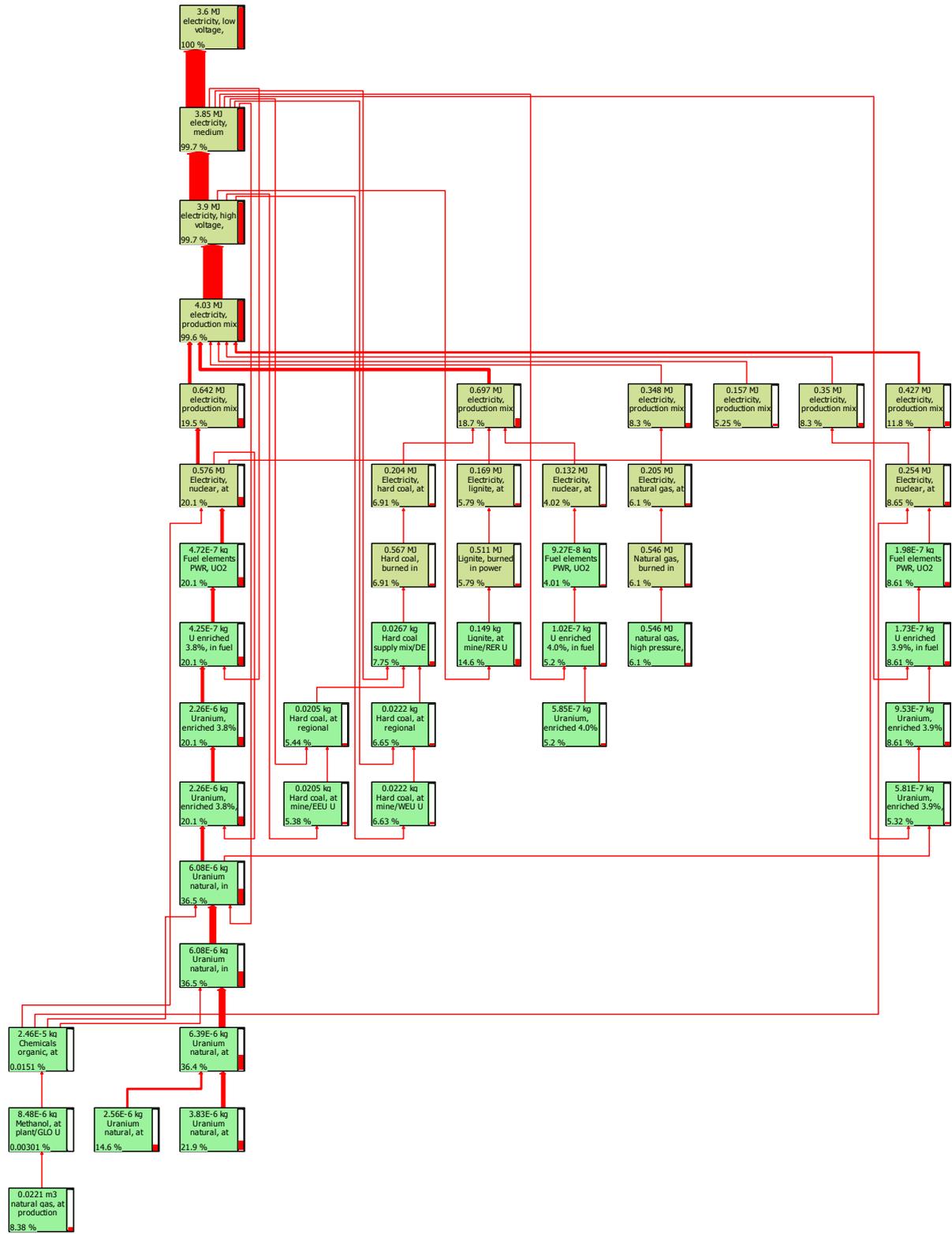


Abbildung A 42 Herkunft Kumulierter Energieaufwand, nicht erneuerbar, Strommix ENTSO-E

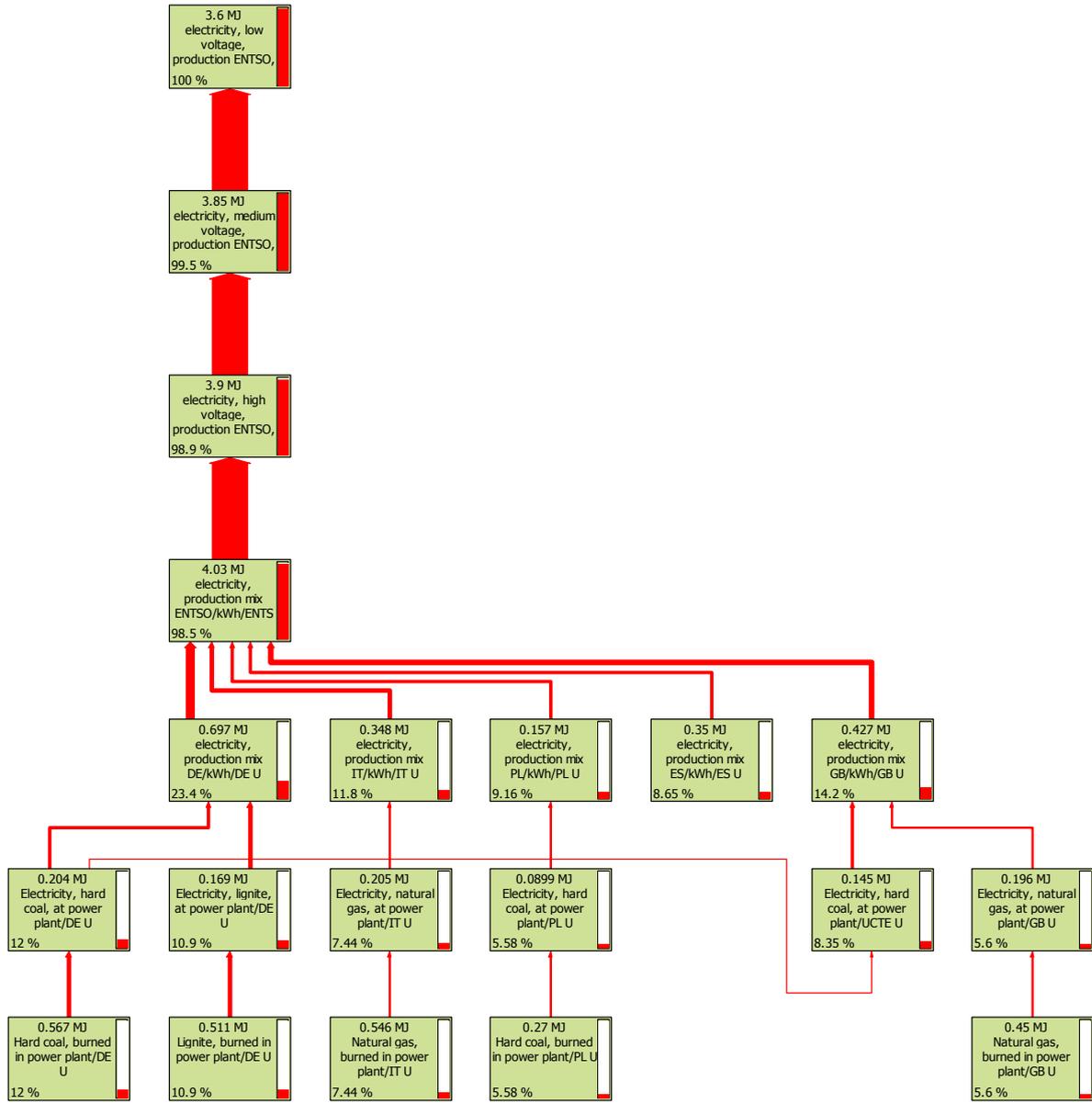


Abbildung A 43 Herkunft Treibhausgas-Emissionen, Strommix ENTSO-E

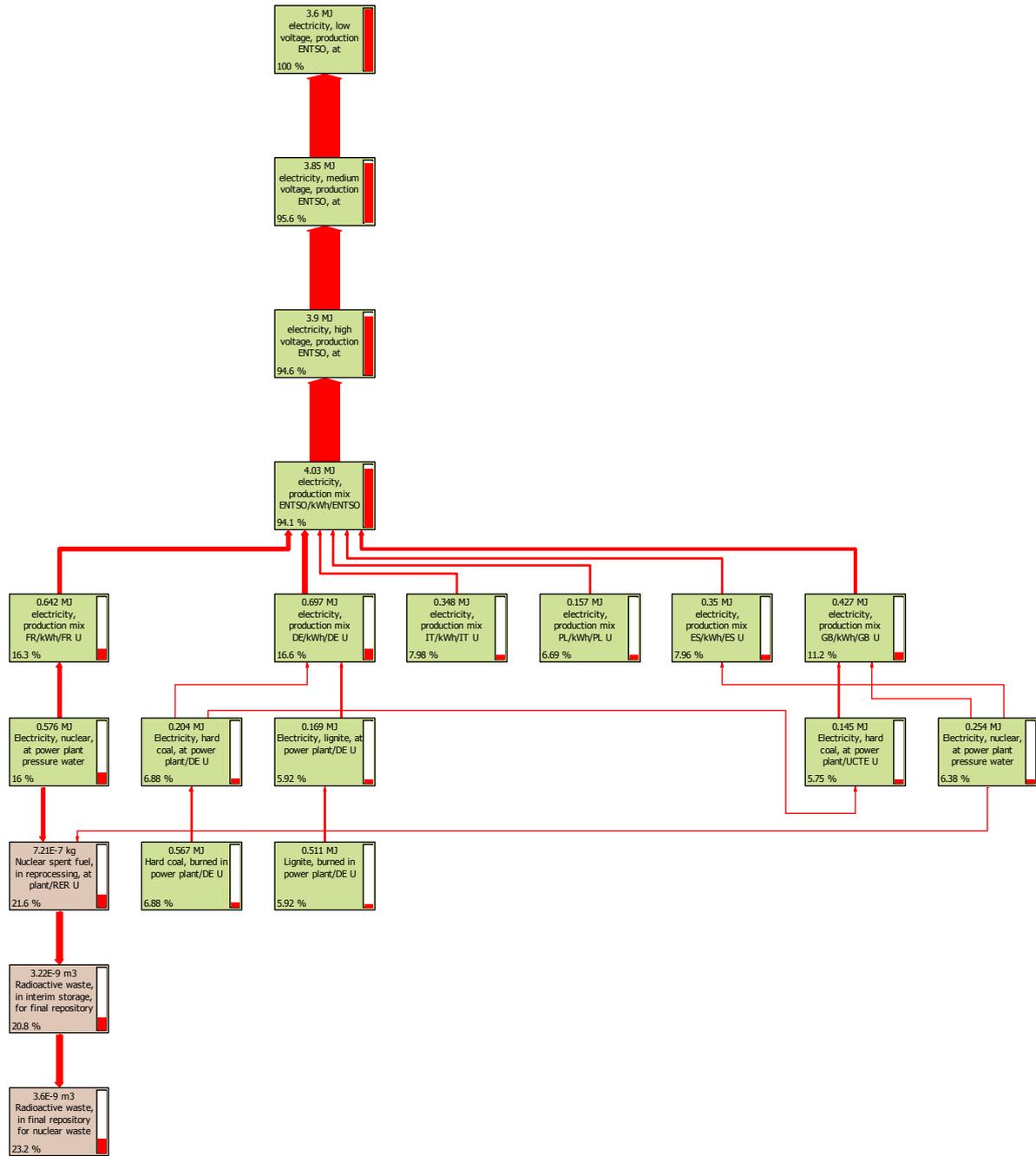


Abbildung A 44 Herkunft Umweltbelastung (Methode der ökologischen Knappheit 2013), Strommix ENTSO-E

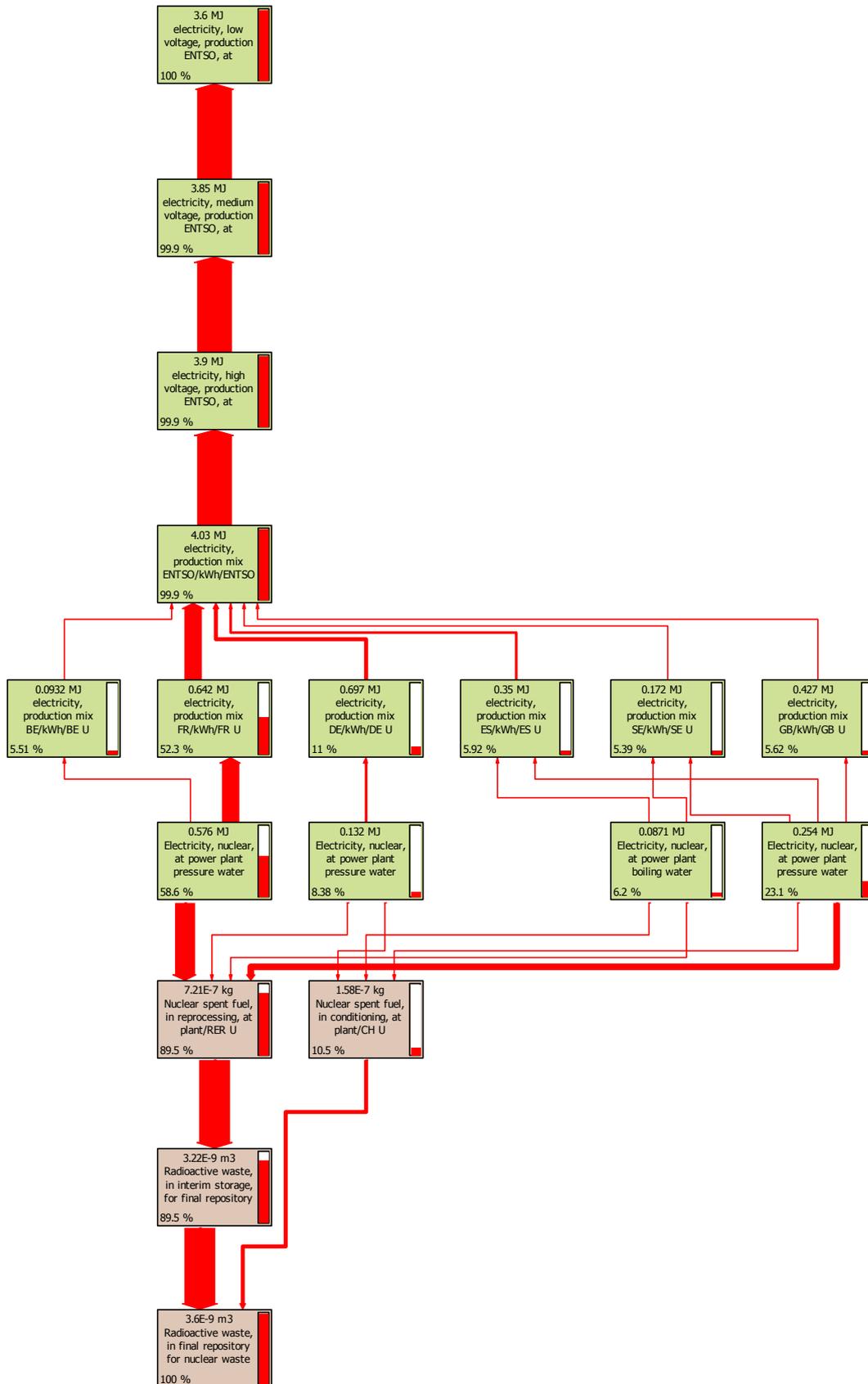


Abbildung A 45 Herkunft radioaktive Abfälle, Strommix ENTSO-E

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, Ellingsen et al. (2014)

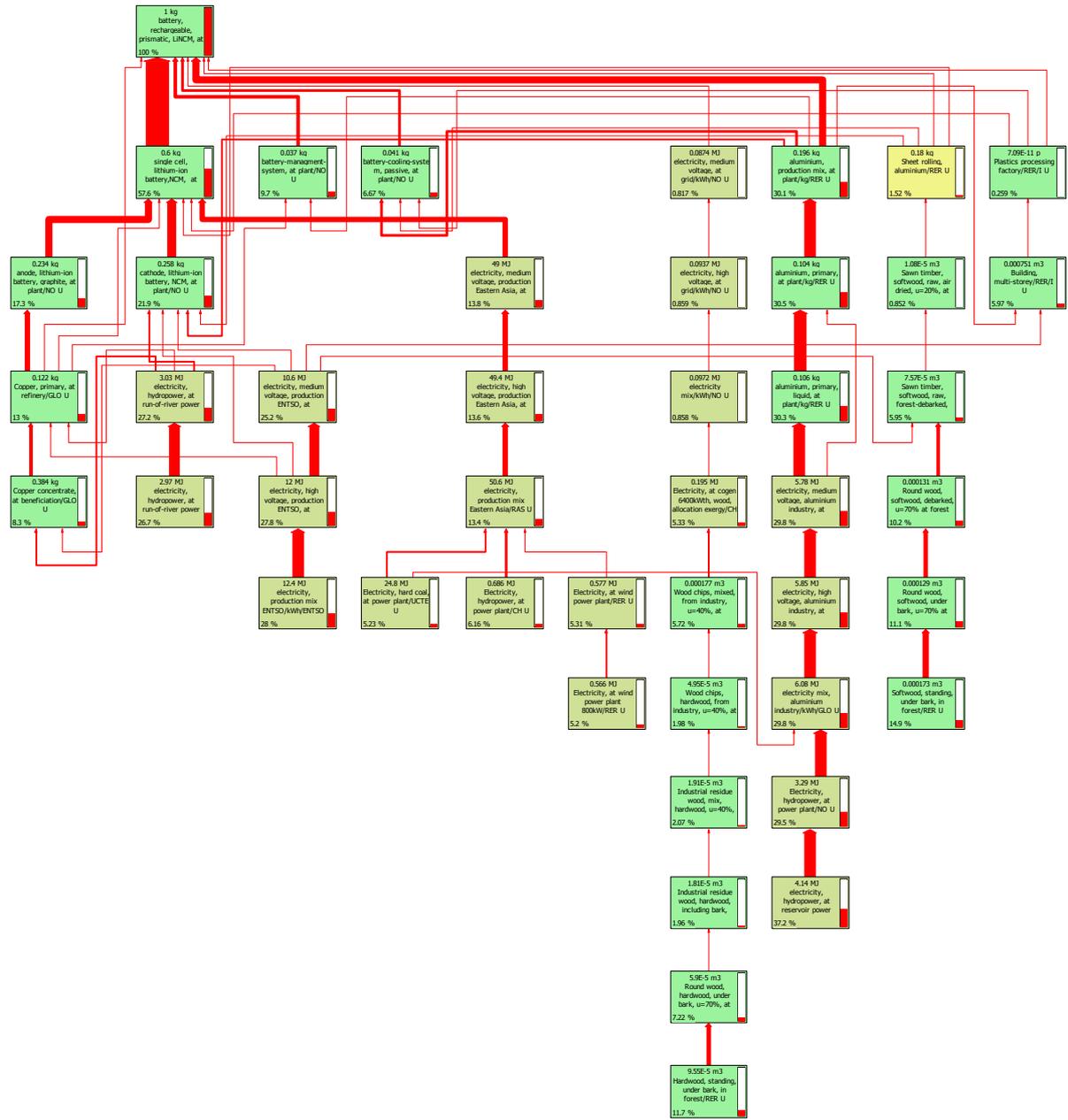


Abbildung A 46 Herkunft Kumulierter Energieaufwand, erneuerbar, NCM-Li-Ionen Batterie, Ellingsen

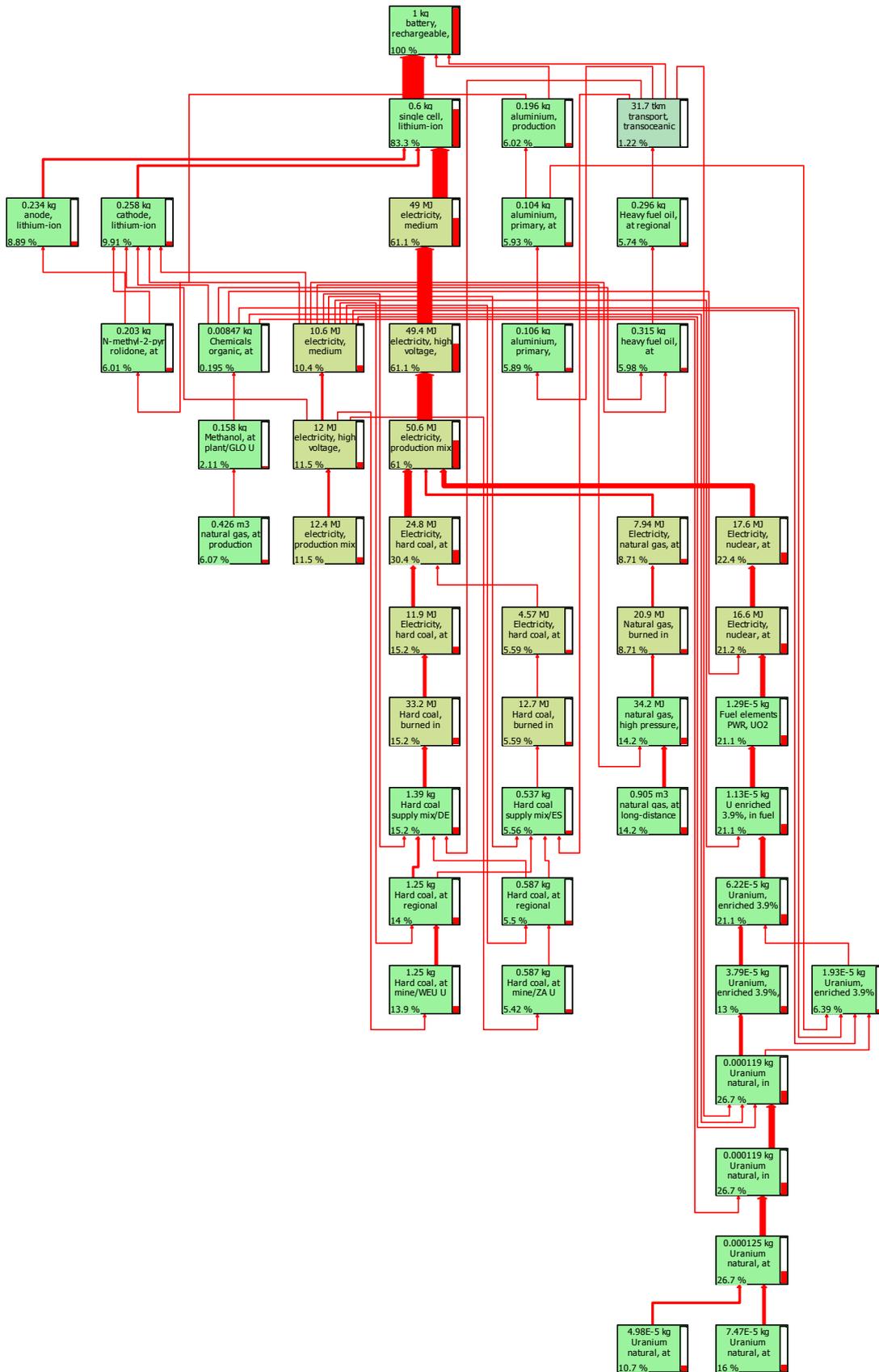


Abbildung A 47 Herkunft Kumulierter Energieaufwand, nicht erneuerbar, NCM-Li-Ionen Batterie, Ellingsen

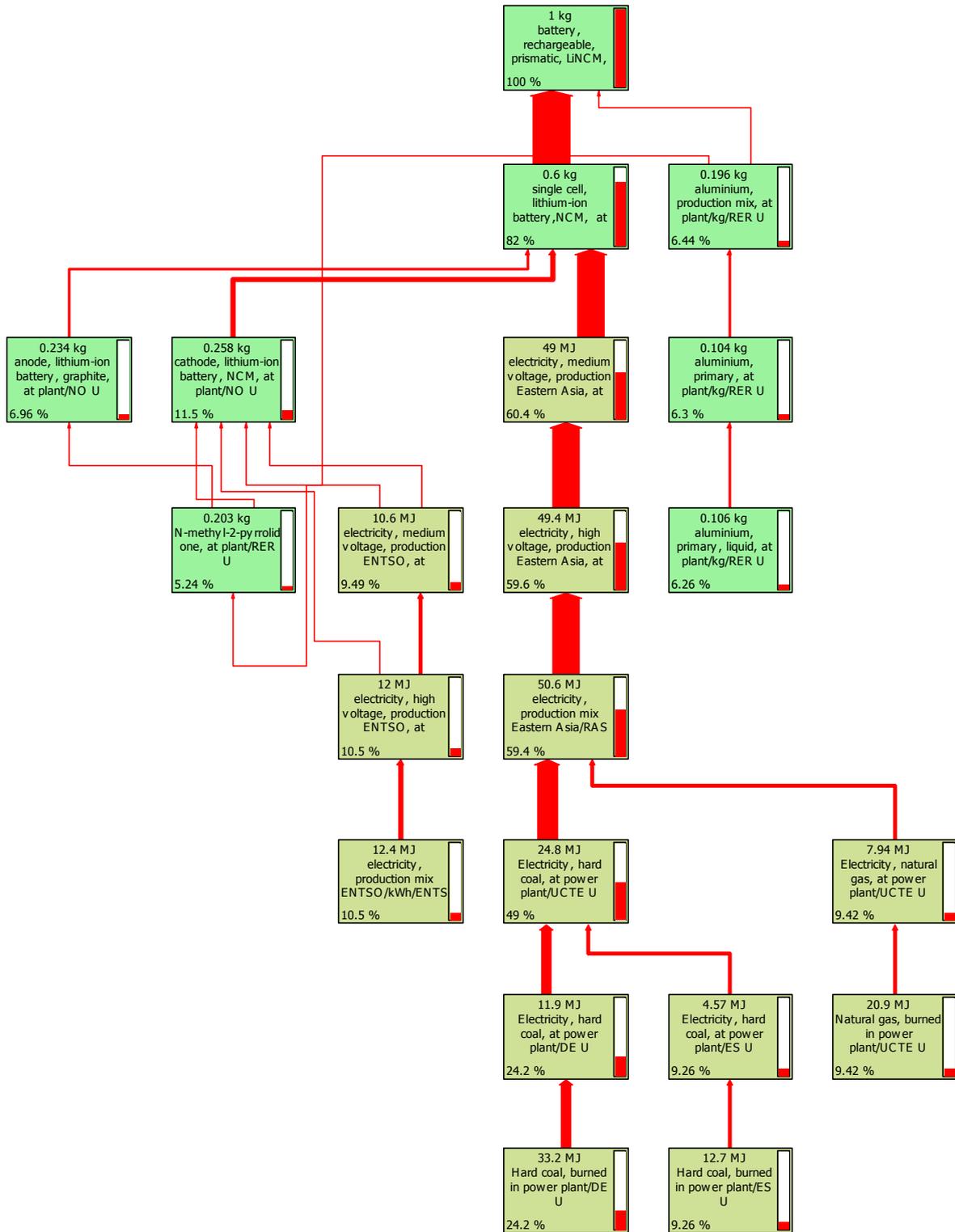


Abbildung A 48 Herkunft Treibhausgas-Emissionen, NCM-Li-Ionen Batterie, Ellingsen

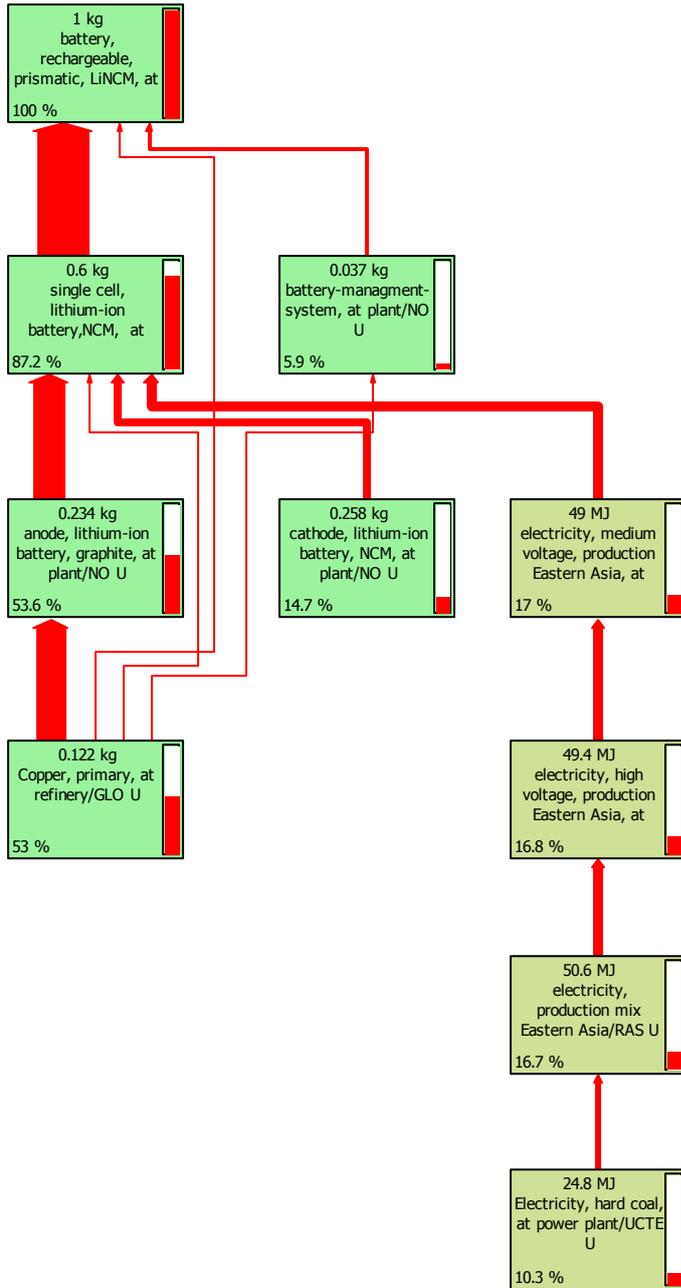


Abbildung A 49 Herkunft Umweltbelastung (Methode der ökologischen Knappheit 2013), NCM-Li-Ionen Batterie, Ellingsen

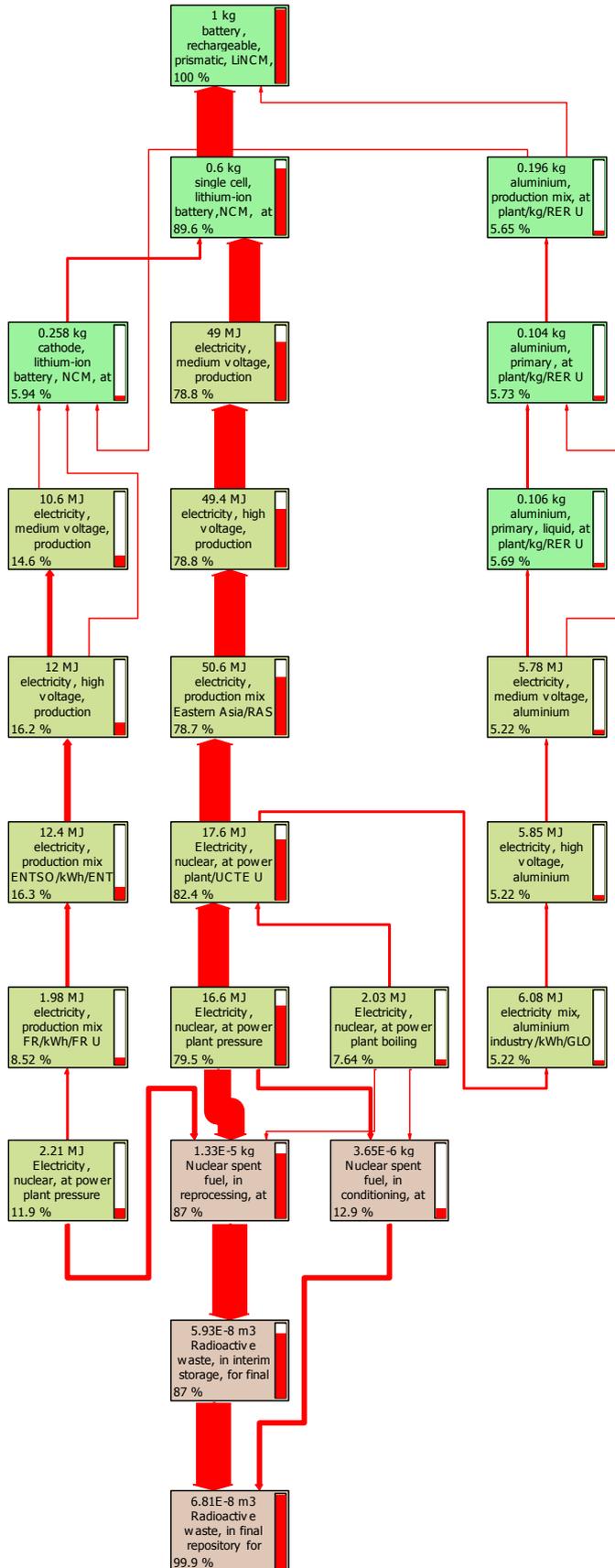


Abbildung A 50 Herkunft radioaktive Abfälle, Li-Ionen Batterie, Ellingsen

Li-Ion-Batterie, ecoinvent Zentrum

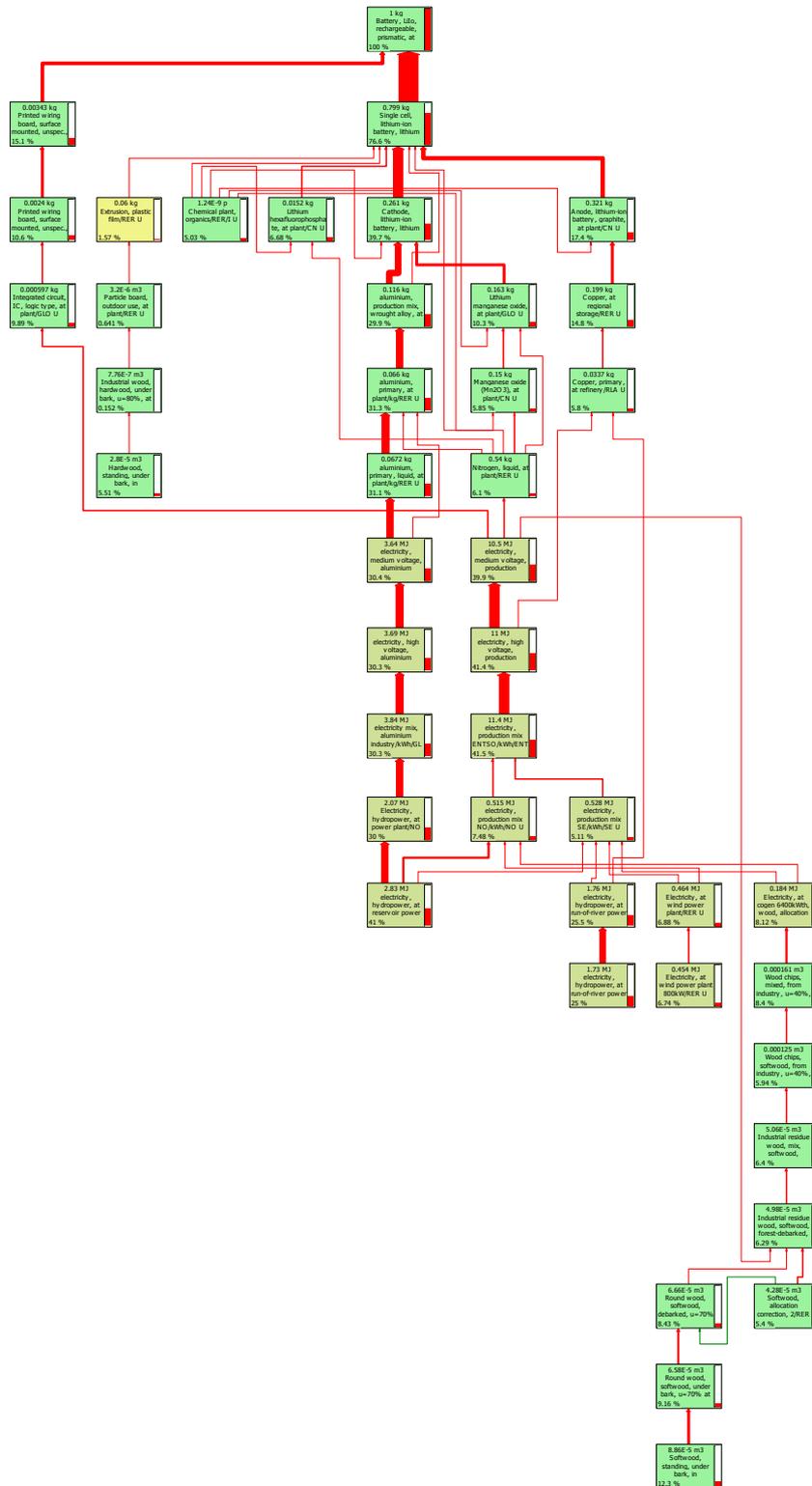


Abbildung A 51 Herkunft Kumulierter Energieaufwand, erneuerbar, Li-Ionen Batterie, ecoinvent Zentrum

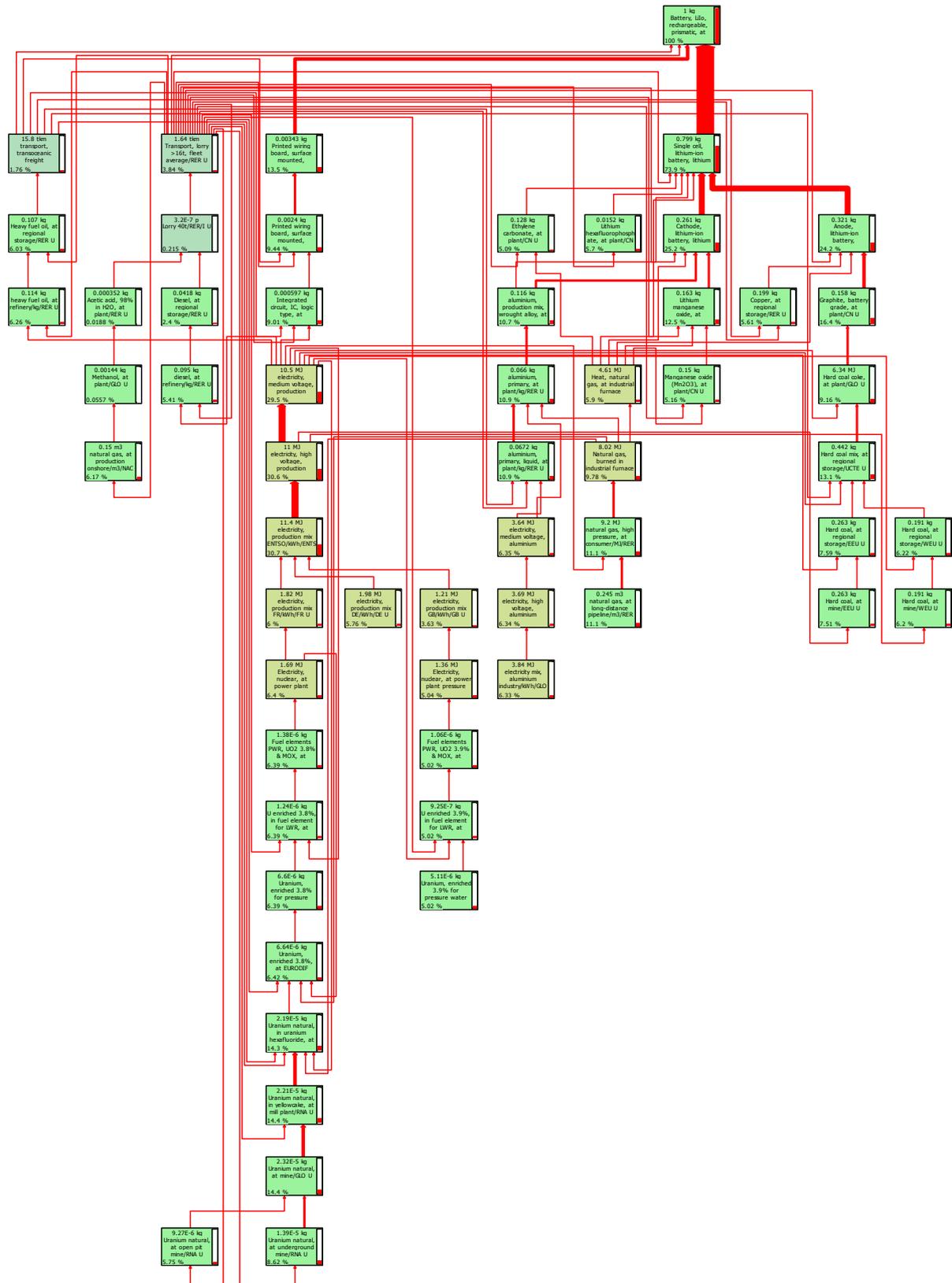


Abbildung A 52 Herkunft Kumulierter Energieaufwand, nicht erneuerbar, Li-Ionen Batterie, ecoinvent Zentrum

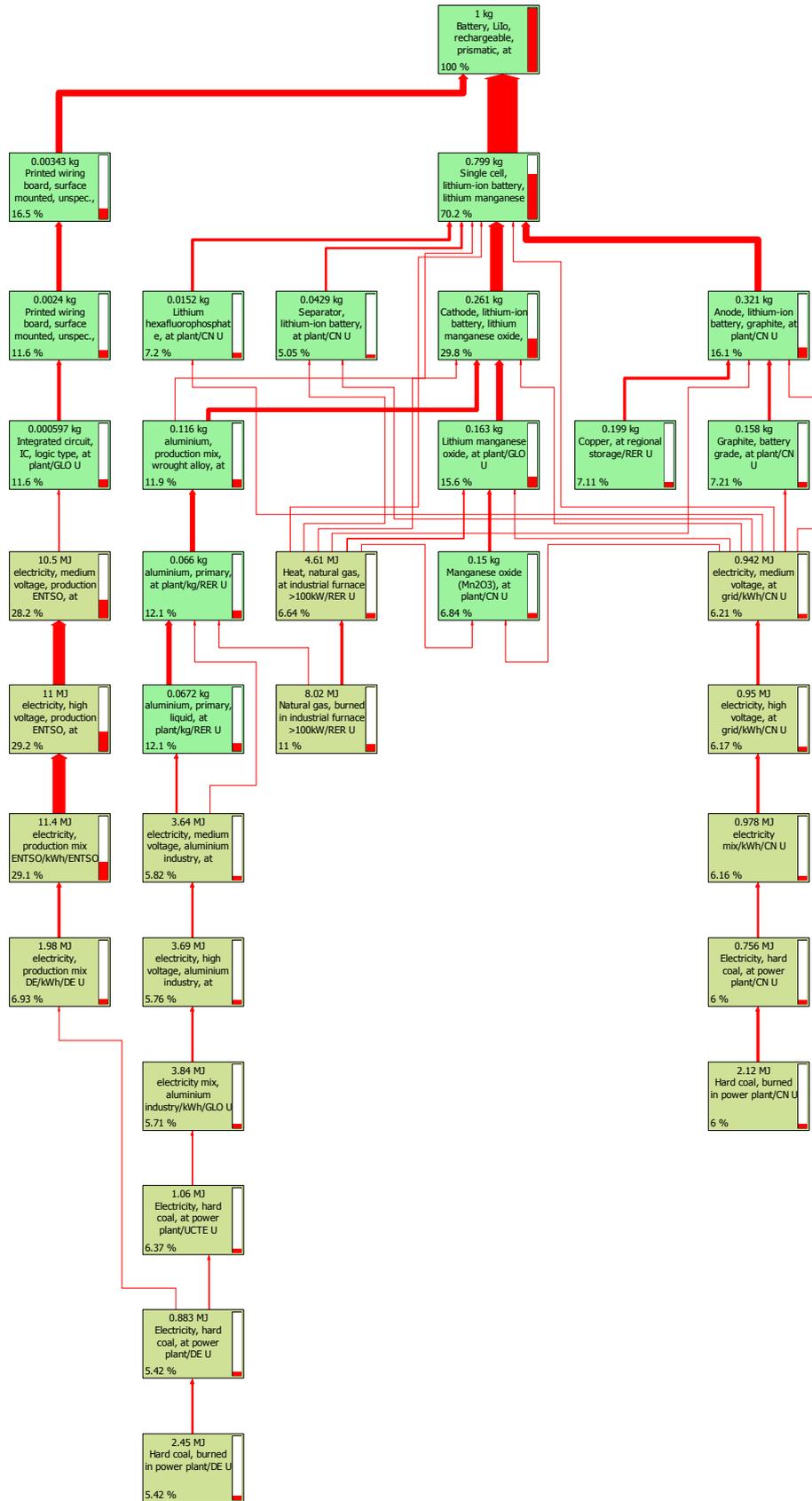


Abbildung A 53 Herkunft Treibhausgas-Emissionen, Li-Ionen Batterie, ecoinvent Zentrum

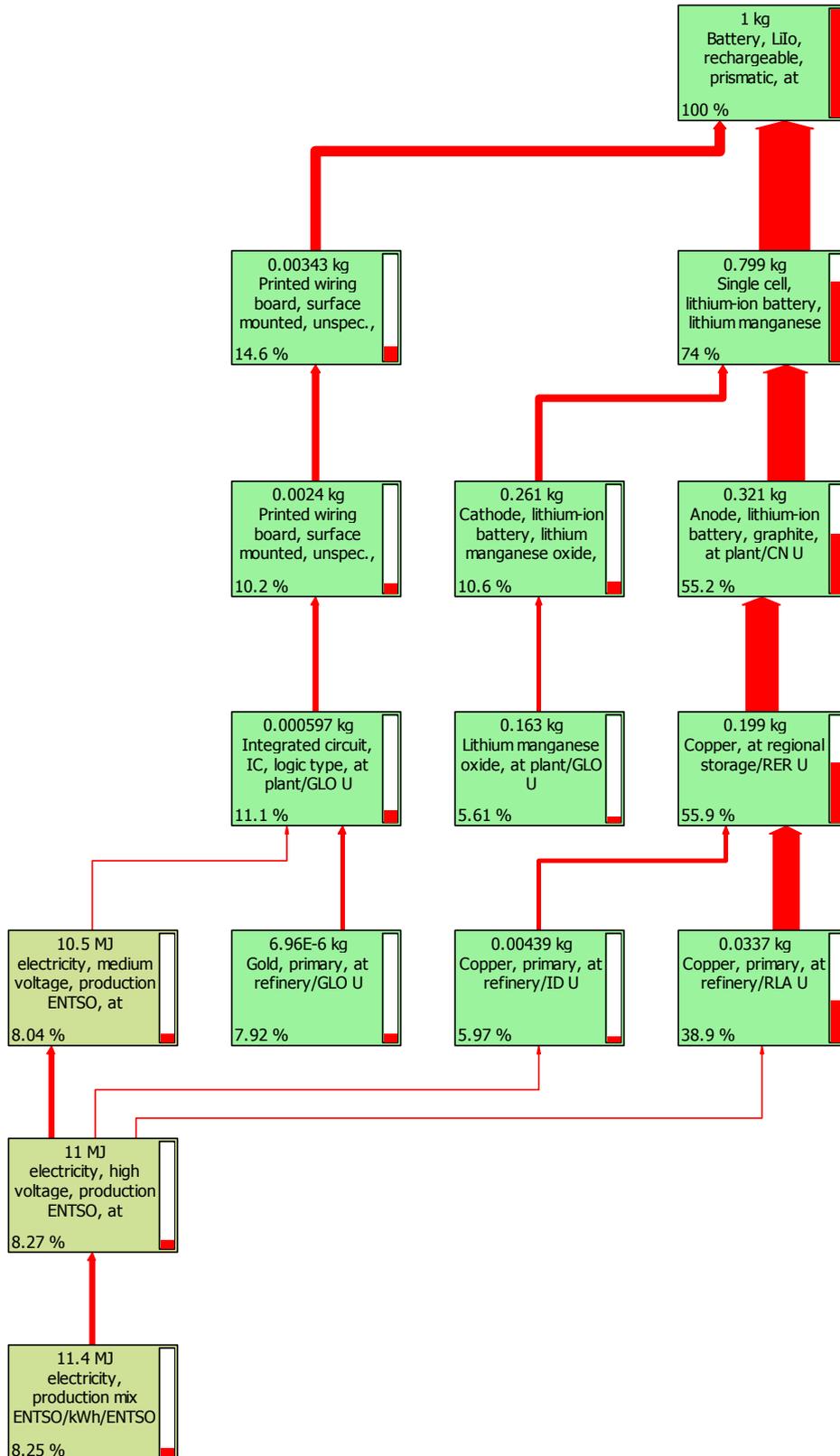


Abbildung A 54 Herkunft Umweltbelastung (Methode der ökologischen Knappheit 2013), Li-Ionen Batterie, ecoinvent Zentrum

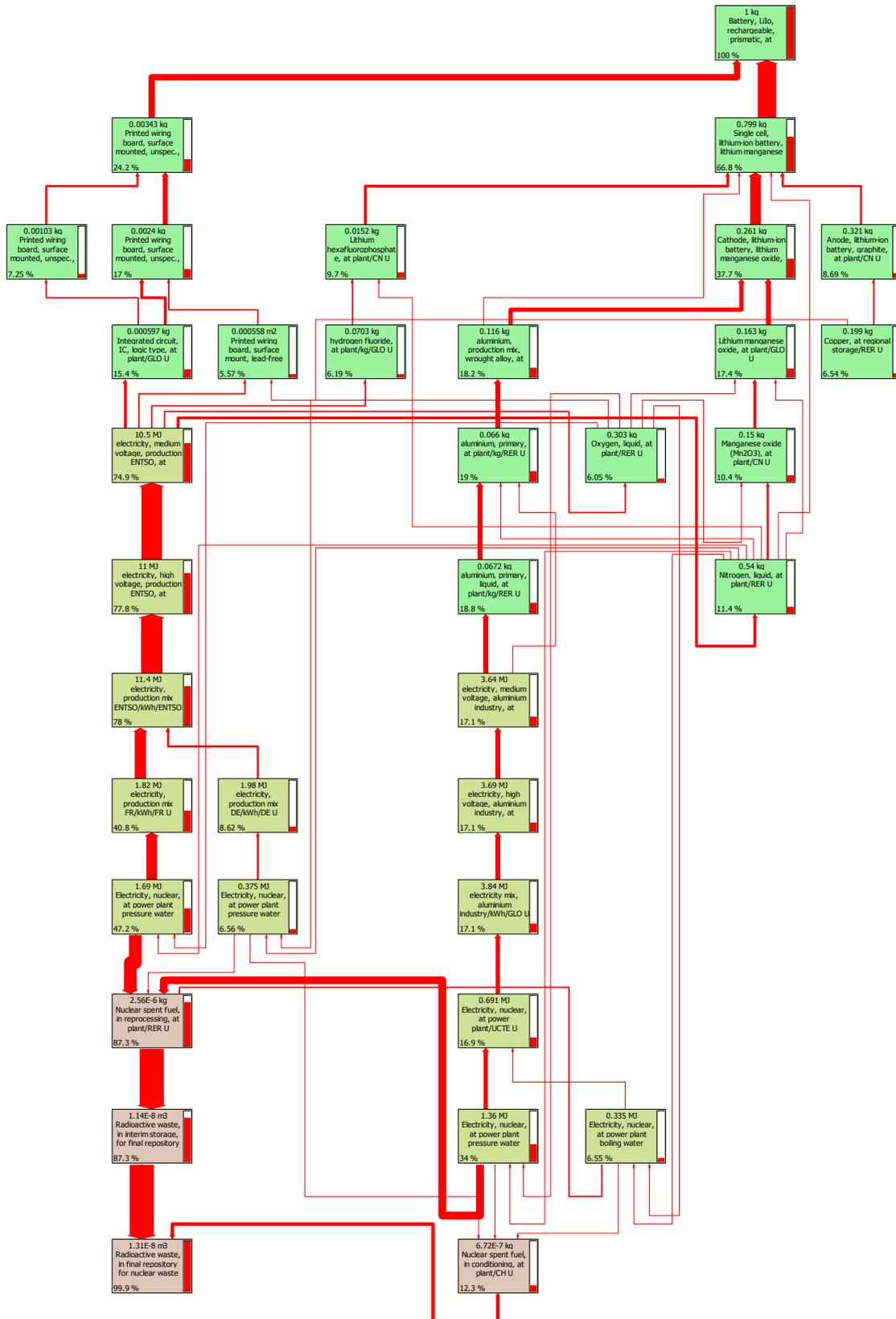


Abbildung A 55 Herkunft radioaktive Abfälle, Li-Ionen Batterie, ecoinvent Zentrum

Vergleich Umweltauswirkungen Elektroauto mit fossil betriebenen Fahrzeugen

In Tabelle A 1 sind die Umweltauswirkungen pro Personenkilometer aufgeführt.

Tabelle A 1 Kumulierter Energieaufwand (erneuerbar, nicht erneuerbar), Treibhausgas-Emissionen, Umweltbelastung (Methode der ökologischen Knappheit 2013) und radioaktive Abfälle pro pkm mit verschiedenen Personenwagen

	Verbrauch	KEA, erneuerbar	KEA, nicht erneuerbar	Treibhausgas-emissionen	Umweltbelastung	radioaktive Abfälle
	pro 100 km	MJ Öl-eq	MJ Öl-eq	g CO ₂ -eq	UBP'13	mm ³
Diesel, Flottendurchschnitt	6.0 Liter ²	0.14	2.91	182	377	0.28
Benzin, Flottendurchschnitt	8.5 Liter ²	0.12	3.29	211	234	0.26
Flottendurchschnitt Schweiz	7.5 Liter ²	0.13	3.14	200	289	0.27
Erdgas, Flottendurchschnitt	7.7 Nm ³³	0.13	3.25	181	189	0.28
Diesel, Klassenbester	4.6 Liter ⁴	0.13	2.44	150	186	0.28
Benzin, meist verkauft	7.1 Liter ⁴	0.14	3.06	192	219	0.29
Elektroauto, CH Strommix ¹	20 kWh ⁵	0.38	2.64	107	254	0.96
Hybrid	5.6 Liter ⁶	0.13	2.63	161	208	0.29
Plug-In Hybrid	3.4 Liter ⁷	0.21	2.47	132	205	0.50
Diesel, cityCar, Euro5	2.7 Liter ⁸	0.04	1.08	70	83	0.09
Elektro cityCar, CH Strommix ¹	11.9 kWh ⁸	0.20	1.17	42	92	0.49

Basistabelle Verminderungspotenzial der Umweltbelastung

Die nachstehende Tabelle A 2 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.

Tabelle A 2 Berechnung des Verminderungspotenzials beim Ersatz von Durchschnitts-Pkw durch Elektroautos (betrieben mit dem Verbrauchermix oder dem zertifizierten Strommix), Hybrid-Autos, den meist verkauften Benzinautos bzw. den Klassenbesten Dieselaautos.

Indikator	KEA, erneuerbar	KEA, nicht erneuerbar	Treibhausgasemissionen	Umweltbelastung	radioaktive Abfälle	C-14	NOx	Partikel	Partikel Auspuff	Dieseleruss Auspuff
Einheit pro vkm	MJ Öl-eq	MJ Öl-eq	g CO2-eq	UBP'13	mm3	MBq	kg	kg	kg	kg
Flottendurchschnitt Schweiz	0.20	5.03	320	463	0.43	1.85	7.33E-04	1.18E-04	4.53E-06	3.36E-06
Elektroauto, CH Strommix 1	0.61	4.23	172	407	1.54	6.49	3.74E-04	1.49E-04	0.00E+00	0.00E+00
Elektroauto zertifiziertem Strom	1.05	2.59	138	344	0.64	2.43	3.24E-04	1.33E-04	0.00E+00	0.00E+00
Hybrid	0.20	4.21	258	333	0.47	1.86	3.46E-04	1.04E-04	1.07E-06	9.01E-07
Benzin, meist verkauft	0.22	4.89	306	350	0.46	1.85	3.83E-04	1.14E-04	1.36E-06	1.14E-06
Diesel, Klassenbesten	0.21	3.90	240	298	0.44	1.78	5.39E-04	1.06E-04	1.00E-08	3.50E-10
<i>Informationen: BFS-2015-Verkehrsleistung-Personenverkehr, BFS-2015-Fahrleistung-Personenverkehr</i>										
Fahrleistung 2014 CH	49'589'000'000 vkm		79'987'000'000 pkm							
Anteil Erstinverkehrsetzung zu ersetzende Fahrleistung	7%		7%							
	3.5E+09 vkm		5.6E+09 pkm							
Belastung durch Ersatz mit...										
Indikator	KEA, erneuerbar	KEA, nicht erneuerbar	Treibhausgase	Umweltbelastung	radioaktive Abfälle	C-14	NOx	Partikel	Partikel Auspuff	Dieseleruss Auspuff
Einheit	MJ Öl-eq	MJ Öl-eq	g CO2-eq	UBP'13	mm3	MBq	mg	mg	kg	kg
Flottendurchschnitt Schweiz	7.07E+08	1.75E+10	1.11E+12	1.61E+12	1.49E+09	6.43E+03	2.54E+12	4.10E+11	1.57E+04	1.17E+04
Elektroauto, CH Strommix 1	2.10E+09	1.47E+10	5.96E+11	1.41E+12	5.35E+09	2.25E+04	1.30E+12	5.16E+11	0.00E+00	0.00E+00
Elektroauto zertifiziertem Strom	3.66E+09	8.98E+09	4.80E+11	1.20E+12	2.22E+09	8.42E+03	1.13E+12	4.63E+11	0.00E+00	0.00E+00
Hybrid	7.06E+08	1.46E+10	8.96E+11	1.16E+12	1.61E+09	6.47E+03	1.20E+12	3.62E+11	3.72E+03	3.13E+03
Benzin, meist verkauft	7.55E+08	1.70E+10	1.06E+12	1.21E+12	1.60E+09	6.41E+03	1.33E+12	3.95E+11	4.72E+03	3.96E+03
Diesel, Klassenbesten	7.39E+08	1.35E+10	8.32E+11	1.04E+12	1.53E+09	6.17E+03	1.87E+12	3.68E+11	3.47E+01	1.21E+00
Reduktionspotential										
	KEA, erneuerbar	KEA, nicht erneuerbar	Treibhausgasemissionen	Umweltbelastung	radioaktive Abfälle	C-14	Stickoxide	Partikel	Partikel, Auspuff	Dieseleruss, Auspuff
	TJ Öl-eq	TJ Öl-eq	1'000t CO ₂ -eq	Ma. UBP'13	m ³	MBq	Tonnen	Tonnen	Tonnen	Tonnen
Elektroauto ¹⁾	-1'394	2'784	514	194	-3.86	-16'085	1'245	-106	15.7	11.7
Elektroauto (mit zert. Strom)	-2'953	8'482	630	410	-0.72	-1'988	1'417	-54	15.7	11.7
Hybrid	1	2'852	214	450	-0.12	-35	1'340	48	12.0	8.6
Benzin, meist verkauft	-48	491	46	391	-0.11	18	1'215	15	11.0	7.7
Diesel, Klassenbesten	-33	3'931	278	570	-0.04	262	671	42	15.7	11.7