

Exergieflussbild Österreichs 1956 und 2005

Christoph GUTSCHI, Udo BACHHIESL, Heinz STIGLER

Institut für Elektrizitätswirtschaft und Energieinnovation der TU Graz,
Inffeldgasse 18, 8010 Graz, Tel: 0316 873 7900, IEE@tugraz.at, www.IEE.tugraz.at

Keywords: Energieflussbild, Exergie, Exergieflussbild, Energiesystemoptimierung

1 Einleitung

Aufgrund der aktuellen Problemstellungen im europäischen Energiesystem, v.a. dem Treibhauseffekt, der Energieimportabhängigkeit und dem starken Anstieg der Energiepreise in den letzten Jahren, tritt die Notwendigkeit zur Steigerung der Energieeffizienz immer deutlicher in den Vordergrund. Als aktueller politischer und rechtlicher Rahmen wurde am 5. April 2006 die Energieeffizienzrichtlinie (Richtlinie 2006/32/EG) beschlossen. Im Zuge der Umsetzung dieser Richtlinie wird u.a. das Ziel genannt, in einem Zeitraum von 9 Jahren ein Energieeinsparziel von 9 % zu erreichen.

Zur Erfüllung dieses Zieles und weiterer noch ambitionierterer Ziele, wie z.B. der Steigerung der Energieeffizienz um 20 % bis 2020 gemäß dem EU-Aktionsplan für Energieeffizienz vom 19.10.2006, ist neben vielen individuellen Optimierungsschritten zur Steigerung der Effizienz bei der Energieanwendung insbesondere auch eine übergeordnete Optimierung des Gesamtsystems aus Energieaufbringung, Energieumwandlung, Transport und Energieanwendung von Nöten. Die erforderliche Neustrukturierung der Energiesysteme der EU-Länder hin zu mehr Effizienz und verstärkter Nutzung erneuerbarer Energieträger bedarf einer gesamtheitlichen Planung des Einsatzes der zur Verfügung stehenden Energiequellen, um die erwähnten Ziele zu erreichen.

Ein wichtiges Instrument für die gesamtheitliche Betrachtung und Analyse von Energiesystemen stellen Energieflussbilder dar, weil sie einen strukturierten Überblick über das Aufkommen und den Einsatz der unterschiedlichen Energieträger und Energieformen bieten und auch Informationen über die auftretenden Verluste bereitstellen. Für Österreich werden derartige Energieflussbilder in regelmäßigen Abständen von der Österreichischen Energieagentur [1] sowie von Statistik Austria [2,3] veröffentlicht. In Abbildung 1 ist das Energieflussbild Österreichs für das Jahr 2005 (basierend auf [1]) in vereinfachter Form dargestellt. Man erkennt, dass mit einem gesamten Energieaufkommen aus Importen und inländischer Erzeugung von insgesamt 1689 PJ abzüglich 225 PJ für Exporte und Lagerung ein Nutzenergiebedarf von lediglich 667 PJ bedient wird. Die Verluste bei der Energieumwandlung und -anwendung betragen in Summe 579 PJ und sind somit nahezu gleich hoch wie der Nutzenergiebedarf.

Anmerkung: Bei der Berechnung des Energieaufkommens und der Verluste wurde abweichend von [1] ein durchschnittlicher Nutzungsgrad der Stromerzeugung aus Wasserkraft von 85 % angenommen.

Energieflussbilder stellen ein unverzichtbares Werkzeug zur Darstellung der Zusammenhänge in einem Energiesystem dar. Als Nachteil muss jedoch angemerkt werden, dass alle Energieträger und Energieformen gleichwertig dargestellt werden. Die unterschiedliche wirtschaftliche und technische Bedeutung der einzelnen Energieträger wird in dieser Darstellung vernachlässigt. In der energiewirtschaftlichen Realität ist jedoch z.B. 1 kWh an elektrischer Energie als wesentlich höherwertig anzusehen als 1 kWh an gelieferter Fernwärme. Auch aus technischer Sicht kann z.B. Erdgas mit einem Heizwert von 1 kWh mit höherer Effizienz in elektrische Energie umgesetzt werden als etwa Kohle oder feste Biomasse mit einem Heizwert von 1 kWh.

2 Die technischen Arbeitsfähigkeit der Energie

2.1 Grundlagen

Eine wissenschaftlich fundierte Möglichkeit zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Eigenschaften einzelner Erscheinungsformen der Energie bietet die Betrachtung der technischen Arbeitsfähigkeit der Energie, heute Exergie genannt. Dabei wird berücksichtigt, dass unterschiedliche Energieformen in der Regel nicht vollständig in andere Energieformen umgewandelt werden können. Beispielsweise kann Erdgas oder elektrische Energie praktisch vollständig in Niedertemperaturwärme umgewandelt werden, Wärme kann jedoch niemals zu 100 % in elektrische Energie umgewandelt werden.

Energie besteht demnach aus einem vollständig in andere Energieformen umwandelbaren Anteil, der Exergie, und aus einem nicht in andere Energieformen umwandelbaren Anteil, der Anergie.

$$\text{Energie} = \text{Exergie} + \text{Anergie}$$

Die Exergie ermöglicht eine Beschreibung der theoretischen Umwandelbarkeit von Energieformen. So bestehen z.B. elektrische Energie und mechanische Energie zu 100 % aus Exergie, weil sie in idealisierten verlustlosen Maschinen theoretisch zu 100 % in alle anderen Energieformen umgewandelt werden können. Auch Brennstoffe (chemische Energie) und Strahlungsenergie haben einen sehr hohen Anteil an Exergie. Die Exergie eines Wärmestromes hängt hingegen von der Temperatur des Wärmestromes ab, je höher die Temperatur des Wärmestromes, desto höher ist die technische Arbeitsfähigkeit der übertragenen Wärmemenge. Gute Erläuterungen sowie Anleitungen zur Berechnung der Exergie unterschiedlicher Energieformen bieten die Lehrbücher von Baehr [4] und Bosnjakovic [5], diese dienen auch als Grundlage für die vorliegende Arbeit. Für das Verständnis der Exergie ist es von hoher Bedeutung, dass diese die theoretische Arbeitsfähigkeit gegenüber einer definierten Umgebung beschreibt. Die Exergie einer Energieform ist somit von den jeweiligen Umgebungsbedingungen, insbesondere der Außentemperatur, abhängig und daher keine Zustandsgröße.

2.2 Flussbild der technischen Arbeitsfähigkeit 1956

Der Nützlichkeits der exergetischen Betrachtung ist man sich in der Energiewirtschaft und der Wärmetechnik seit langem bewusst. Bereits in den Wiederaufbaujahren nach dem zweiten Weltkrieg wurde vom Bundesministerium für Handel und Wiederaufbau ein *Flussbild der*

Bedeutung die folgenden Umwandlungsschritte betrachtet: Gaserzeugung (aus festen Brennstoffen), Dampferzeugung, Wasserkraftwerke und thermische Kraftwerke, interessanterweise wurde die Dampferzeugung in thermischen Kraftwerken getrennt von der „thermischen“ Stromerzeugung dargestellt. Insgesamt war der Wirkungsgrad der thermischen Kraftwerke wesentlich geringer als heute. Die Gaserzeugung aus festen Brennstoffen hatte einen hohen Stellenwert, was sich auch in den Flussbildern widerspiegelt. Anders als in den heutigen Energieflussbildern wurden auch die Verluste bei der Umwandlung von Rohwasserkraft in elektrische Energie dargestellt. Bei der Energieanwendung wurde zwischen Wärme, mechanischer Energie, Chemie (nichtenergetische Verwendung) und Beleuchtung unterschieden, auf die Wärme entfielen mehr als 68 % des Endenergieverbrauchs.

Die größten exergetischen Verluste traten im *Flussbild der technischen Arbeitsfähigkeit der Energie* bei der Bereitstellung der Wärme sowie bei der Dampferzeugung auf. Aufgrund des hohen Anteils an Verbrennungskraftmaschinen betrug der Exergieverlust bei der Bereitstellung mechanischer Energie mehr als 56 %.

Die zielführende Betrachtungsweise des Flussbildes der „technischen Arbeitsfähigkeit der Energie“ wurde leider in den Folgejahren aufgrund der bis zur ersten Ölpreiskrise sehr niedrigen Energiepreise nicht mehr weiterverfolgt. Bis heute wird daher in Österreich nur mehr ein Energieflussbild erstellt.

3 Das Exergieflussbild Österreichs für das Jahr 2005

Um die exergetische Betrachtungsweise des österreichischen Energiesystems neu zu beleben, wurde basierend auf dem österreichischen Energieflussbild 2005 der Österreichischen Energieagentur [1] ein Exergieflussbild für das Jahr 2005 erstellt. Aufgrund der teilweise schlechten Verfügbarkeit der erforderlichen Ausgangsdaten wurden dazu folgende vereinfachenden Annahmen getroffen:

Für jede Energieträger-Kategorie wurde jeweils ein durchschnittliches Verhältnis von Exergie zu Energie angenommen, dieses wurde basierend auf Näherungsformeln von Baehr [4,7] ermittelt. Grundsätzlich weicht das Verhältnis von Exergie zu Energie bei allen Brennstoffen nur geringfügig vom Wert 1 ab. Aufgrund der vielen unterschiedlichen Brennstoffe und Brennstoffqualitäten in der Kategorie „Erneuerbare Energieträger“ wurde hier ein Verhältnis von 1,0 angenommen. Die angenommenen Verhältnisse sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Es ist zu beachten, dass die Exergie der fossilen Brennstoffe deren Heizwert übersteigt.

Tabelle 1: Gewählte Verhältnisse von Exergie zu Energie je Energieträgerkategorie

Energieträger	mittleres Verhältnis von Exergie zu Energie (Heizwert)
elektrische Energie	1
mechanische Energie (inkl. Wasser und Wind)	1
Kohle und Kohlederivate	1,047
(Erd)gas	1,027
Erdöl und Erdölderivate	1,048
Erneuerbare Energieträger (RES)	1

Schwieriger gestaltete sich die Ermittlung der Exergie im Bereich der End- und Nutzenergieanwendung. Aufgrund der oftmals fehlenden Detaildaten mussten hier stark vereinfachende Annahmen getroffen werden, diese sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Sofern nicht anders erwähnt, wurde von einer mittleren Umgebungstemperatur von 0 °C ausgegangen. Auf der Basis dieser Annahmen konnte das Exergieflussbild für Österreich für das Jahr 2005 erstellt werden, dieses ist in Abbildung 3 dargestellt.

Tabelle 2: Gewählte Verhältnisse von Exergie zu Energie je Energieeinsatz-Kategorie

Energieträger	vereinfachende Annahmen	mittleres Verhältnis von Exergie zu Energie (Heizwert)
Fernwärme	nur Wasser, kein Dampf Vorlauftemp: 130 °C Rücklauftemp: 60 °C	0,256
mechanische Energie (Verkehr, Standmotoren)	100 % Exergie	1
Raumheizung, Warmwasser, Klima	87 % ¹ Heizung: 22 °C ⇒ Faktor 0,075 13 % ¹ Warmwasser: 65 °C ⇒ Faktor 0,103	0,078
Beleuchtung, EDV	50 % d. Verbrauchs für Beleuchtung Strahler 2900 K, Umgebung 283 K ⇒ Faktor 0,867 ² 50 % EDV (Faktor 1,0 für el. Energie)	0,933
Elektrochemie	10 % exerget. Verlust	0,9
Dampferzeugung	anteilmäßig: 70 % ³ : 500°C, 100 bar 20 %: 250 °C, 12,5 bar 10 %: 150 °C, 3,5 bar Speisewasser 100 °C	0,455
Industrieöfen	63 % ⁴ : 1500 °C (Eisen, Stahl, Ziegel, ...) 12 %: 900 °C (Buntmetalle, Chemie, ...) 25 %: 300 °C (Lebensmittel, Textil, ...)	0,748

¹ vgl. Fachverband für Energiemarketing [8]

² siehe Bosnjakovic [5]

³ Schätzung des TÜV Österreich (Kesselprüfstelle), telefonische Auskunft

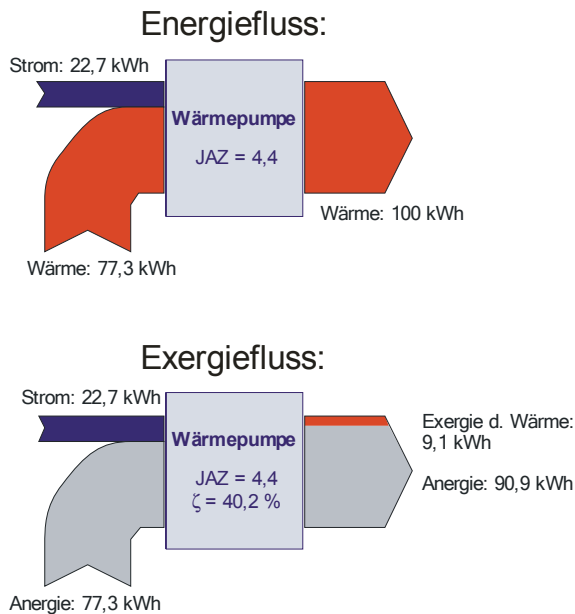
⁴ Verbrauchsanteile gemäß Nutzenergieanalyse 1998 [9]

Wenn man das auf diese Weise ermittelte Exergieflussbild mit dem Energieflussbild in Abbildung 1 vergleicht, so kommt man zu folgenden hauptsächlichen Erkenntnissen:

- Der exergetische Nutzungsgrad des österreichischen Energiesystems ist äußerst niedrig. Einem Exergieaufkommen von 1742 PJ steht ein exergetischer Nutzen von nur 374 PJ gegenüber.
- Die größte „Exergievernichtung“ tritt bei der Raumwärmeerzeugung und im Verkehr auf.
- Der mit Abstand höchste Nutzenergiebedarf besteht bei Raumwärme und Warmwasser, zugleich besteht Niedertemperaturwärme nur zu einem sehr geringen Anteil aus Exergie. In diesem Bereich wird durch den direkten Einsatz höchstwertiger Energieträger wie Erdgas und Heizöl EL sehr viel Exergie vernichtet. Die Bereitstellung von Fernwärme mittels KWK benötigt hingegen nur wenig Exergie und führt zu geringeren exergetischen Verlusten. Im Raumwärmebereich bietet sich weiters die verstärkte Nutzung von Umgebungswärme mittels Wärmepumpen an.
- Der größte Exergiebedarf besteht im Verkehr und bei Standmotoren.

Im Folgenden sollen einige Rückschlüsse aus der exergetischen Betrachtung des Energiesystems mittels Fallbeispielen untermauert werden.

3.1 Bereitstellung von Niedertemperaturwärme für Heizzwecke



Der Exergieverlust bei der Bereitstellung von Raumwärme kann durch die Nutzung von Wärmepumpen in Verbindung mit Niedertemperaturheizsystemen deutlich verringert werden. Dies wird anhand von Abbildung 4 demonstriert. Eine gute Wärmepumpe kann mindestens viermal soviel Niedertemperaturwärme (<10 % Exergie) liefern, wie sie an elektrischer Energie (100 % Exergie) aufnimmt. Die restliche Wärme kann aus der Umgebung (100 % Anergie) bereitgestellt werden. Dadurch können exergetische Nutzungsgrade bis zu 40 % erreicht werden. Wärmepumpen können somit zur Optimierung des Energiesystems beitragen.

Abbildung 4: Energie- und Exergieflussbild für eine Heizungswärmepumpe (VL/RL = 35/20, 0 °C Umgebungstemp.)

3.2 Der optimale Einsatz fester Biomasse im Energiesystem

Die Nutzung erneuerbarer Energieträger wird in den letzten Jahren immer stärker forciert. Im Falle der Nutzung fester Biomasse (Holz, Rinde, Pellets etc.) waren in den letzten Jahren in Österreich hauptsächlich zwei Trends festzustellen. Einerseits wird feste Biomasse vermehrt zur Erzeugung von Raumwärme eingesetzt. Dies erfolgt bedarfsgerecht v.a. mittels dezentraler Pelletskessel oder im Rahmen lokaler Nahwärmenetze. Andererseits wurden in den letzten Jahren auch große Biomasse-Kraftwerke gebaut, welche mittels zentraler Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) ganzjährig Strom und Wärme zur Verfügung stellen. In beiden Fällen können durch den Einsatz fester Biomasse fossile Energieträger wie Erdgas oder Heizöl substituiert werden, die derzeit zur Verfügung stehende feste Biomasse reicht jedoch bei weitem nicht aus, um in der Strom- oder Wärmeerzeugung fossile Energieträger vollständig ersetzen zu können.

In der Folge sollen diese beiden Anwendungsfälle einer exergetischen Analyse unterzogen werden. Dabei werden die in Tabelle 3 angegebenen Richtwerte herangezogen.

Fall 1: Bereitstellung von Niedertemperaturwärme

Im ersten Fall wird die Bereitstellung von Niedertemperaturwärme für ein Heizsystem mit Temperaturen von 70 °C im Vorlauf (VL) und 50 °C im Rücklauf (RL) in einem mit Erdgas bzw. Pellets befeuerten Kessel verglichen. Man erkennt, dass der Biomassekessel sowohl bei energetischer als auch bei exergetischer Betrachtung dem Erdgaskessel gleichwertig ist. Hinzu kommen jedoch die praktischen Vorteile fester Biomasse, dass ein speicherbarer

Energieträger vorliegt und der Betreiber des Heizkessels nicht von einem Netzbetreiber abhängig ist.

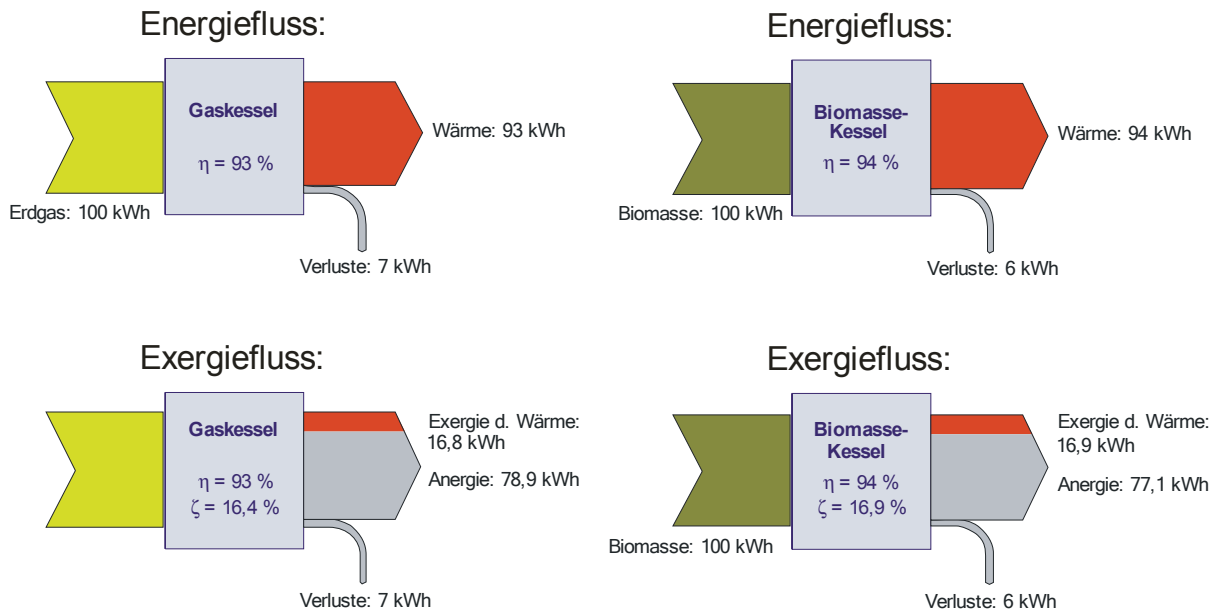


Abbildung 5: Gegenüberstellung des Energieflusses und Exergieflusses in einem typischen Gaskessel bzw. Biomassessel für ein Heizsystem (VL/RL = 70/50 °C, Außentemperatur 0 °C)

Tabelle 3: Richtwerte zum Vergleich von fester Biomasse und Erdgas beim Einsatz in zentralen Großkraftwerken sowie in dezentralen Heizungskesseln.

	Strom- erzeugung (KWK)	Gesamt- wirkungsgrad	nur Wärme- erzeugung (Brennwert)	Emissionen (CO ₂ -Äquivalente) der Energiebereitstellung ¹ (inkl. Vorkette)		Investitionskosten	
				Strom (Groß-KW)	Wärme (Klein-Kessel)	Strom (Groß-KW)	Wärme (Klein-Kessel)
				η _{el}	η _{KWK}	η _{th}	g/kWh _{el}
	%	%	%				
Biomasse	36 ² (23)	80 ²	91-96 (103) ³	~5 (~14)	~12 (~25)	ca. 2.200 ²	500-675 ³
Erdgas	58 ⁴ (48)	86 ⁴	92-94 (104-109)	~450 (~530)	~200 (~260)	500-600 ⁵	120-280 ⁶

¹ PROBAS, prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente (Deutschland)

² vgl.: Bachhiesl M., Gockner L.: *Energetische Nutzung von Holz im größten Wald-Biomasse-Kraftwerk Österreichs – Von der Projektidee bis zur Realisierung*, EnInnov06, Graz, 2006.

³ vgl.: [http://www.energyagency.at/\(de\)/publ/pdf/pelletsessel_marktuebersicht.pdf](http://www.energyagency.at/(de)/publ/pdf/pelletsessel_marktuebersicht.pdf)

⁴ vgl.: <http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/BE275.pdf>

⁵ vgl.: IEA: Projected Costs of Generating Electricity, 2005 Update

⁶ vgl.: http://www.ecotopten.de/prod_gasbrennwert_prod.php

Fall 2: KWK in zentralen Großkraftwerken

Im zweiten Fall wird der Einsatz in einem zentralen Großkraftwerk betrachtet. Hier schneidet die Biomasse-KWK aus energetischer Sicht nur geringfügig schlechter ab als ein Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerk (GuD), weil in beiden Fällen durch die Kraft-Wärme-Kopplung ein hoher Gesamtwirkungsgrad erreicht wird. Der höheren Stromerzeugung im GuD-Kraftwerk steht eine höhere Wärmeerzeugung im Biomasse-Kraftwerk gegenüber, rein energetisch betrachtet sind beide Energieformen gleichwertig. Die exergetische Analyse zeigt jedoch auf, dass der geringe Exergieinhalt der Fernwärme die geringere Stromerzeugung nicht aufwiegen kann, da elektrische Energie vollständig als Exergie anzusehen ist. Bei der Stromerzeugung in einem GuD-Kraftwerk treten daher weniger exergetische Verluste auf als in einem Biomasse-Kraftwerk.

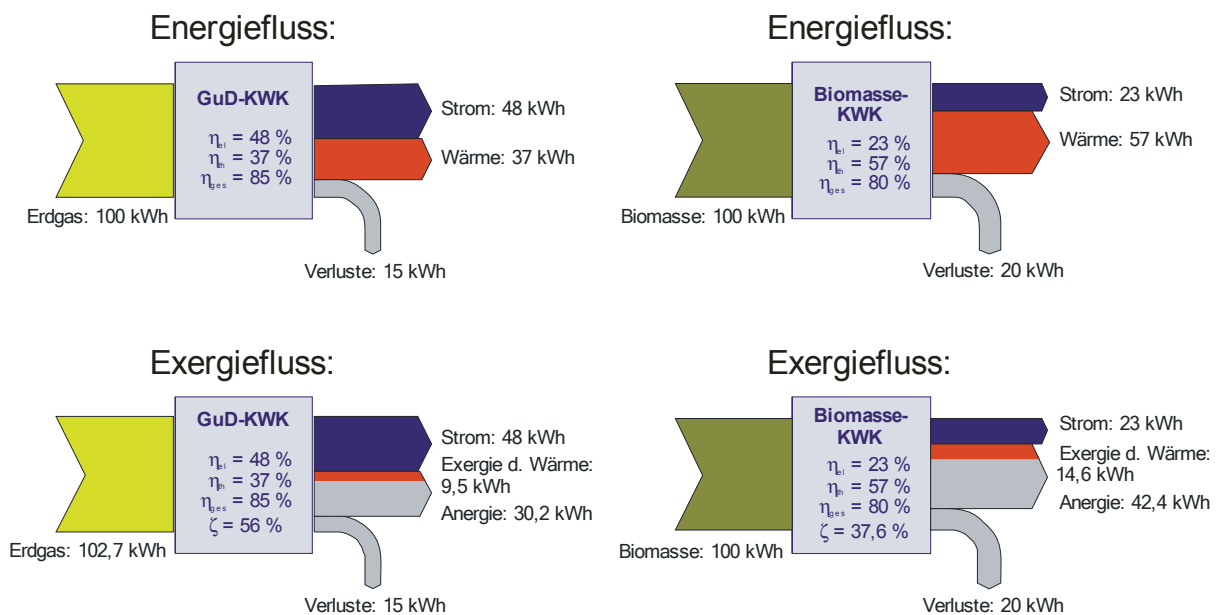


Abbildung 6: Gegenüberstellung von Energiefluss und Exergiefluss in einem Erdgas-GuD-Kraftwerk bzw. einem Biomasse-KWK-Kraftwerk (Fernwärme: VL/RL = 130/60 °C, Außentemperatur 0 °C)

Schlussfolgerung:

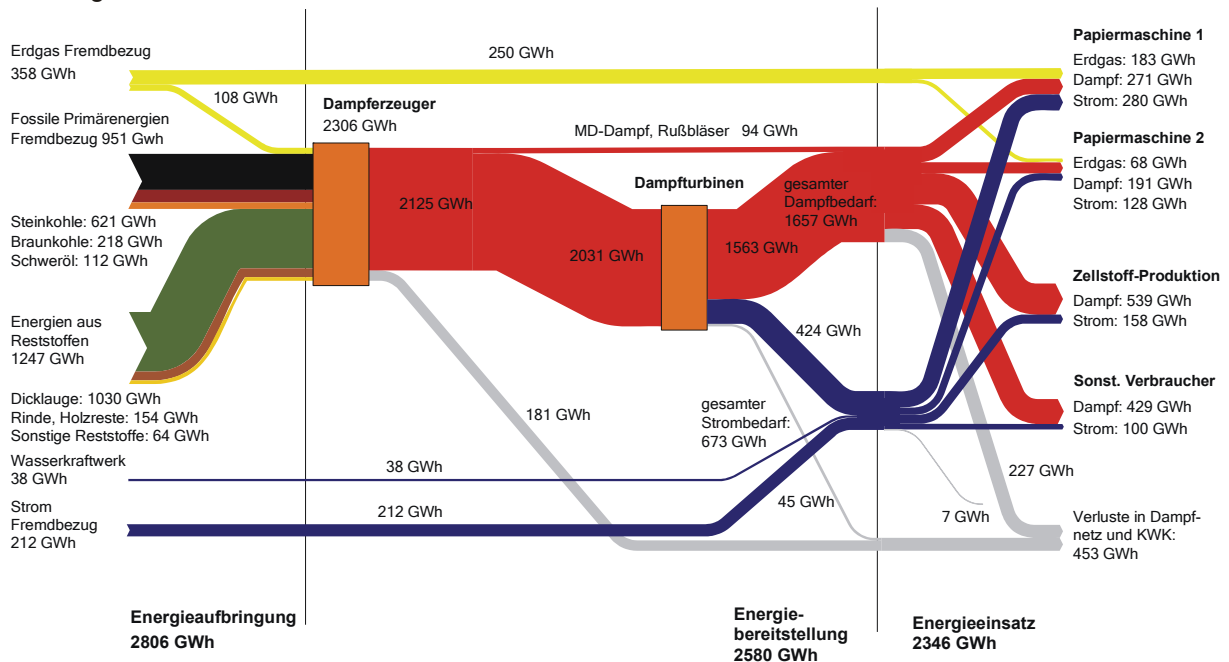
Die beiden Fallbeispiele zeigen auf, dass feste Biomasse für die Bereitstellung von Niedertemperaturwärme ebenso gut geeignet ist wie Erdgas. Bei der Stromerzeugung mittels KWK fallen jedoch in einem GuD-Kraftwerk wesentlich weniger exergetische Verluste an als in einem Biomasse-Kraftwerk. Somit ist der Einsatz der Biomasse zur Bereitstellung von Niedertemperaturwärme vorzuziehen und der Einsatz von Erdgas als Brennstoff zur Stromerzeugung.

3.3 Nachteile der exergetischen Betrachtungsweise

In den vorigen Kapiteln wurden die Vorteile der exergetischen Analyse dargestellt. Jedoch sind mit der exergetischen Betrachtungsweise des Energiesystems auch einige Nachteile verbunden, welche bisher die weitere Verbreitung dieses wertvollen Instruments behindert haben. Von besonderer Relevanz sind die folgenden Punkte:

- Der Begriff der Exergie ist für den Laien nur schwer verständlich. Dies gilt insbesondere für den Exergiegehalt von Wärmeströmen und Brennstoffen.
- Der Exergieinhalt von Wärme- und Stoffströmen kann oftmals nur durch aufwendige Berechnungen ermittelt werden. Zur Berechnung sind in der Regel Daten erforderlich, welche oftmals nicht in ausreichender Qualität zur Verfügung stehen.
- Bei der überschlagsmäßigen Bestimmung der Exergie chemischer Brennstoffe können größere Fehler auftreten als bei der Schätzung von Heizwerten. Oftmals wird daher die Exergie eines Brennstoffs mit dessen Brennwert oder Heizwert gleichgesetzt, wobei in der Regel ebenfalls nur geringe Fehler auftreten (kleiner 5 %).
- Die exergetische Bewertung liefert für Brennstoffe und elektrische Energie beinahe gleich hohe Exergieanteile. Der höheren technischen und wirtschaftlichen Bedeutung der elektrischen Energie wird somit nicht Rechnung getragen.
- Der hohe Exergieinhalt chemischer Brennstoffe ist nur theoretisch nutzbar. Dazu könnten heute nur Brennstoffzellen herangezogen werden, welche jedoch aufgrund technischer und wirtschaftlicher Nachteile derzeit in der Energiewirtschaft keine Option darstellen. Bei der herkömmlichen Verbrennung von Energieträgern treten jedoch unvermeidbar hohe Exergieverluste auf. Weitere Exergieverluste treten bei der Erzeugung von Hochdruckdampf auf, was heute in der Industrie jedoch den Stand der Technik darstellt. Dies wird anhand des Exergieflussbildes einer Papierfabrik in Abbildung 7 ersichtlich. In diesem Betrieb werden unterschiedliche Brennstoffe in mehreren Kesseln zur Erzeugung von Hochdruckdampf mit mehr als 500 °C und 115 bar herangezogen. Obwohl die energetischen Verluste deutlich unter 10 % betragen, geht bei der Erzeugung dieses hochenergetischen Dampfes mehr als 50 % der eingesetzten Exergie verloren. In den Gegendruckdampfturbinen, in denen der Hochdruckdampf in Niederdruckdampf (150 °C) und elektrische Energie umgewandelt wird, treten hingegen vergleichsweise geringe Exergieverluste auf.

Energiefluss:



Exergiefluss:

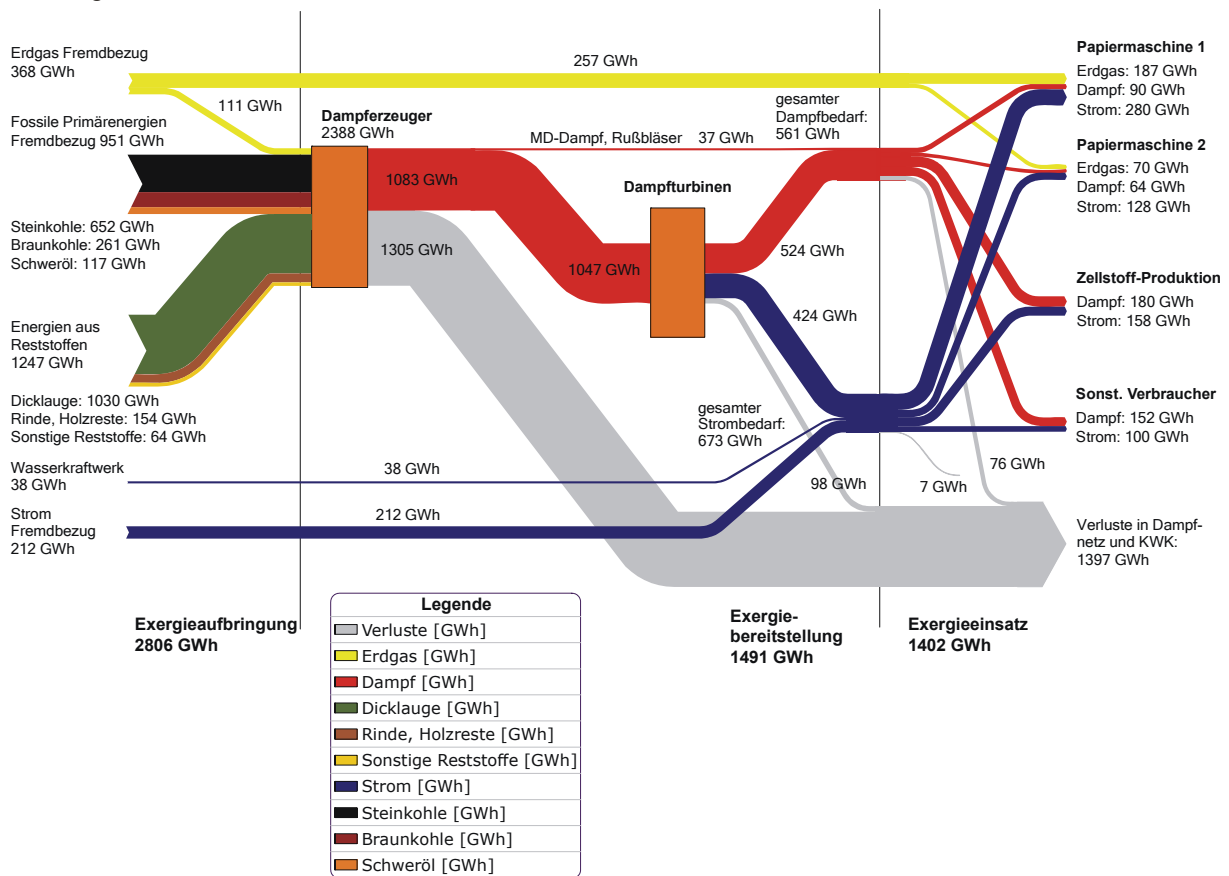


Abbildung 7: Gegenüberstellung von Energiefluss und Exergiefluss in einer österreichischen Papierfabrik im Jahr 2005 (vgl. Liebmann [10])

4.2 Flussbild der „technischen Umsetzbarkeit“ der Energie unter Berücksichtigung des aktuellen Stands der Technik

Die Autoren dieser Arbeit schlagen ein Flussbild der „technischen Umsetzbarkeit“ vor, in dem der Stand der Technik beim Einsatz unterschiedlicher Energieträger zur Stromerzeugung berücksichtigt wird. Auf diese Weise können viele der unter Punkt 3.3 genannten Nachteile der exergetischen Betrachtungsweise vermieden werden. Dieses Flussbild wird gleich ermittelt wie das Exergieflussbild, jedoch werden die chemischen Brennstoffe Kohle, Öl, Gas und Biomasse sowie die mechanischen Energien von Wasserkraft und Windkraft nicht entsprechend ihrer Exergie berücksichtigt, sondern stattdessen mit dem Wirkungsgrad gewichtet, welcher beim Kondensationsbetrieb in einem dem derzeitigen Stand der Technik entsprechenden Kraftwerk erreicht werden kann. Alle anderen Energieströme werden gemäß ihrem Exergiegehalt berücksichtigt. Die zur Gewichtung der Primärenergieträger herangezogenen Faktoren sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Gewichtungsfaktoren für Energieträgerkategorien zur Ermittlung des Flussbild der „technischen Umsetzbarkeit“

Energieträger	mittleres Verhältnis von Exergie zu Energie (Heizwert)
elektrische Energie	100 %
mechanische Energie von Wasser- und Windkraft	87 %
Kohle und Kohlederivate	45 %
(Erd)gas	58 %
Erdöl und Erdölderivate	55 %
Erneuerbare Energieträger (RES)	40 %

Das auf diese Weise ermittelte Flussbild der „technischen Umsetzbarkeit“ der Energie ist in Abbildung 9 dargestellt. Es bietet eine Betrachtung des Energiesystems aus dem Blickwinkel der Stromerzeugung. Nicht der Heizwert des Energieträgers ist hier von Interesse, sondern die Menge an elektrischer Energie, welche daraus erzeugt werden könnte. In diesem Flussbild nähern sich die dargestellten Breiten des Energieflusses der unterschiedlichen Energieträger auch ihrer ökonomischen Bedeutung an, weil heute an den Energiemärkten oftmals ein Zusammenhang zwischen den Preisen für Primärenergieträger und elektrischer Energie über den Wirkungsgrad der Stromerzeugung besteht. Die bei der Stromerzeugung in Wasserkraftwerken, thermischen Kraftwerken und KWK angegebenen Verluste stellen die Einsparungsmöglichkeiten dar, die durch eine Erneuerung, Revitalisierung bzw. Modernisierung des Kraftwerksbestands erzielt werden könnten. Die bei der Energieanwendung dargestellten Verluste entsprechen nicht den exergetischen Verlusten sondern sind ein Maß für den Verlust an „technischer Umsetzbarkeit“ infolge der Nutzexergiebereitstellung.

Anmerkung: Beim Vergleich des Flussbilds der „technischen Umsetzbarkeit“ mit dem Energieflussbild bzw. dem Exergieflussbild ist zu beachten, dass in Abbildung 9 ein anderer Maßstab gewählt wurde als in den Abbildungen 1 und 3.

5 Resümee

Zur Bewältigung der anstehenden Aufgaben im Energiesystem – v.a. der geforderten Steigerung der Effizienz des Gesamtsystems – ist es erforderlich, neue Wege abseits der bekannten Lösungsvorschläge zu beschreiten. Das Auffinden innovativer Herangehensweisen an Probleme erfordert oftmals die Änderung des Blickwinkels auf die vorhandenen Problemstellungen. Dies ist auch im Energiebereich der Fall, wo die energetische Betrachtungsweise des Energieträgereinsatzes lange Zeit fast ausschließlicher Standard war. Mittels innovativer Analysewerkzeuge wie z.B. dem Einsatz von Exergieflussbildern können neue Sichtweisen auf die aktuellen Problemstellungen des Energiesystems geboten werden, wodurch auch neue Lösungsansätze entstehen können.

Das Exergieflussbild Österreichs für das Jahr 2005 verdeutlicht drastisch die derzeitige Exergievernichtung im Bereich der Raumwärmebereitstellung. Der Einsatz höchstwertiger Energieträger wie Heizöl EL oder Erdgas wäre für die Erzeugung von Niedertemperaturwärme oftmals nicht nötig, weil die gleiche Energiedienstleistung mit Hilfe von Wärmepumpen oder durch Fernwärme aus hocheffizienter KWK mit wesentlich geringerem Exergieverlust bereitgestellt werden könnte.

Die exergetische Analyse bietet auch eine Hilfestellung bei der Frage der optimalen Integration erneuerbarer Energieträger in das bestehende Energiesystem. Bei Betrachtung eines Verbrauchssystems von Strom und Wärme, in dem die Aufbringung zu einem großen Anteil durch die fossilen Energieträger Öl und Gas und zu einem kleineren Teil durch biogene Energieträger erfolgt, stellt sich die Frage nach der optimalen Strategie des Einsatzes der unterschiedlichen zur Verfügung stehenden Energieträger zum Erreichen eines optimalen Nutzungsgrads des Gesamtsystems. So sollten hochenergetische, leicht transportierbare Brennstoffe wie Öl und Gas bevorzugt zur Stromerzeugung in großen KWK-Anlagen herangezogen werden und weniger zur Erzeugung von Niedertemperaturwärme. Biomasse hingegen erfordert beim Einsatz zur Stromerzeugung unverhältnismäßig aufwändige Anlagen, deren Investitionskosten einen ganzjährigen Betrieb unabhängig von der tatsächlichen Nachfrage nach der dabei als Kuppelprodukt anfallenden Wärme verlangen. Andererseits kommen beim Einsatz von fester Biomasse zur Erzeugung von Niedertemperaturwärme die relativen Vorteile der guten Speicherbarkeit und sicheren Handhabung zur Geltung.

Exergieflussbilder sind ein nützliches Instrument zur Analyse von Energiesystemen, jedoch existieren noch weitere Möglichkeiten der Betrachtung eines Energiesystems, wie z.B. das Wertflussbild der Energiewirtschaft oder das Flussbild der „technischen Umsetzbarkeit“ unter Berücksichtigung des Stands der Technik zur Bewertung der praktischen Bedeutung verschiedener Energieträger. Je mehr unterschiedliche Betrachtungsmöglichkeiten zur Analyse eines Energiesystems herangezogen werden können, umso erfolgreicher kann die Optimierung des Systems durchgeführt werden.

6 Literatur

- [1] Mader S.: *Energieflussbild Österreich 2005*, Österreichische Energieagentur und Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, 2007.
- [2] Statistik Austria: *Statistisches Jahrbuch Österreichs 2008*, Wien, 2007.
- [3] Statistik Austria: *Energiebilanzen 1970 – 2006*, Wien, 2007.
- [4] Baehr H.D., Kabelac S.: *Thermodynamik. Grundlagen und technische Anwendungen*, Springer, Berlin, 12. Auflage, 2005.
- [5] Bosnjakovic F., Knoche K. F., *Technische Thermodynamik*, Springer 1998.
- [6] Bundesministerium für Handel und Wiederaufbau: *Österreichische Energiebilanz für das Jahr 1956*, Kommissionsverlag der österreichischen Staatsdruckerei, Wien, 1958.
- [7] Baehr H.D.: *Die Exergie der Brennstoffe*, Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK) 31, 1979, Nr. 7 Juli 1979.
- [8] Fachverband für Energiemarketing: *Struktur des Endenergieverbrauches, 2002*; (für Deutschland) www.hea.de
- [9] Statistik Austria: *Nutzenergieanalyse 1998*, Wien 2000.
- [10] Liebmann L.: *Energetische Betrachtung eines Unternehmens der Papierindustrie*, Bakkalaureatsarbeit, TU Graz, 2007.