

Das Exergiekonzept als Analysemethode am Beispiel Deutschlands

Marco Lindner¹, Udo Bachhiesl¹, Heinrich Stigler¹

¹Technische Universität Graz, Institut für Elektrizitätswirtschaft und Energieinnovation,
Inffeldgasse 18, A-8010 Graz
+43-316-873-7903, bachhiesl@tugraz.at, www.iee.tugraz.at

Kurzfassung: Konventionelle Analysen der Energiesysteme von Ländern und Städten basieren ausschließlich auf der quantitativen Betrachtung nach Joule. Dabei werden verschiedenste Energieträger in Wärmeäquivalenten beziffert und Informationen über Qualität und Umwandelbarkeit vernachlässigt. Exergie-Analysen verfeinern die Ergebnisse konventioneller Energie-Analysen anhand qualitativer Merkmale und bieten die Möglichkeit, falschen Einsatz von hochqualitativen Energieträgern, potentielle Umwelteinflüsse und Bedarf an Verbesserungen zu identifizieren.

Keywords: Energie, Exergie, Energieträger, Qualität, Energiesysteme, Analyse, Optimierung, Planung

1 Einleitung

Die Energiewende Deutschlands ist Mittelpunkt vieler kontroverser Debatten und Ursprung innovativer Ideen und Konzepte. Nebst neuen technologischen Errungenschaften und fördernden politischen Anpassungen ist es zudem hilfreich und notwendig, zusätzliche Betrachtungsweisen und Blickwinkel auf altbekannte Probleme anzuwenden.

Die heutigen Energieversorgungssysteme sind mit Gesellschaft und Industrie historisch gewachsen und weisen eine Vielzahl unterschiedlichster Energieträger und Verwertungsmethoden auf. Bei bisherigen Analysen werden Energieträger allesamt mit der nach Joule bekannten Methode in Wärmeäquivalenten beziffert und damit auf ein vergleichbares, quantitatives Niveau gebracht. Deren ursprüngliche Qualitätsmerkmale und Beschränkungen der Wandelbarkeit finden hierbei jedoch keinerlei Beachtung. Rein energetisch könnte in einer idealen Prozesskette 1 kWh Erdöl in 1 kWh Industriewärme und dann über chemische Prozesse in 1 kWh brennbares Gas oder über Wärmekraftmaschinen in 1 kWh elektrischen Strom umgewandelt werden. Dass diese Konvertierungen auch im Idealfall nicht möglich sind, zeigt sowohl rationales Denken als auch der zweite Hauptsatz der Thermodynamik. Nur bestimmte Richtungen der Energiewandlung sind möglich. Ein qualitativer Unterschied von Energieträgern ist offensichtlich, doch in Gesamtsystem-Planungen bisher kaum berücksichtigt.

Das Konzept der Exergie verbindet die energetische Betrachtungsweise mit dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik und bewertet Energieträger anhand ihrer immanenten Fähigkeit, Arbeit gegenüber einer definierten Umgebung zu verrichten. Beschränkungen in der Arbeitsfähigkeit fließen in Form von Entropie sowie chemischer Zusammensetzung in die

Bewertung ein. Im Gegensatz zur energetischen Betrachtung kann dieser qualitative Ansatz unnötige Entwertungen sichtbar machen und Optimierungspotentiale des Energiesystems deuten.

Abbildung 1.1 zeigt das Verhältnis von Exergie zu Energie einiger nennenswerter Energieträger. Der Teil der Energie, der nicht in Arbeit überführt werden kann und in der Umgebung verbleibt, wird als Anergie bezeichnet. Es gilt: **Energie = Exergie + Anergie**. Thermische Energie enthält, bedingt durch ihren hohen Grad an Entropie, nur wenig verfügbare Arbeit. Daher ist es exergetisch sinnvoll, Wärmebedarf durch natürlich vorkommende Wärmequellen oder Nebenproduktnutzung zu decken.

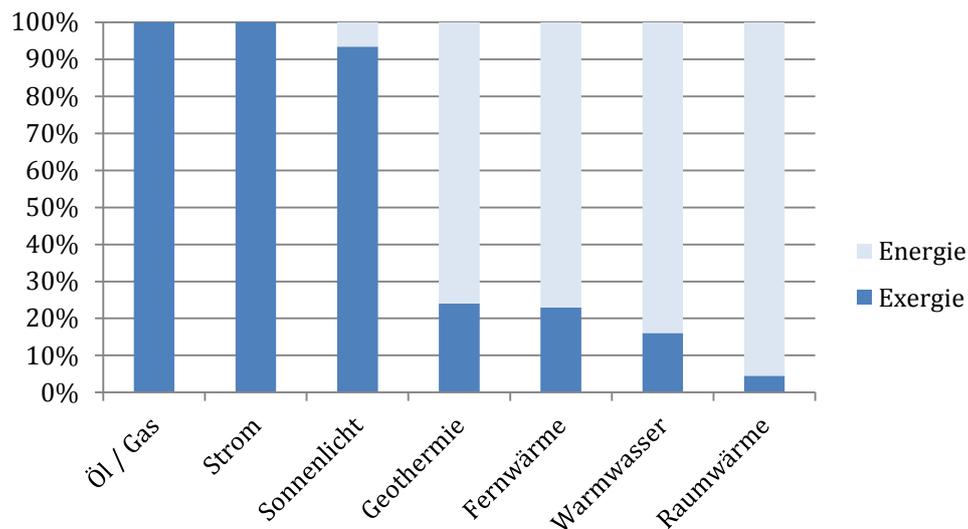


Abbildung 1.1: Exergieinhalt ausgewählter Energieträger

Die Exergie-Analyse, aufbauend auf dem abstrakten Begriff der Entropie, ist ein bereits bekanntes und genutztes Werkzeug zur Prozessbewertung und Auslegung von Teilsystemen technischer Anlagen. Das Exergieflussbild – als differenzierte Variante des Energieflussbildes – liefert einen zusätzlichen, qualitativ ausgerichteten Blickwinkel. Dadurch ist es möglich, Energieversorgungssysteme nicht nur quantitativ zu planen, sondern die Eignung verschiedenster Technologien qualitativ zu vergleichen.

2 Energetische Analyse

Die Ausgangsdaten für die energetische Analyse des Jahres 2011 sind den Datenbanken und Bilanzen des BMWi, der AGEb sowie der AGFW entnommen und wurden in ein uniformes Datenmodell überführt. Bei der Bewertung erneuerbarer Energien und deren Erzeugungseffizienz erfolgt eine Orientierung am Verfahren der führenden, internationalen Komitees IEA, EUROSTAT und ECE (OECD/IEA, 2005). Da die veröffentlichten Bilanzen im Bereich der Nutzenergie Daten unvollständig sind, wurde ein anknüpfendes Modell entwickelt. Dazu werden realitätsnahe, energetische Wirkungsgrade der Nutzenanwendungen bestimmt, welche sich an den Werten der STATISTIK AUSTRIA orientieren.

3 Exergetische Analyse

Zur Erstellung des Exergieflussbildes werden exergetische Faktoren für alle in Frage kommenden Energieträger sowie auftretende Abströme von Umwandlungsprozessen entwickelt (Lindner, 2013). Diese bilden sich durch den Quotienten aus Exergieinhalt und Energieinhalt. Der Exergieinhalt errechnet sich durch die maximal verfügbare Arbeit aus dem jeweiligen Energieträger gegenüber einer definierten Referenzumgebung. Bei der Berechnung werden alle Anteile chemischer als auch thermomechanischer Energie berücksichtigt (Abbildung 3.1). Dafür erforderliche chemische Zusammensetzungen, Temperaturen, Umgebungs- und Prozessdaten sind Fachpublikationen und der Fachliteratur entnommen und repräsentativ aufbereitet.

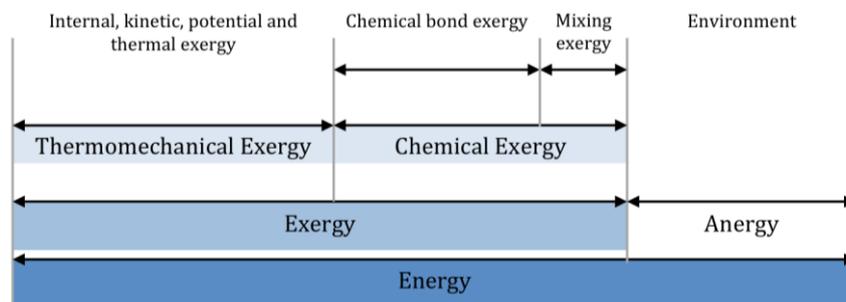


Abbildung 3.1: Formen der Exergie in Energie

Auf Basis des vollständigen Energieflussbildes werden Exergie- und Anergieflüsse berechnet. Aufbauend können Exergie-Zerstörung und Exergie-Effizienz der einzelnen Umwandlungsprozesse und Anwendungen bestimmt werden. Qualitätsverluste und unnötige Entwertungen der Energieträger gehen mit Exergie-Zerstörung einher und werden deutlich sichtbar. Zur visuellen Darstellung wird die kommerzielle Software eSankey! eingesetzt.

4 Ergebnisse

Abbildung 4.2 zeigt das vollständige Exergieflussbild Deutschlands für das Jahr 2011. Konventionelle Energieflussbilder beinhalten hauptsächlich Energieflüsse und Verluste. Exergieflussbilder hingegen zeigen die Exergieflüsse der Energieträger, die Exergieflüsse der Prozess-Verlustströme sowie alle Exergie-Zerstörungen. Verlust-Exergieflüsse repräsentieren die restliche Arbeitsfähigkeit im Verluststrom und einhergehend dessen Eignung für eine Energiekaskade. Exergie-Zerstörungen bewerten direkt die Qualität des Umwandlungsprozesses und sind ein Maß für die Entwertung der Energie. Wo hohe Exergie-Zerstörungen auftreten, wurden Energieformen hoher Qualität in Energieformen niedrigerer Qualität überführt und Arbeitsfähigkeit vernichtet. Dies geschieht vor allem in klassischen Verbrennungsprozessen.

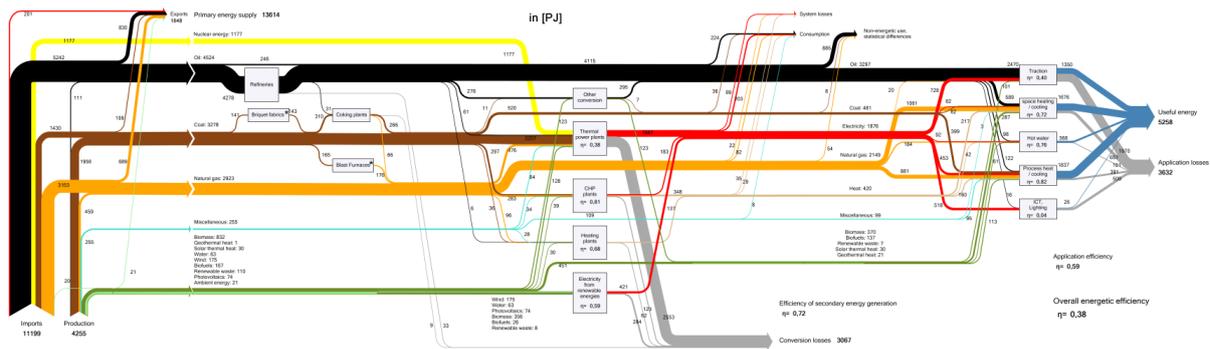


Abbildung 4.1: Vollständiges Energieflussbild Deutschlands (2011)

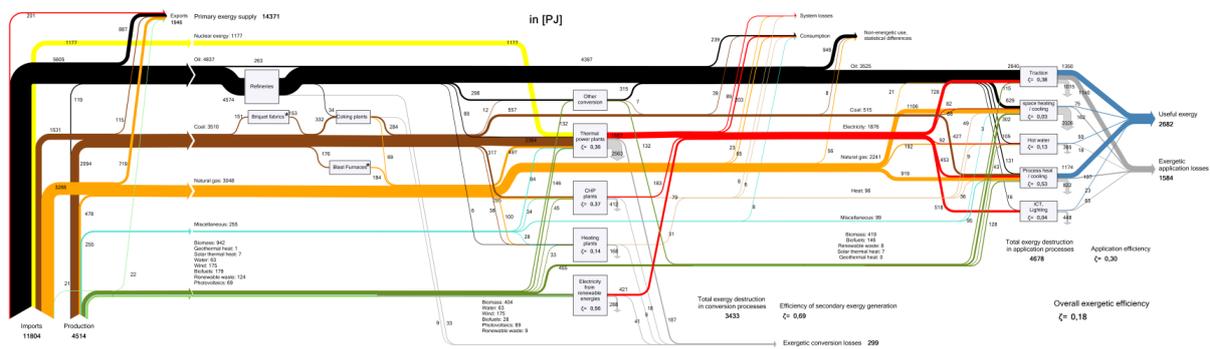


Abbildung 4.2: Vollständiges Exergieflussbild Deutschlands (2011)

Im Jahr 2011 wies Deutschland einen Primärenergieverbrauch von 14,37 PJ auf. Die tatsächliche, beim Verbraucher ankommende Nutzexergie belief sich auf 2,68 PJ. Die Exergieeffizienz Deutschlands lag damit bei lediglich 18%. Zum Vergleich: Die Primärenergieeffizienz lag bei 38% (Abbildung 4.1). Die grundlegende Aussage dieser Zahlen ist der fundamental falsche Einsatz hochwertiger Energieträger, wie Erdöl, Erdgas oder elektrischen Strom für niederqualitative Anwendungen. Speziell bei der Erzeugung von Niedertemperaturwärme, wie Raumwärme oder Warmwasser werden Exergie-Zerstörungen und die Imperfektion des Energiesystems sichtbar. Auch Heizwerke, KWK-Anlagen, Biomassekraftwerke und Anwendungen wie Beleuchtung und Traktion weisen einen deutlichen Optimierungsbedarf auf. Fast jeder direkt in Anwendungen eingesetzte Primärenergieträger führt zu hohen Exergie-Zerstörungen und damit zu unnötigen Energieentwertungen. Die vollständigen Flussbilder sind im Anhang in Abbildung A.1 und Abbildung A.1 vergrößert dargestellt.

5 Interpretation

Beim Vergleich der Exergie- und Energieflüsse fallen erhebliche Änderungen in Größe und Lage der Verlustströme sowie Wirkungsgrade auf. Dunkelgraue Ströme im Energieflussbild repräsentieren energetische Verluste. Im Exergieflussbild stehen hellgraue Ströme für Exergie-Zerstörungen und dunkelgraue für Restexergie in Verlustströmen. Die Umwandlungsprozesse Deutschlands weisen eine Gesamtexergieeffizienz von 69% auf, Applikationen hingegen nutzen insgesamt nur 30% der aufgewendeten Exergie.

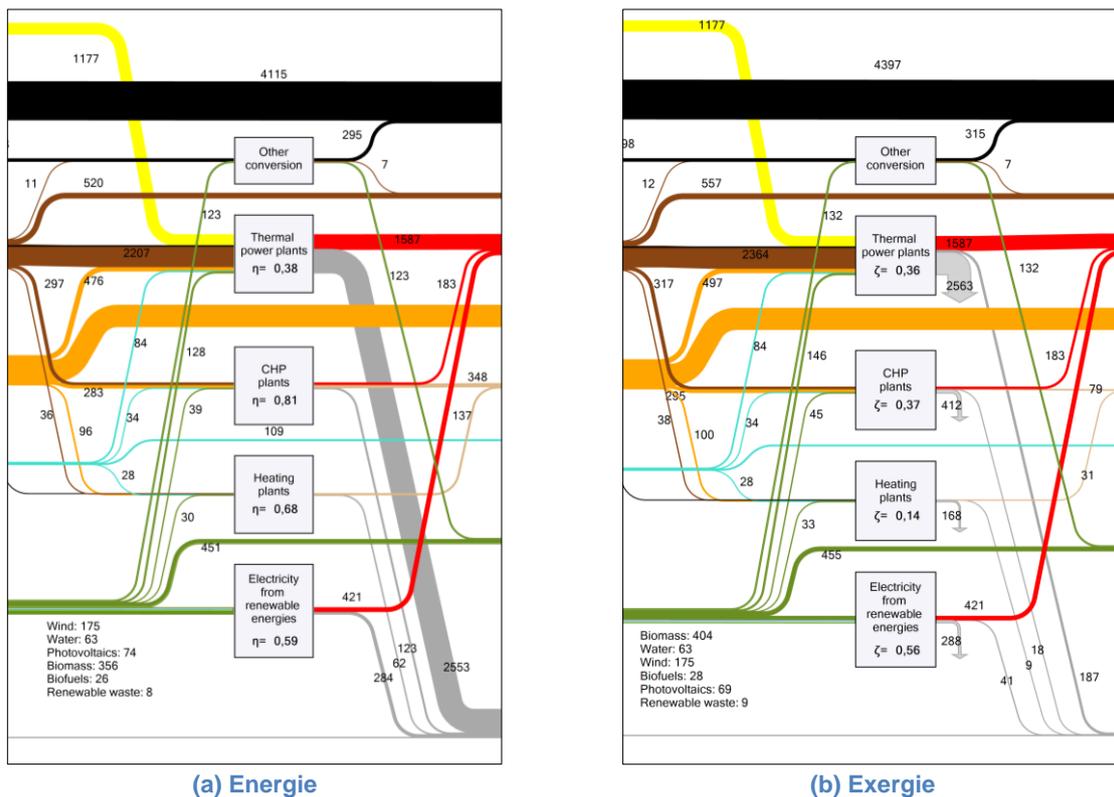


Abbildung 5.1: Energie- und Exergie-Flussbild von Umwandlungsprozessen in Deutschland (2011)

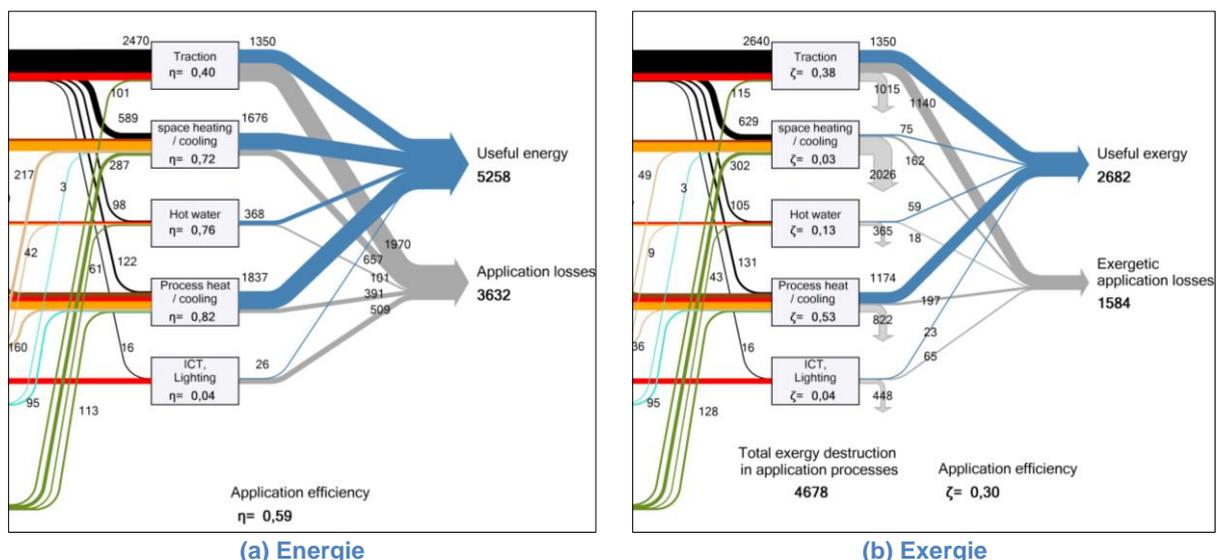


Abbildung 5.2: Energie- und Exergie-Flussbild von Applikationen in Deutschland (2011)

5.1 Optimierungspotentiale

Die energetischen Verluste der Umwandlungsprozesse entstehen hauptsächlich durch imperfekte oder nicht optimale Umwandlungsverfahren, speziell thermische Verbrennungen, und finden sich in Exergie-Zerstörungen wieder. Diese Verluste können lediglich durch Anhebung der Verbrennungstemperatur (GuD-Kraftwerke) oder Änderung des Umwandlungsverfahrens (Brennstoffzellen, etc.) vermindert werden. Der exergetische Wirkungsgrad von Heizkraftwerken ist denen normaler Kraftwerke sehr ähnlich. Dies liegt vor allem an der Wärme, die zwar in großer Menge erzeugt wird, aber qualitativ niederwertiger ist. Qualitätsverlust bei der Umwandlung erneuerbarer Energien entsteht allein durch die Verwendung von Biomasse als Energieträger, die ebenfalls thermisch verbrannt wird. Heizwerke zur Wärmeerzeugung sollten vermieden werden, da sie – trotz hohen energetischen Wirkungsgrads – mit nur 14% exergetischem Wirkungsgrad einen völlig falschen Einsatz der Primärenergieträger darstellen.

Die Anwendungstechnologien repräsentieren mit 4,678 PJ den größeren Teil der Exergie-Zerstörung Deutschlands. Mit nur 3% exergetischem Wirkungsgrad weist die Raumklimatisierung den wohl deutlichsten Unterschied zur energetischen Betrachtung (energetischer Wirkungsgrad von 72%) auf. Zur Erklärung kann nach Abbildung 1.1 festgehalten werden, dass Energieträger hoher Qualität und mit hohem Exergiegehalt unpassender Weise für Niedertemperaturanwendungen eingesetzt werden. Die hohe Arbeitsfähigkeit der Energieträger, wie Kohle, Öl, Gas und Strom, wird zum Großteil verschwendet. Obwohl dieser Fakt eventuell bereits bekannt ist, liefert die Exergieanalyse doch eine numerische Gewissheit und eine Basis zum Vergleich zwischen verschiedensten Technologien. Analog dazu können die Ergebnisse der Warmwasseraufbereitung betrachtet werden. Im Anwendungsfall „Traktion“ liegt die exergetische Effizienz minimal unter der energetischen, doch wird ähnlich viel Exergie zerstört wie im Verluststrom - dem heißen Abgas - noch enthalten ist. Der Einsatz von Elektromotoren würde eine erhebliche Verbesserung für den Anwendungsfall und auch das Gesamtsystem mit sich bringen. Obwohl die Prozesswärmeerzeugung bereits sehr effizient arbeitet, wäre die Abwärme zur Einspeisung in das Fernwärmenetz bestens geeignet. Eine Anpassung des Energieträgereinsatzes bietet aufgrund der hohen Betriebstemperaturen nur wenig Optimierungspotenzial. Die schlechte energetische sowie exergetische Effizienz der Beleuchtung, bedingt durch die Erhitzung des Glühfadens, könnte durch großflächige Einführung von LED-Lampen von 4% auf 20% verbessert werden.

5.2 Optimierungsstrategie

Die Exergieanalyse eignet sich ideal zum direkten Vergleich verschiedenster Technologien und Energieträger für bestimmte Zielprozesse. Zum Vergleich von Technologien für einen verketteten Prozess sind Betrachtungen der gesamten Energieumwandlungskette notwendig. Dazu ist die jeweilige kumulative Exergie-Effizienz vom Primärenergieträger über den Umwandlungs- und Applikationsprozess bis zur Nutzenergie zu berechnen. Erst ein Vergleich dieser liefert aussagekräftige Anhaltspunkte zur optimalen Auslegung des Gesamtsystems. In einer rein energetischen Optimierung wird auf das Verhältnis von Sekundärenergieträger zur Nutzenanwendung nicht eingegangen. Im Gegensatz dazu wird bei der exergetischen Optimierung Rücksicht auf die tatsächlich nötige Qualität der Nutzenergie

genommen. Die darauffolgende mathematische Optimierung verbindet Ansätze zur Energiekaskadierung, zum minimalen Energieverlust sowie zum minimalen Primärenergieträgereinsatz.

5.3 Exergie als Indikator für Umweltschäden

Die Exergie eines beliebigen Stromes ist gleichzusetzen mit dessen Fähigkeit, Arbeit gegenüber der Umgebung zu verrichten, also Änderungen in eben dieser Umgebung hervorzurufen. Weicht ein beliebiger Strom in mechanischer oder thermochemischer Weise von der Umgebung ab, hat er das Potential zur Veränderung dieser inne. Es ist dabei zwischen gebundener und freier Exergie zu unterscheiden. Fester Schwefel besitzt gebundene Exergie, doch wird er weder spontan mit der Umgebung reagieren noch sich mit ihr vermischen. Kohlenstoffdioxid hingegen hat kein Potential zur exothermen Reaktion, doch vermischt es sich mit der Umgebung und beinhaltet demnach freie Mischungsexergie. Würden Abströme eines Energiesystems exergetisch bewertet, könnten potentielle Umwelteinflüsse analysiert und numerisch ausgewertet werden. Rosen schlägt zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Prozessen einen Nachhaltigkeits-Index „SI“ vor, welcher die zerstörte und verlorene Exergie ins Verhältnis zur eingesetzten Exergie setzt (Rosen, 2007).

6 Fazit und Ausblick

Exergie-Analysen verfeinern die Ergebnisse konventioneller Energie-Analysen anhand qualitativer Merkmale und bieten eine Möglichkeit zur Eignungsuntersuchung des eingesetzten Energieträgers. Zusätzlich zeigen sie Potentiale zur Optimierung bereits vorhandener Prozesse auf. Bei einer rein energetischen Betrachtung kann ein Energiesystem auf ein Minimum quantitativer Verluste optimiert werden. Durch eine zusätzliche, exergetische Betrachtung wird die mathematische Basis zur optimalen Ausnutzung der vorhandenen Ressourcen gelegt. Potentielle Umwelteinflüsse könnten ebenfalls durch Exergie-Analysen numerisch klassifiziert und so ein Maß für deren Nachhaltigkeit geschaffen werden.

Zukünftige Planungen von Energiesystemen sollten der exergetischen „Bottom Up“ Strategie folgen. Hierbei wird der tatsächliche Bedarf quantitativ und qualitativ analysiert und anschließend durch kumulative Exergie-Analysen die optimale Versorgungsstruktur und der passende Energieträger ermittelt. Zur Einhaltung der quantitativen Energiebilanz werden die ermittelten Ergebnisse hochskaliert. Ein so ausgelegtes Energiesystem zeichnet sich durch den optimalen Einsatz möglicher Energiekaskaden, ein Minimum an hochqualitativen Primärenergieträgern und gleichzeitig ein Minimum an Primärenergieeinsatz aus.

Das Konzept der Exergie als Analysemethode bietet einen zweiten, qualitativen Blickwinkel und kann somit zur umfänglicheren Betrachtung und Optimierung von Energiesystemen beitragen.

7 Referenzen

- AGEB. (kein Datum). *Bilanzen 2011*. Von http://www.ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=7&clang=0 abgerufen
- AGEB. (kein Datum). *Satellitenbilanzen Erneuerbare Energien 2011*. Von http://www.ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=7&clang=0 abgerufen
- AGFW. (2012). *AGFW Hauptbericht 2011*. Von <http://www.agfw.de/zahlen-und-statistiken/agfw-hauptbericht/> abgerufen
- BMWi. (Juni 2013). *Energie Gesamtbilanzen 2011*. Von <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/energiedaten.html> abgerufen
- DWD. (212). *Jahresmitteltemperaturen 2011*. Von http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_windowLabel=T82002&_state=maximized&_pageLabel=_dwdwww_klima_umwelt_klimadaten_deutschland abgerufen
- Gutschi, C., Bachhiesl, U., & Stigler, H. (2008). Exergieflussbild Österreichs 1956 und 2005., *EnInnov08 "Energiewende."*
- Lindner, M. (2013). *The concept of exergy as an analysis method for countries and cities*. Master's Thesis, Technical University of Munich / Technical University of Graz, Institute for Energy Economy and Application Technology / Institute for Electricity Economics and Energy Innovation, Munich.
- OECD/IEA. (2005). *Energy Statistics Manual*. Von https://www.iea.org/stats/docs/statistics_manual.pdf abgerufen
- Rosen, M. A. (2007). The role of exergy in increasing efficiency and sustainability and reducing environmental impact.
- Statistik Austria. (2009). *Methodendokumentation Nutzenergieanalyse (NEA)*. Von http://www.statistik.at/web_de/static/subdokumente/r_energiebilanzen_methodendokumentation_nutzenergieanalyse.pdf abgerufen

Anhang

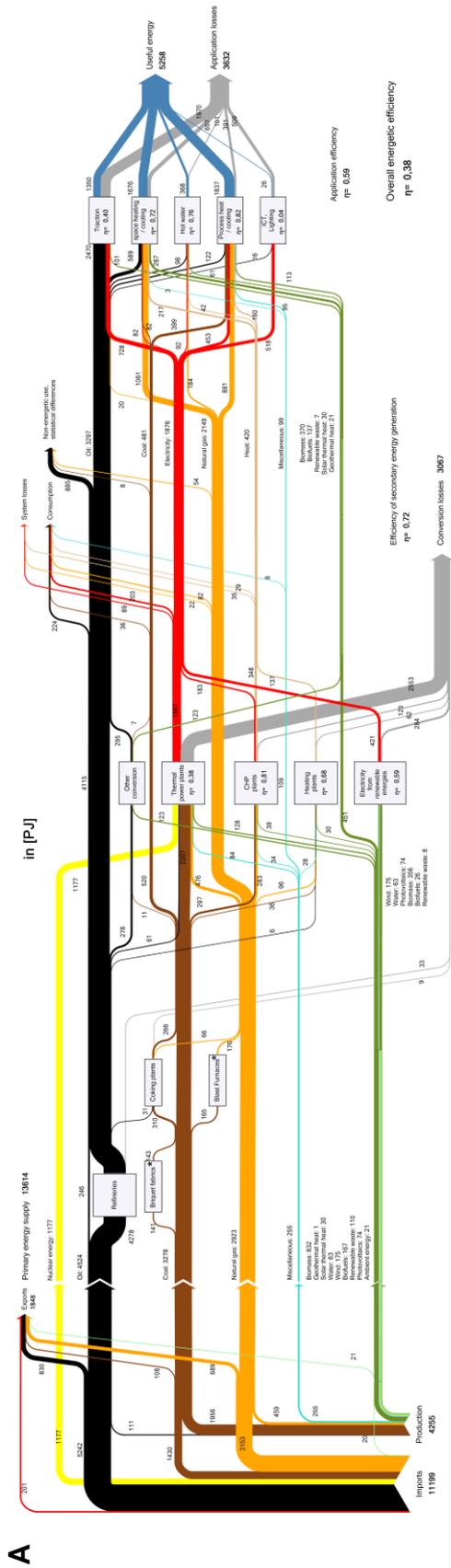


Abbildung A.1: Vollständiges Energieflussbild Deutschlands (2011, vergrößert)

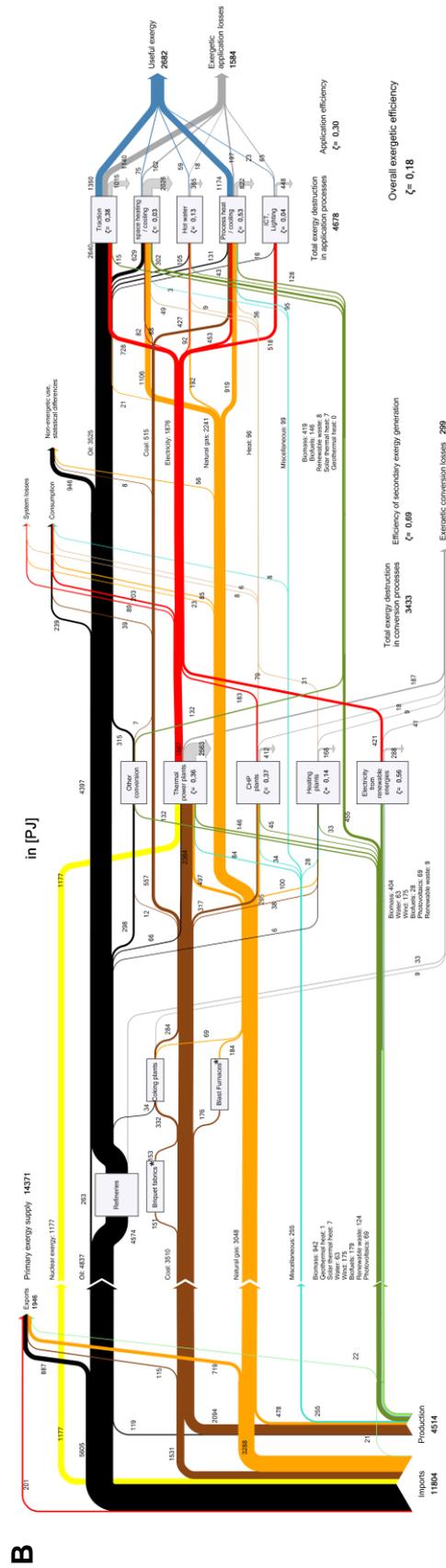


Abbildung B.1: Vollständiges Energieflussbild Deutschlands (2011, vergrößert)