

# DAS EXERGIEKONZEPT ALS ANALYSEMETHODE AM BEISPIEL DEUTSCHLANDS

\*Marco LINDNER<sup>1</sup>, Udo BACHHIESL, Heinz STIGLER

## Motivation

Die heutigen Energieversorgungs-Systeme 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. Die ursprünglichen Qualitätsmerkmale und Beschränkungen der Wandelbarkeit werden dabei ignoriert und ausgelassen. 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 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 eher unberücksichtigt. 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 Umwandelbarkeit fließen in Form von Entropie, chemischer Zusammensetzung und physikalischer Gesetze in die Bewertung ein. Dieser qualitative Ansatz kann unnötige Entwertungen sichtbar machen und Optimierungspotentiale des Energiesystems deuten. Das Exergieflussbild - als differenziertere Variante des Energieflussbildes - dient als Basis zur qualitativen Anpassung der Energieträger an die jeweilige Anwendung.

## Methodik

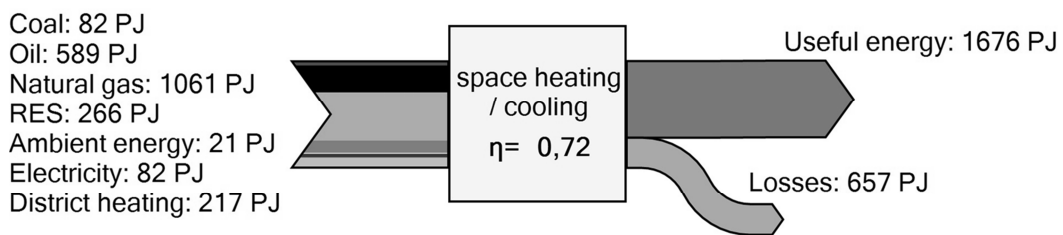
Die energetischen Ausgangsdaten für das betrachtete Jahr 2011 sind den Datenbanken und Bilanzen des BMWi, der AGEB sowie der AGFW entnommen, die Klimadaten zur Modellierung des exergetischen Referenzsystems stammen vom DWD. Bei der Bewertung erneuerbarer Energien und deren Erzeugungseffizienz wird sich am Verfahren der führenden, internationalen Komitees IEA, EUROSTAT und ECE orientiert, während die energetischen Wirkungsgrade zur Bestimmung der Nutzenergie an den Werten der STATISTIK AUSTRIA angelehnt sind. Zur einfacheren Anwendung werden exergetische Faktoren berechnet (Lindner, 2013), welche auf die üblichen Energiebilanzdaten und Energieflussbilder angewendet werden. Dafür nötige chemische Zusammensetzungen und Prozessdaten sind der Fachliteratur entnommen. Auf Basis der gesammelten Daten und des daraus erstellen, erweiterten Energieflussbildes Deutschlands werden unter Zuhilfenahme der exergetischen Faktoren Exergie- und Anergieflüsse berechnet. Folgend werden Exergie-Zerstörung und Exergie-Effizienz der einzelnen Umwandlungsprozesse und Anwendungen bestimmt und mit der Software eSankey! in Sankey-Diagrammen visuell dargestellt. Darauf aufbauend erfolgt eine kritische Diskussion hinsichtlich der Vorteile und Nützlichkeit einer Exergie-Analyse mit einhergehender Empfehlung möglicher Anwendung.

---

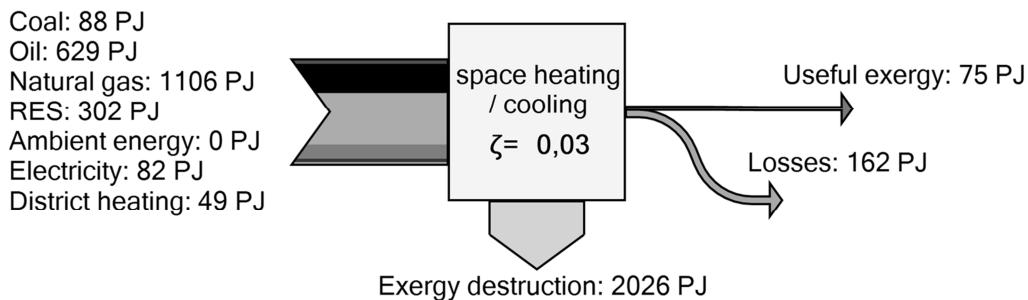
<sup>1</sup> Marco Lindner, E-Mail: [mlindner@r-com.de](mailto:mlindner@r-com.de), Telefon: +49-176-84364763; Alle Autoren: Technische Universität Graz, Institut für Elektrizitätswirtschaft und Energieinnovation, Inffeldgasse 18, A-8010 Graz, +43-316-873-7903, [www.IEE.TUGRAZ.at](http://www.IEE.TUGRAZ.at)

## Ergebnisse

Die Gesamtenergieeffizienz Deutschlands im Jahr 2011 liegt bei ungefähr 38%, während die Gesamtexergieeffizienz lediglich 18% beträgt. Einem Exergieaufwand von 14,37 PJ steht ein Exergienutzen von 2,68 PJ gegenüber. 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, wird die Exergie-Zerstörung 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. Es wird sprichwörtlich mit Kanonen auf Tauben geschossen.



### (a) Energiebilanz



### (b) Exergiebilanz

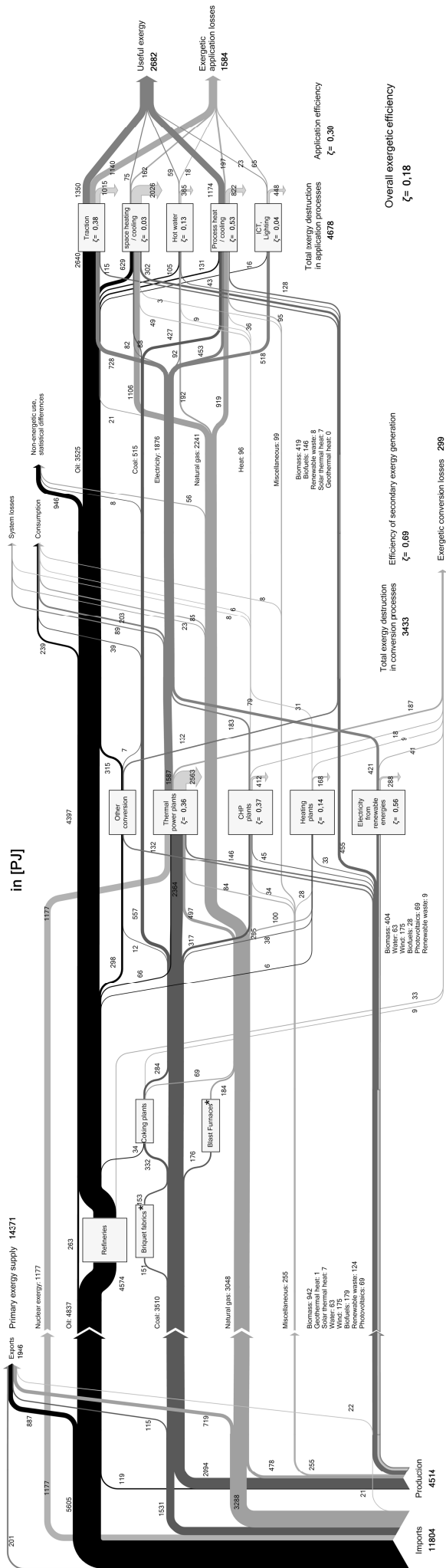
Figur 1.1: Bilanzierung der Anwendung "Raumklimatisierung" ( $T_u=10,56^\circ\text{C}$ )

Exergie-Analysen verfeinern die Ergebnisse konventioneller Energie-Analysen anhand qualitativer Merkmale und bieten die Möglichkeit, falschen Einsatz von hochqualitativen Energieträgern, potentielle Umwelteinüsse und Bedarf an Verbesserungen zu identifizieren. Zur Neuentwicklung von Energiesystemen können innovative und vielversprechende Technologien im Gesamtsystem betrachtet und exergetisch bewertet werden. Diese Analyse der kumulativen Exergie-Effizienz verspricht eine optimale Anpassung des Primärenergieträgers und der Umwandlungsverfahren zur jeweiligen Anwendung. Im Zuge dieser Optimierung kann zudem eine deutliche Verminderung der Treibhausgasemissionen und des Primärenergieeinsatzes erreicht werden.

## Referenzen

Gutschi, C.; Bachhiesl, U.; Stigler, H.: Exergieflussbild Österreichs 1956 und 2005. - in: EnInnov08 "Energiewende." (2008), S. 1 - 17

Lindner, M. (2013). *The concept of exergy as an analysis method for countries and cities*. Master's Thesis, Technical University of Munich, Institute for Energy Economy and Application Technology / Technical University of Graz, Institute for Electricity Economics and Energy Innovation.



Figur 1.2: Gesamtes Exergieflossbild Deutschlands für das Jahr 2011