

# Exergy is the Economy: Auswirkungen auf energiewirtschaftliche Fragestellungen zur Sektorenkopplung

Themenbereiche: (3) Integrierte Netze der Zukunft: Sektorenkopplung, (7) Verkehr: Elektrofahrzeuge, (8) Energie in Gebäuden: Demand Response im Wärme- und Kühlbereich

Gunnar KAESTLE<sup>1</sup>, Olaf SCHILGEN<sup>2</sup>

## 1 Einleitung

In der ökonometrischen Statistik ist eine hohe Korrelation des Energieeinsatzes bzw. genauer des Exergieverbrauchs im produktiven Prozess zu beobachten. Dies führte zu der Erkenntnis, dass Energie bzw. der exergetische Anteil als technische Arbeitsfähigkeit ein sehr potenter Produktionsfaktor ist. [1][2]

Eine Wirtschaftstheorie, die auf Basis von Geldeinheiten die Entwicklung des Outputs einer Volkswirtschaft als Summe aller Güter und Dienstleistungen misst, fußt nicht auf einer physisch messbaren Größe des betrachteten Objekts. Alle Preise beschreiben ein bestimmtes Verhältnis des einzelnen Gutes zum Bruttoinlandsprodukt (BIP). Alle in Geldwerten ausgedrückten Größen sind dabei relative, aber keine absolute Wertangaben. Die Inflation und damit die Preise werden durch einen Warenkorb bestimmt, wohingegen der Korb aller produzierten Güter und Dienstleistungen (BIP) mit inflationsbereinigten Preisen bewertet wird. Die Wertbeschreibung des BIP stellt somit einen Zirkelschluss dar. [4] Eine einheitliche und physisch messbare Referenzgröße jedes einzelnen Teils der Gesamtwirtschaft ist bislang nicht definiert. Die Frage nach einer solchen Referenzgröße wird von vielen als abwegig beschieden. [5]

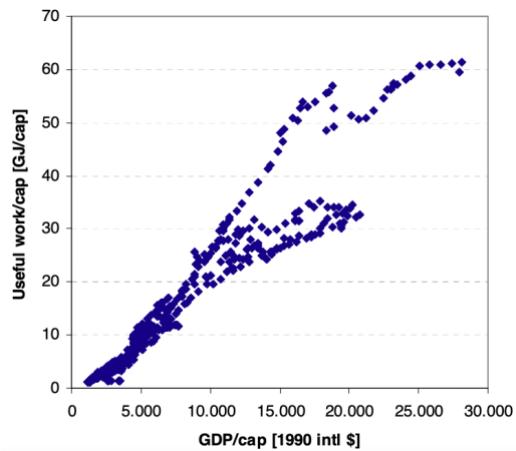


Abbildung 1: Wertschöpfung vs. Exnergieverbrauch (Bildquelle: [3])

## 2 These

Alle Bestandteile jedes Wirtschaftssystems besitzen genau eine einheitliche physische Eigenschaft – der Exnergieverbrauch im Produktionsprozess – der in Summe als Referenzwert für die Messung der realen Dynamik des jeweiligen Wirtschaftssystems dienen kann. Diese physische Größe ist im Zeitverlauf stabil. Damit kann diese real messbare Dimension als Basiseinheit für die Gesamtheit aller wirtschaftlichen Aktivitäten dienen.

Mit Hilfe dieser Überlegungen lassen sich optimierte Verknüpfungen zwischen den unterschiedlichen Energiesektoren bestimmen, um eine volkswirtschaftlich optimierte Kopplung von Energieinfrastrukturen zu realisieren. Das Werkzeug ist hierfür eine exergiebasierte Energiesystemanalyse. Um Verwechslung zwischen Energie- und Exergieeinheiten zu vermeiden, wird im Folgenden für die Exergie die Einheit Rant (Rt) statt Joule (J) verwendet. [6]

## 3 Sektorenkopplung

Aufgrund des hohen Potentials von Wind- und Solarenergie in Mitteleuropa, welche als Sekundärenergie elektrische Energie zur Verfügung stellen, ist es geboten, die Überschüsse aus dem Elektrizitätssektor in die anderen Sektoren zu verschieben und auch umgekehrt bei Defiziten elektrische Energie aus geeigneten Sektoren zu importieren. Dies können beispielsweise rückspeisende E-Fahrzeuge sein (Verkehrssektor), aber auch KWK-Anlagen zur Prozesswärmeproduktion (Industriesektor) bzw. in der leitungsgebundenen HeizwärmeverSORGUNG (Wärmesektor).

<sup>1</sup> Sägemüllerstraße 1, 38678 Clausthal-Zellerfeld, T: +49 5323 997724, E: [gunnar.kaestle@tu-clausthal.de](mailto:gunnar.kaestle@tu-clausthal.de)

<sup>2</sup> E: [wae@schilgen.com](mailto:wae@schilgen.com)

## 4 Merit Order

Bekannt ist die Merit-Order der elektrischen Energieerzeugung bei positiver Restlast, sortiert nach ihren Grenzkosten. Unter Restlast wird hier die nicht-disponibile Last abzüglich der nicht-disponiblen Erzeugung verstanden. Disponible Erzeuger und disponibile Lasten können preiselastisch die Restlast ausregeln. Ihre Flexibilität kann auch für die Stabilisierung von Frequenz und Spannung genutzt werden. Bei regenerativen Überschüssen wird empfohlen, die Merit-Order nach dem Grenznutzen der Verbraucher zu sortieren.

## 5 Exergie

Gemäß dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik ist die Energie eine Erhaltungsgröße, d.h. sie verbraucht sich nicht und wird auch nicht erzeugt, sondern wird nur von einer Energieart in die andere umgewandelt. Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik beschreibt die Qualität der Energie. Er ist auch als Entropiesatz bekannt, und besagt, dass diese Zustandsgröße stets zunimmt, und nur in speziellen isentropischen Vorgängen gleich bleibt, aber nie weniger werden kann. Eine Zunahme der Entropie ist mit einer Abnahme der technischen Arbeitsfähigkeit (Exergie) verbunden, was als Qualitätsverschlechterung der Energie zu werten ist. Bei der Wärme ist der Exergieanteil gleich dem Carnot-Faktor  $1 = T_1/T_2$ , elektrische, mechanische und chemische Energien haben 100% Exergieinhalt.

Alternativ zur Bestimmung der Grenzkosten in Geldeinheiten lassen sich diese auch exergetisch ausdrücken: ein hoher Grenznutzen ist gleichzusetzen mit geringen Exergieverlusten bei der Wandlung. Analog kann man den CAPEX auch als kumulierten Energie- bzw. Exergieaufwand definieren.

## 6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Neben geldflussbasierten volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen ist eine parallele Betrachtung der Energieflüsse in der Gesamtheit oder in Teilen von Wirtschaftssystemen auf Basis energiewirtschaftlicher Ansätzen erkenntnisvertiefend.

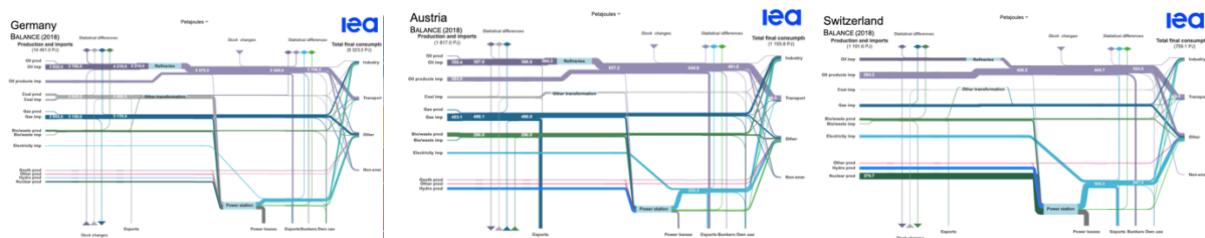


Abbildung 2: DACH-Energieflussdiagramme, Bildquelle: <https://www.iea.org/sankey>

Die Energiewende ist nicht nur geboten aus Sicht des End of Pipe Problems bzgl. der Treibhausgasemissionen, sondern es zeigt sich bei mengenmäßig begrenzten fossilen Brennstoffen auch ein Quellenproblem, was sich bei der Kurvendiskussion des logistischen Wachstums offenbart. Eine effiziente Ressourcenverwendung ist nicht nur im Energiesektor geboten, sondern auch bei mineralischen Rohstoffen, wie z.B. Kupfer, wo der Erzgehalt in abbauwürdigen Minen rückläufig ist und daher der Exergieaufwand der Förderung stetig steigt.

## Literatur

- [1] Reiner Kümmel, Dietmar Lindenberger, Wolfgang Eichhorn: Energie, Wirtschaftswachstum und technischer Fortschritt, Physikalische Blätter, Band 53, Nr. 9, September 1997, S. 869-875. <https://doi.org/10.1002/phbl.19970530908>
- [2] Robert Ayres, Benjamin Warr: Accounting for Growth: The Role of Physical Growth, INSEAD Working Paper, Center for the Management of Environmental Resources, Fontainebleau, 2002. [https://flora.insead.edu/fichierst\\_wp/inseadwp2002/2002-70.pdf](https://flora.insead.edu/fichierst_wp/inseadwp2002/2002-70.pdf)
- [3] Ayres, Eisenmenger, Krausmann, Schandl, Warr: Energy use and economic development: A comparative analysis of useful work supply in Austria, Japan, the United Kingdom and the USA during 100 years of economic growth. SURED 2008, Ascona (CH), 2008-06-02/05. [https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mtec/cer-eth/resource-econ-dam/documents/research/sured-2008/SURED-08\\_Ayres\\_Eisenmenger\\_Krausmann\\_Schandl\\_Warr.pdf](https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mtec/cer-eth/resource-econ-dam/documents/research/sured-2008/SURED-08_Ayres_Eisenmenger_Krausmann_Schandl_Warr.pdf)
- [4] Jürgen Elsässer: Goldrausch und Dollar-Kater, Telepolis, Heise-Verlag, November 2003-11-23. <https://heise.de/-/3432211>
- [5] Blair Fix, Jonathan Nitzan, Shimshon Bichler: Real GDP: The Flawed Metric at the Heart of Macroeconomics, real-world economics review, Issue 88, 2019-07-10. <http://www.paecon.net/PAEReview/issue88/whole88.pdf>
- [6] Zoran Rant: Exergie, ein neues Wort für »technische Arbeitsfähigkeit«, in: Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens (22) 1956/1, S. 36–37. <https://doi.org/10.1007/BF02592661>