

ExergyFingerprint

Neues Bewertungswerkzeug für Energieversorgungsszenarien

Das Fraunhofer Umsicht hat mit dem ExergyFingerprint ein neues Bewertungswerkzeug für Energieversorgungsszenarien entwickelt. Die mit Energiebedarf und -verbrauch verbundene Exergie wird in dieser Darstellung in Energie und Qualität aufgeteilt. Der ExergyFingerprint kann unter anderem helfen, die exergetischen Vorteile der Kraft-Wärme-Kopplung einfach und verständlich darzustellen. Die Autoren stellen das Bewertungswerkzeug anhand verschiedener Szenarien vor.

Die Europäische Union hat beschlossen, die Energieeffizienz bis 2020 um 20 % zu erhöhen, die Kohlendioxid-Emissionen um 20 % zu senken und den Anteil erneuerbarer Energien am Primärenergieeinsatz auf 20 % auszubauen. Hohe Energieeffizienz, niedrige spezifische Kohlendioxid-Emissionen und der Einsatz erneuerbarer Energien sollen zu einer Reduktion der Treibhausgasemissionen und des Ressourcenverbrauchs beitragen.

Wird eine Primärenergiequelle durch eine andere ersetzt, so ist die Bewertung der dadurch verursachten Veränderungen verhältnismäßig einfach. Soll jedoch Wärme, die durch Verbrennung eines Primärenergieträgers erzeugt wird, durch Wärme aus Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) ersetzt werden, so wird es notwendig, der Wärme einen Anteil der notwendigen Primärenergie zuzuweisen, welche für die gekoppelte Strom- und Wärmeproduktion aufgewendet werden muss. Die Grundlage für diese Zuordnung kann beispielsweise eine energetische oder ökonomische Basis sein. Die Wahl der Zuordnungsmethode gestaltet sich jedoch schwierig, da die bisher üblichen Bewertungsmethoden die Realität der Kraft-Wärme-Kopplung unvollständig abbilden und es somit schwierig ist, die

Vorteile der Kraft-Wärme-Kopplung eindeutig zu quantifizieren.

An der Schwierigkeit der Bewertung von Fernwärme aus Kraft-Wärme-Kopplung wird deutlich, dass die drei oben genannten Zielkriterien der EU für 2020 noch keine umfassende Bewertung aller Technologieoptionen erlauben. Insbesondere die Berücksichtigung der qualitativen Aspekte verschiedener Energieformen findet sich in den genannten Kriterien nicht direkt wieder. Es

erscheint daher sinnvoll, die Wandelbarkeit einer gegebenen Energieform in mechanische Arbeit als zentrales Qualitätskriterium in die Betrachtung mit einzubeziehen. Da mechanische Arbeit theoretisch verlustfrei in jede andere Energieform wandelbar ist, kann sie als Maß für die höchste erreichbare Energiequalität angesehen werden. Im Gegensatz dazu ist Wärme auch theoretisch nur begrenzt in andere Energieformen überführbar und damit von minderer Qualität.

Die Berücksichtigung des Qualitätsaspekts der verschiedenen Energieformen kann helfen, das übergeordnete Ziel einer maximalen Einsparung von fossiler und erneuerbarer Primärenergie kostengünstig zu erreichen. Der vom Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (Umsicht), Oberhausen, entwickelte ExergyFingerprint verbindet dabei eine innovative Bewertungsme-

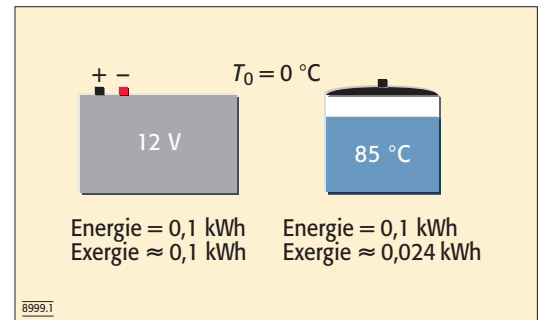


Bild 1. Vergleich von Energie- und Exergieinhalt verschiedener Energiespeicher

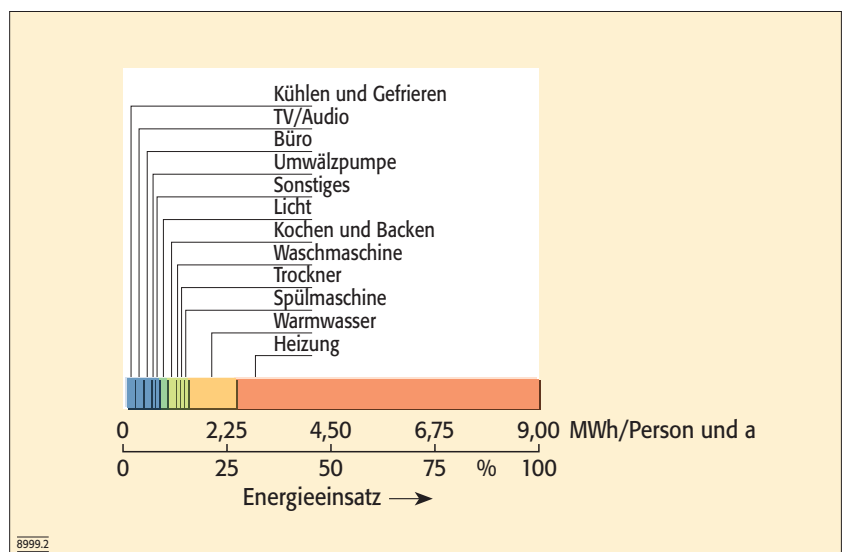


Bild 2. Eindimensionale Darstellung des Nutzenergiebedarfs (dNeb) eines deutschen Durchschnittshaushalts (dNeb = rd. 9 MWh je Person und Jahr)

Andrej Jentsch, Dr. Christian Dötsch, Carsten Beier und Stefan Bargel, Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (Umsicht), Oberhausen

thode für Bedarfs- und Verbrauchsszenarien, welche die Wandelbarkeit von Energie explizit erfassbar macht, mit einer transparenten grafischen Darstellung.

Darstellung des Energiebedarfs in zwei Dimensionen

Die Grundlage der entwickelten Bewertungsmethode ist das Exergiekonzept. Exergie bezeichnet dabei die maximale Arbeit, die aus einem betrachteten System im Zusammenspiel mit der Umwelt theoretisch gewonnen werden kann. Der mit einem System verbundene Exergiewert ist wie auch die innere Energie des Systems eine Zustandsgröße und damit technologieunabhängig. Da die Exergie stets eine Eigenschaft der Gesamtheit aus betrachtetem System und Umwelt ist, bietet es sich an, die Exergie als »verbunden« mit einem System zu bezeichnen.

Insbesondere bei der Energieform Wärme unterscheidet sich die Exergie, die mit einem System verbunden ist, von der Energie des Systems (Bild 1).

Ein Kilogramm heißes Wasser bei 85 °C hat, bezogen auf einen Referenzzustand von 0 °C, eine (innere) Energie von rd. 0,1 kWh, während die mit dem Wasser verbundene Exergie für den gegebenen Referenzzustand nur rd. 0,024 kWh – weniger als 1/4 – beträgt.

Im Gegensatz dazu hat eine Batterie, die 0,1 kWh elektrische Arbeit gespeichert hat, auch gleichzeitig 0,1 kWh Exergie gespeichert, und das unabhängig von der Temperatur der Umwelt. Natürlich kann die in der Batterie gespeicherte Energie in Form von Strom vielseitiger und effizienter genutzt werden (z. B. um einen Motor anzutreiben) als das heiße Wasser, welches in der Praxis nur noch zu einfachen Wärmezwecken eingesetzt werden kann.

Die exergetische Betrachtung berücksichtigt sowohl die Größe des betrachteten Systems als auch dessen Wandelbarkeit in mechanische Arbeit, die im Folgenden Wandelbarkeit genannt wird. Dieser Aspekt macht es schwierig, allein anhand eines bestimmten Exergiewerts festzustellen, ob das damit verbundene System eine hohe Wandelbarkeit und geringe Größe besitzt oder eher groß ist, jedoch nur eine geringe Wandelbarkeit aufweist. Beispielsweise hätte auch ein System

Nutzenergieklasse	Verbrauchsart		Gesamtanteil % ¹	Qualität (Wandelbarkeit) Referenz: 0 °C
Strom		Anteil am Stromverbrauch		
	Kühlen und Gefrieren	31	2	100
	TV/Audio	22	2	100
	Büro	23	2	100
	Diverse	15	1	100
	Umwälzpumpe	9	1	100
Summe bzw. Mittelwert		100	8	100
Licht			2	100
Prozesswärme		Anteil an der Prozesswärme		
	Kochen	43	2	48
	Spülen	18	1	18
	Waschen	18	1	26
	Trocknen	21	1	22
Summe bzw. Mittelwert		100	5	33
Warmwasser			12	13
Raumwärme			74	7

¹ des durchschnittlichen Nutzenergiebedarfs (dNeb)

Tafel 1. Verbrauchsdaten eines deutschen Durchschnittshaushalts

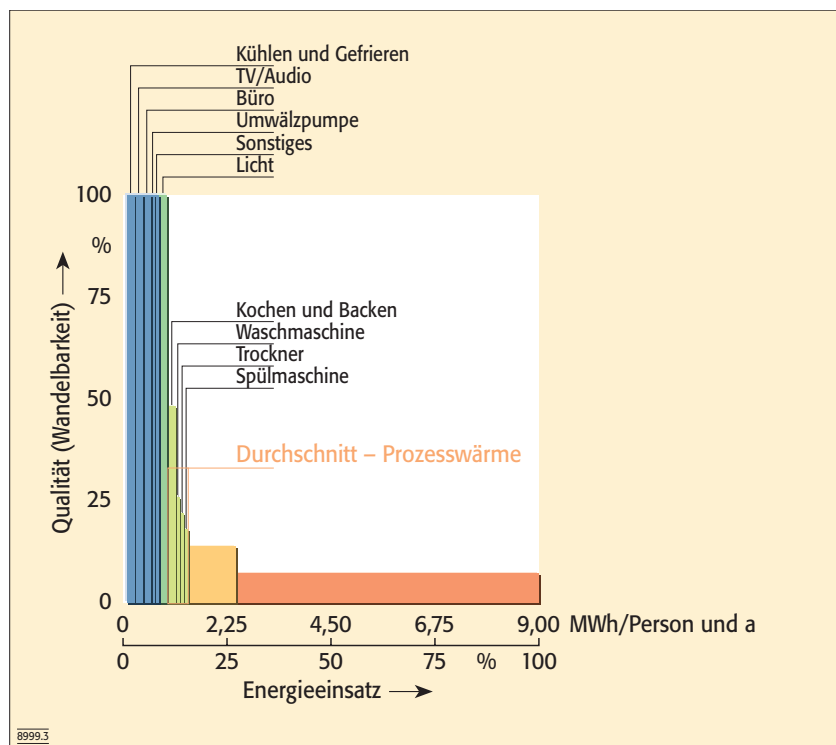


Bild 3. Zweidimensionale Darstellung des Nutzenergiebedarfs eines deutschen Durchschnittshaushalts (dNeb = rd. 9 MWh je Person und Jahr) für eine Referenztemperatur von 0 °C

mit 4,2 kg heißem Wasser bei 85 °C den Exergieinhalt von 0,1 kWh.

Bei der hier vorgestellten Methode wird daher die Qualität getrennt von der Quantität berechnet, wobei

die universelle Anwendbarkeit für verschiedene Energieformen gewahrt bleibt. Die Methode ermöglicht es, die mit einem System verbundene Exergie in eine mit dem

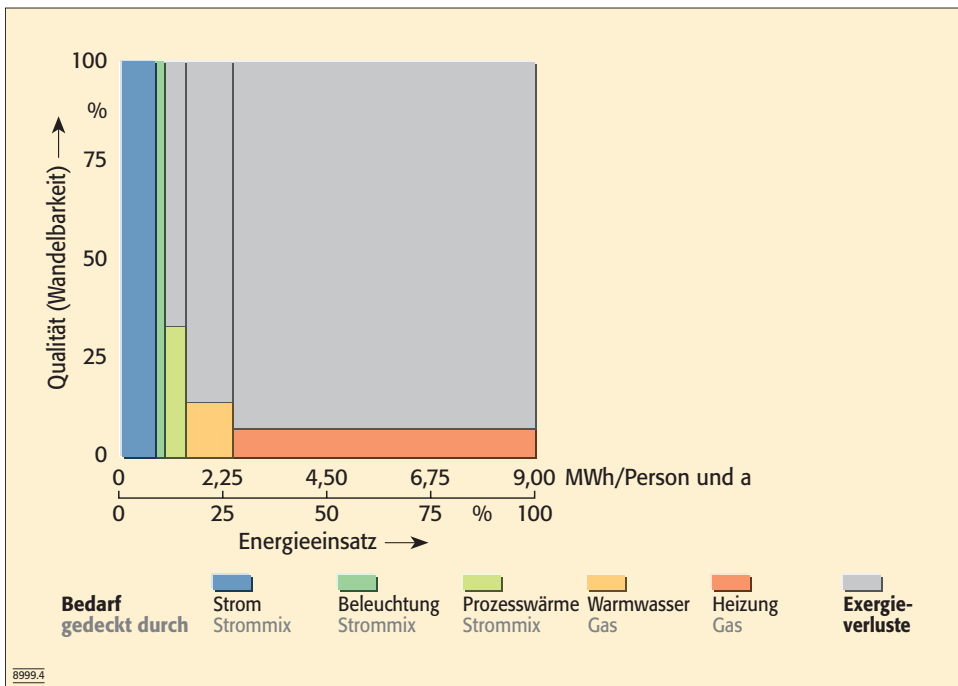


Bild 4. Zweidimensionale Darstellung des Nutzenergiebedarfs eines deutschen Durchschnittshaushalts ($dNeb = rd. 9 \text{ MWh}$ je Person und Jahr) bei Versorgung mit Gas-Brennwertkessel für eine Referenztemperatur von 0°C

System verbundene Energie und eine Wandelbarkeit aufzuteilen, wobei die Energie den quantitativen und die Wandelbarkeit den qualitativen Anteil der Exergie darstellt. Das Produkt aus der mit dem System verbundenen Energie und der Wandelbarkeit ergibt die mit dem System verbundene Exergie. Da die Wandelbarkeit ein Maß für die Qualität der Energie ist (hochwertig = hohe Wandelbarkeit) wird im Folgenden vereinfacht von der (exergischen) Qualität gesprochen. Die Wandelbarkeitsmethode bildet die Grundlage für die Darstellung und Bewertung von Bedarfs-/Versorgungsszenarien im ExergyFinger-Print. Für das betrachtete Kilogramm Wasser ergibt sich die Wandlungsenergie¹ von rd. $0,1 \text{ kWh}$ und eine Qualität (Wandelbarkeit) von rd. 24% bei einer Referenztemperatur von 0°C . Die Qualität (Wandelbarkeit) zeigt auf den ersten Blick, wie wertvoll die betrachtete Energie ist.

Mit der Wandelbarkeitsmethode kann nun die Bewertung von Energiesystemen genauer und anschaulicher vorgenommen werden. In Bild 2 ist der energetische Bedarf eines deutschen Durchschnittshaushalts je Person und Jahr dargestellt. Um die Übersichtlichkeit zu erhöhen, wurden die Werte auf den durchschnittlichen Nutzenergiebedarf² ($dNeb$) bezogen, der in Deutschland bei rd. 9 MWh je Person und Jahr liegt.

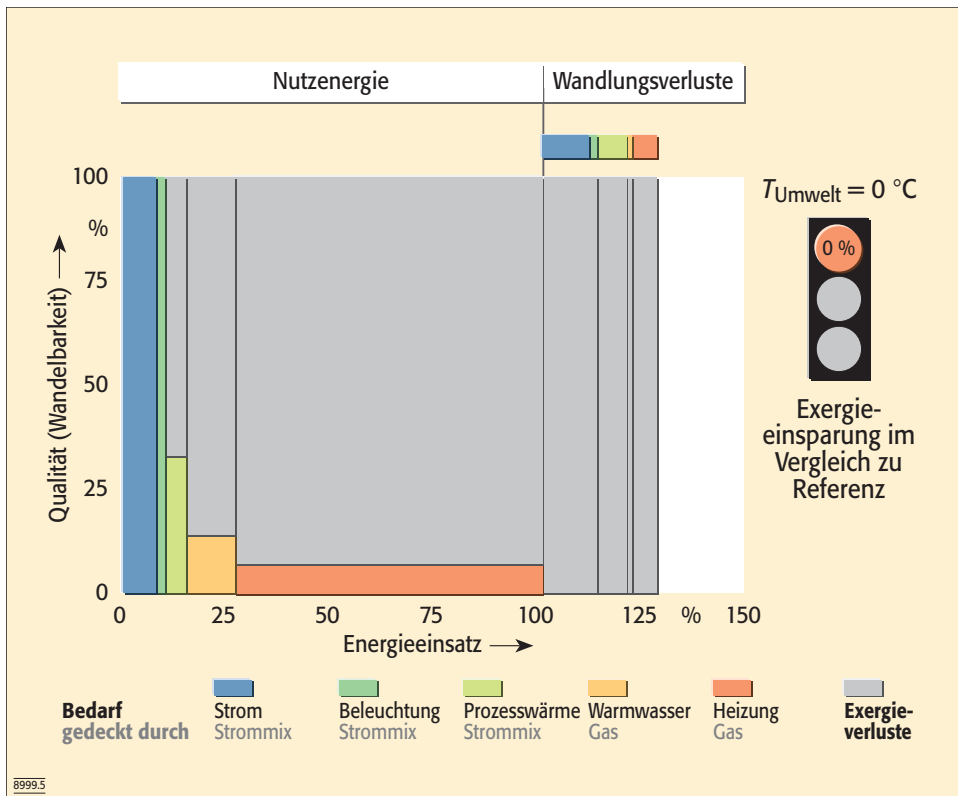


Bild 5. ExergyFingerPrint für einen deutschen Durchschnittshaushalt* Versorgungsszenario: Erdgas-Brennwertkessel = Referenz-Szenario Benötigte Investitionen: Erdgas-Brennwertkessel

* durchschnittlicher Exergieverbrauch: $11,3 \text{ MWh}$ je Person und Jahr; der Exergie-einsatz entspricht der Summe allen ausgefüllter Flächen; $dNeb = rd. 9 \text{ MWh}$ je Person und Jahr

¹ Für einfache Fälle der Betrachtung von Brennstoffen und Wärmeströmen reicht es im Allgemeinen aus, die Wandlungsenergie als die Energiedifferenz zwischen Umgebung und betrachtetem System zu verstehen. Für bestimmte Energieformen (z. B. massefreie Wärmeströme) lässt sich die Wandelbarkeit als das Verhältnis der mit dem Energiestrom verbundenen Exergie zur transferierten Wärme verstehen. Da die thermodynamische Herleitung umfangreich ist und nicht wesentlich zum besseren Verständnis des ExergyFingerprints beiträgt, wird an dieser Stelle auf eine genaue Darstellung der Wandelbarkeitsmethode verzichtet.

² Für eine instruktivere Darstellung wurden hier für die Bereiche Kühlen und Beleuchtung statt der Nutzenergien die ins Haus gelieferten Endenergien (elektrischer Strom) dargestellt. Diese Vereinfachung basiert auf der Annahme, dass Kühlung und Beleuchtung nicht mit alternativen Energieformen bereitgestellt werden können. Streng genommen ist dies nicht richtig, für die Betrachtung eines Haushalts erscheint diese Vereinfachung jedoch legitim, da beispielsweise thermisch betriebene Kühlschränke nicht üblich und kaum wirtschaftlich darstellbar sind.

Es wird deutlich, dass der größte Anteil des Energiebedarfs durch Heizung und Warmwasserbereitung verursacht wird. Das aus *Bild 2* ableitbare Optimierungspotenzial liegt dementsprechend vor allem in der Reduzierung des Heizbedarfs, wenn angenommen wird, dass zum Erhalt eines modernen Lebensstandards der Warmwasserverbrauch nicht reduziert werden kann.

Tafel 1 zeigt die *Bild 2* zugrunde liegenden Daten. In der rechten Spalte Qualität (Wandelbarkeit) wird erkennbar, dass insbesondere die Versorgung mit Heizungswärme und Warmwasser eine nur geringe Qualität der Versorgungsenergie erfordern. Die hier angegebenen Werte von 7 bzw. 13 % stellen dabei jeweils den theoretisch fundierten Mindestbedarf an Qualität für diese Versorgungsaufgaben dar, die in der Praxis jedoch nur annähernd erreicht werden können.

Nutzenergiebedarf und Qualität (Wandelbarkeit) werden im *Bild 3* – dem ExergyFingerprint-Bedarfsdiagramm – kombiniert dargestellt. Es wird ersichtlich, dass Energie nicht eindimensional ist, sondern dass auch die Wertigkeit der Energie berücksichtigt werden sollte.

In *Bild 3* wird an der *x*-Achse erkennbar, dass der größte Anteil des Nutzenergiebedarfs (wie bereits in *Bild 2* dargestellt) durch Heizung und Warmwasser gestellt wird. Durch die Verwendung der Wandelbarkeit als Maß für die Qualität der Energie auf der *y*-Achse ist jedoch festzustellen, dass dieser Bedarf auf einem sehr niedrigen Qualitätsniveau vorliegt. Da die Qualität des Energiebedarfs multipliziert mit dem benötigten Nutzenergieanteil dem Exergieanteil der Nutzenergie entspricht, ist der Exergiebedarf für jede Versorgungsaufgabe an der Größe der entsprechend eingefärbten Fläche zu erkennen. Hierbei wird an der ähnlichen Größe der blauen und der roten Fläche deutlich, dass, obwohl der Strombedarf (blau) nur bei 8 % des Nutzenergiebedarfs liegt, der Exergiebedarf für diese Anwendungen in etwa so groß ist, wie für die Heizung (rot).

Weiterhin wird in *Bild 3* deutlich, dass die Prozesswärme auf unterschiedlichen Qualitätsniveaus benötigt wird, jedoch insgesamt nur 5 % des gesamten energetischen Bedarfs ausmacht. Für die Darstellungen in den Bildern 4 bis 9 werden daher zur Vereinfachung die

Szenario	Heizbedarf kWh/(m ² · a)	Versorgung	Investitionen / Voraussetzungen
Referenz	160	Gas-Brennwertkessel, Strommix	Gas-Brennwertkessel,
1	160	KWK Fernwärme	Wärmenetz und Heizkraftwerk (HKW)
2	160	KWK LowEx Fernwärme	Wärmenetz und modernes GuD-HKW
3	40	Gas-Brennwertkessel	Dämmung und Isolierverglasung, Gas-Brennwertkessel
4	40	KWK LowEx Fernwärme	Dämmung und Isolierverglasung, Wärmenetz und modernes GuD-HKW

Tafel 2. Übersicht über die Spezifikationen der diskutierten Szenarien

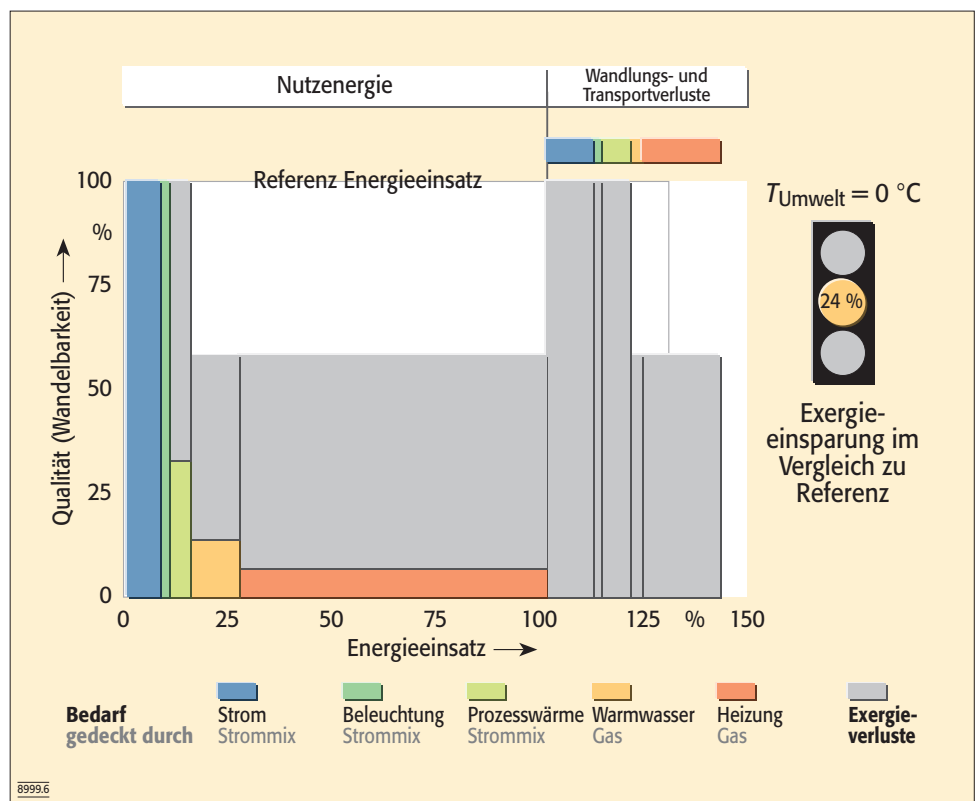


Bild 6. ExergyFingerprint für einen deutschen Durchschnittshaushalt*
Szenario 1: konventionelle Kraft-Wärme-Kopplung
Benötigte Investitionen: Heizkraftwerk und Fern- oder Nahwärmenetz

* durchschnittlicher Exergieverbrauch: 11,3 MWh je Person und Jahr;
der Exergieeinsatz entspricht der Summe aller ausgefüllten Flächen; dNeb = rd. 9 MWh je Person und Jahr

Anwendungen der Prozesswärme (Kochen, Trocknen, Spülen und Waschen) zu einem durchschnittlichen Prozesswärmebedarf zusammengefasst, der im *Bild 3* durch die orangene Linie (Durchschnitt – Prozesswärme) angedeutet ist. Ebenso werden alle Anwendungen, die nur durch Strom bedient werden können, zu einer Säule zusammengefasst, um die Übersichtlichkeit der Darstellung zu erhöhen. Der Strombedarf für Beleuchtung

wurde hier ausgenommen, da er durch den Einsatz von Energiesparlampen bedeutend stärker reduziert werden kann als dies für die anderen betrachteten Stromanwendungen möglich ist. Im Folgenden wird jedoch auf den Einfluss des Nutzerverhaltens auf den ExergyFingerprint nicht näher eingegangen.

Bereits am Bedarfsdiagramm des ExergyFingerprints (*Bild 3*) wird ersichtlich, dass es sinnvoll ist, Ener-

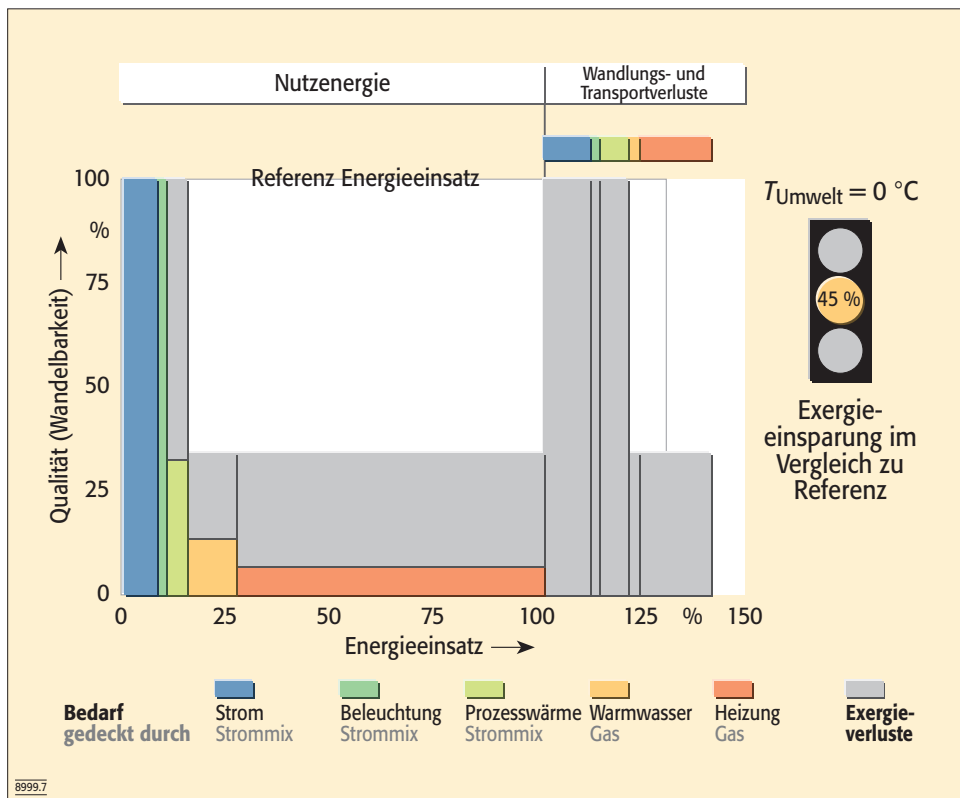


Bild 7. ExergyFingerprint für einen deutschen Durchschnittshaushalt* Szenario 2: LowEx KWK
 Benötigte Investitionen: GuD-Heizkraftwerk und Niedertemperatur Fern- oder Nahwärmenetz

* durchschnittlicher Exergieverbrauch: 11,3 MWh je Person und Jahr; der Energieeinsatz entspricht der Summe aller ausgefüllten Flächen; dNeb = rd. 9 MWh je Person und Jahr

gie im Hinblick auf Quantität und Qualität darzustellen. Würde nur die Energiemenge bewertet, ergäben sich die Einsparpotenziale allein auf der x-Achse, wodurch Potenziale auf der y-Achse ignoriert würden. Diese können jedoch wesentlich zur Primärenergieeinsparung beitragen. Dies wird im Folgenden dargestellt.

Die Gesamtfläche, die sich durch die zweidimensionale Darstellung der benötigten Energie und der Wandelbarkeit ergibt, stellt den Gesamt-Exergiebedarf eines deutschen Durchschnittshaushalts dar. Summiert man die Flächen auf, so ergibt sich ein Exergiebedarf für den Durchschnittshaushalt von nur rd. 1,6 MWh je Person und Jahr. Das heißt, dass der Exergiebedarf eines Durchschnittshaushalts in etwa sechsmal niedriger ist als dessen Energiebedarf bzw. die benötigte Qualität im Durchschnitt nur rd. 16 % (1/6) beträgt, wenn ein gleichbleibender Exergieverbrauch vorausgesetzt wird.

Referenzszenario des ExergyFingerprint

Der ExergyFingerprint ist ein Hilfsmittel zur Verdeutlichung von Einsparpotenzialen in Versorgungsszenarien. Um die Einsparpotenziale herauszustellen, die bei der Energieversorgung eines Haushalts ausgeschöpft werden können, wird die Darstellung des Bedarfs um die Darstellung der Versorgung ergänzt. In Bild 4 wird dem Nutzenergiebedarf ein Versorgungsszenario für die übliche Versorgung des Haushalts mit Strom aus dem deutschen Strommix und Wärme aus einem Gas-Brennwertkessel gegenübergestellt.

Anhand der grauen Fläche wird deutlich, dass große Exergieverluste bei diesem Versorgungsszenario auftreten. Durch die Aufteilung der Exergie in Qualität (Wandelbarkeit) und Energie (Wandlungsenergie) wird jedoch deutlich, dass die Exergie durch die Diskrepanz der benötigten zur gelieferten Qualität insbesondere bei der Wärmeversor-

gung verschwendet wird. Da diesem Verlust keine messbaren Energieverluste entsprechen, wird ein Exergieverlust durch Senkung der Qualität auch als innerer Exergieverlust oder als Exergiezerstörung bezeichnet.

Besonders auffällig ist die Tatsache, dass Strom und Erdgas dieselbe Wandelbarkeit von 100 % haben. Für den Praktiker ist dies kaum nachzuvollziehen, da Strom nur unter Inkaufnahme von Wandlungsverlusten aus Gas oder anderen Brennstoffen erzeugt werden kann. Vor dem theoretischen Hintergrund des Exergiekonzepts sind jedoch beide Energieformen gleich gut in Arbeit wandelbar – wie also lässt sich der Unterschied der beiden Energieformen darstellen? Durch die Erweiterung von Bild 4 um die Berücksichtigung der Wandlungsverluste lässt sich diese Frage beantworten. Durch diese Erweiterung ergibt sich die grundlegende Darstellung des ExergyFingerprints für den Referenzfall in Bild 5.

In Bild 5 werden im ExergyFingerprint auch die nicht im Haushalt anfallenden Verluste, welche bei der Wandlung der Primärenergie zu Nutzenergie auftreten, berücksichtigt. Sie sind optisch durch eine senkrechte schwarze Linie von dem Teil der Energie, die im Haushalt benötigt wird (Nutzenergie) abgegrenzt. Der farbige Balken oberhalb der Verluste ermöglicht eine Zuordnung der Verluste zu den verursachenden Anwendungsgebieten.

Bei Betrachtung dieser Verluste wird ersichtlich, dass im Verhältnis zur tatsächlich benötigten Energie die Verluste bei den mit Strom befriedigten Versorgungsbedürfnissen am höchsten sind. Damit wird auch klar, worin sich Gas und Strom im ExergyFingerprint optisch unterscheiden lassen. Der Einsatz von Strom (Sekundärenergie) bringt stets größere Wandlungsverluste (vorgelagert im Kraftwerk) mit sich, als der direkte Einsatz von Gas (Primärenergie) im Haushalt. Durch die Berücksichtigung der Wandlungsverluste wird also sichergestellt, dass alle Technologien nach den gleichen Regeln bewertet werden und dass der ExergyFingerprint die Realität der Versorgungssituation möglichst genau abbildet.

Der Name ExergyFingerprint für die prinzipielle Darstellungsform des Diagramms in Bild 5 wurde aufgrund der spezifisch charakterisie-

renden Eigenschaft dieses Diagramms gewählt. Fast jedes Bedarfs-/Verbrauchsszenario hat einen einzigartigen ExergyFingerprint mit hohem Wiedererkennungswert.

Eine vereinfachte Kernaussage wird im Ampeldiagramm an der rechten Seite erfasst. Es stellt die Exergieeinsparung im Vergleich zum Referenzfall dar. Dabei steht die Ampelfarbe rot für »keine Verbesserung« und somit für den Referenzfall, sowie für alle Versorgungsszenarien, welche zu einem höheren Verbrauch an Exergie führen. Die Farbe Gelb steht für »Verbesserung« und wird für den Bereich bis 50 % Verbesserung im Vergleich zum Referenzszenario verwendet. Die Farbe Grün ist ein Indikator für eine »starke Verbesserung«, was bedeutet, dass mehr als die Hälfte des Referenz-Exergieeinsatzes eingespart werden kann. Der Exergieeinsatz bezieht sich für den betrachteten Fall stets auf die Exergie der Primärenergie bzw. der natürlichen Ressource. Wie bereits oben dargestellt, können so Verluste auf dem Weg von der Primärenergie zur Nutzenergie berücksichtigt werden.

Die grauen Flächen im ExergyFingerprint repräsentieren die gesamten Exergieverluste, die sich aus wiedergewinnbaren Energieverlusten und Exergievernichtung durch Verwendung von Energie hoher Qualität zur Befriedigung von Energiebedürfnissen niederer Qualität zusammensetzen.

Am Beispiel des Referenzfalls (*Bild 5*) der Versorgung eines konventionellen Altbaus mit Gas-Brennwerttechnik wird ersichtlich, dass der bei weitem größte Anteil der eingesetzten Exergie der Primärenergie ungenutzt verloren geht. Mehr als die Hälfte der Verluste entsteht dabei durch Wandelbarkeitsvernichtung bei der Versorgung des Haushalts mit Energie hoher Qualität (Erdgas) zur Bereitstellung von thermischer Energie niedriger Qualität für Heizung und Warmwasser. Es wird somit ersichtlich, dass hier besonders große Verbesserungspotenziale vorhanden sind.

ExergyFingerprint für verschiedene Verbrauchs- und Versorgungsszenarien

Der Nutzen des ExergyFingerprints wird im Folgenden anhand

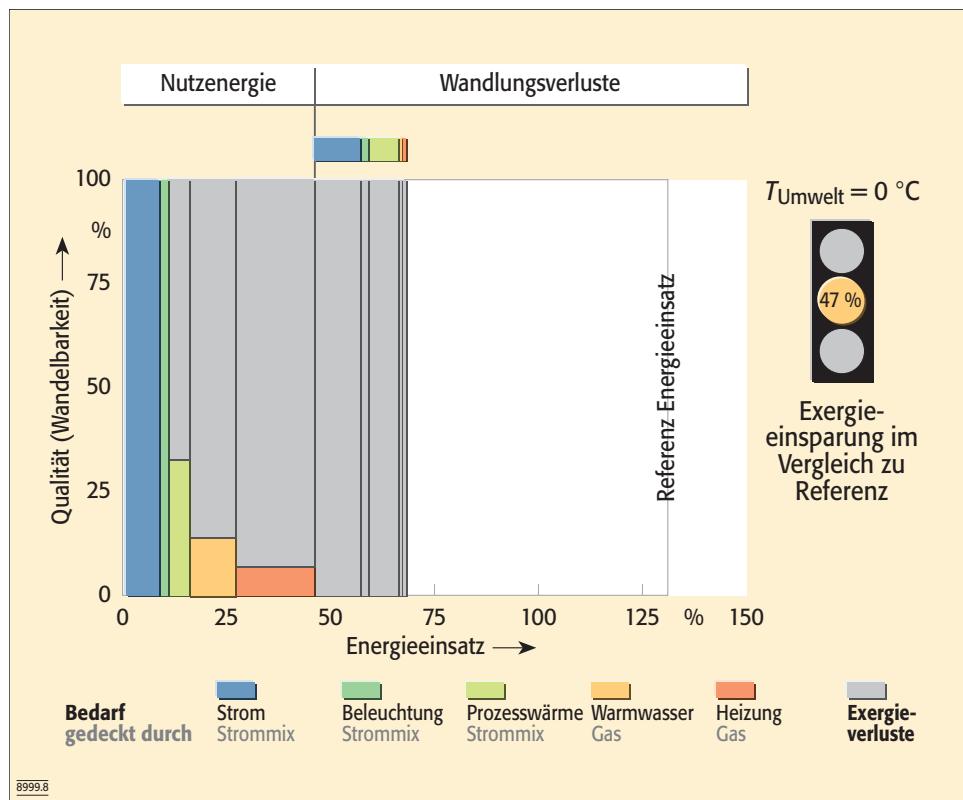


Bild 8. ExergyFingerprint für einen Haushalt mit guter Dämmung*
 Szenario 3: Erdgas-Brennwertkessel
 Benötigte Investitionen: Dämmung der Gebäudehülle und Isolierverglasung, Gas-Brennwertkessel

* durchschnittlicher Exergieverbrauch: 11,3 MWh je Person und Jahr; der Exergieeinsatz entspricht der Summe aller ausgefüllten Flächen; dNeb = rd. 9 MWh je Person und Jahr

einiger Beispiele dargestellt. Die Spezifikationen der diskutierten Beispiele sind in *Tafel 2* zusammengefasst.

In *Bild 6* wird das Szenario 1, also die Versorgung eines ungedämmten Gebäudes (160 kWh/(m² · a)) mit konventioneller Fernwärme aus Kraft-Wärme-Kopplung, im Vergleich zum Referenzfall dargestellt. Der elektrische Nutzungsgrad des Heizkraftwerks wurde mit 38 % angenommen, während der Gesamtnutzungsgrad 85 % beträgt. Die Transportwärmeverluste wurden mit 15 % angenommen.

Der Effekt auf den Exergieverbrauch durch diese Versorgungslösung ist aus dem Ampeldiagramm ablesbar. Trotz leicht höherem Energieeinsatz wird 24 % weniger Exergie verbraucht, um einen Durchschnittshaushalt zu versorgen.

Im ExergyFingerprint wird offensichtlich, dass die Einsparung hier ausschließlich durch eine niedrigere durchschnittliche Qualität des Energieeinsatzes zur Trinkwarm-

wasserbereitung und Heizung erreicht wird. Mit dem ExergyFingerprint kann somit auf eine sehr bildliche Art der exergetische Vorteil der Kraft-Wärme-Kopplung dargestellt werden.

In *Bild 7* wird die Versorgung mit LowEx Fernwärme, also sehr geringwertiger Abwärme aus Kraft-Wärme-Kopplung dargestellt. Der Begriff »LowEx-KWK Fernwärme« bezeichnet dabei die Versorgung mit Fernwärme auf niedrigem Temperaturniveau durch Wärmeauskopplung aus einem modernen GuD-Heizkraftwerk, das in dem dargestellten Beispiel einen elektrischen Nutzungsgrad von 49 % und einen Gesamtnutzungsgrad von 85 % erreicht. Diese Art der Fernwärmeversorgung stellt eine Art exergetischen »Besten Fall« für die Fernwärmeversorgung des Gebäudebestands aus Kraft-Wärme-Kopplung dar.

In *Bild 7* wird offensichtlich, dass die Nutzung von hocheffizienter Kraft-Wärme-Kopplung, die unter anderem durch den Betrieb des

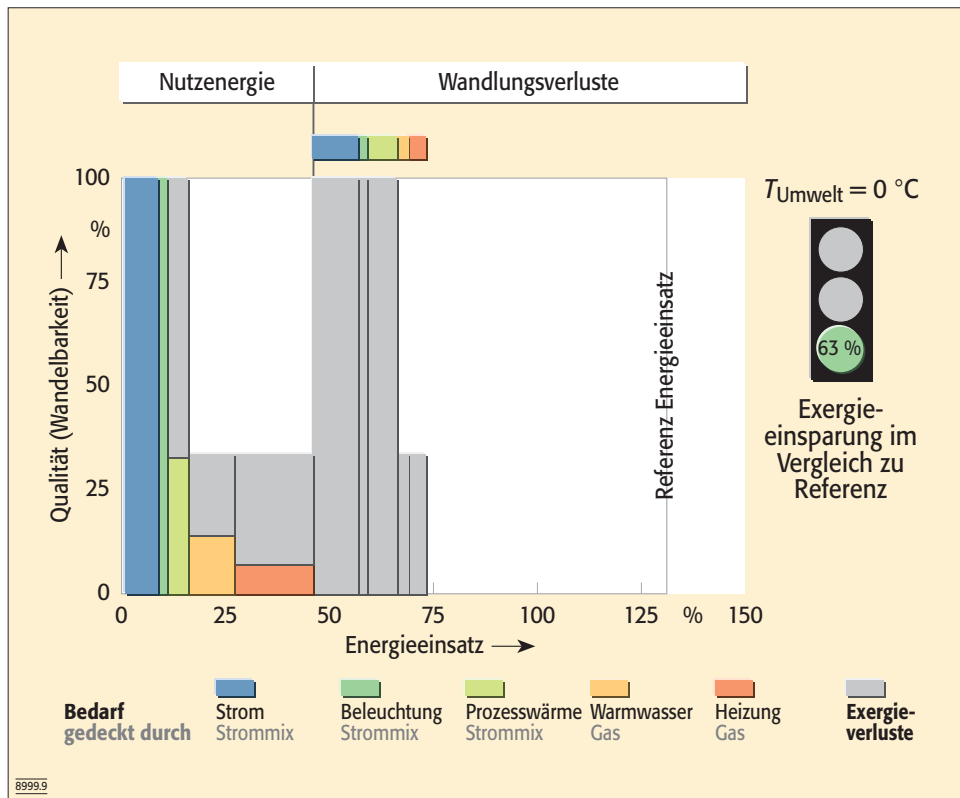


Bild 9. ExergyFingerprint für einen Haushalt mit guter Dämmung*
 Szenario 2: LowEx KWK
 Benötigte Investitionen: GuD-Heizkraftwerk und Niedertemperatur Fern- oder Nahwärmenetz; Dämmung der Gebäudehülle und Isolierverglasung

* durchschnittlicher Exergieverbrauch: 11,3 MWh je Person und Jahr; der Exergieeinsatz entspricht der Summe aller ausgefüllten Flächen; dNeb = rd. 9 MWh je Person und Jahr

Fernwärmenetzes bei niedrigen Vorlauftemperaturen möglich wird, im Vergleich zu der in Bild 6 dargestellten Versorgung mit konventioneller Fernwärme eine weitere Exergieeinsparung von 21 % ergibt. Der durchschnittliche Exergieverbrauch, der in etwa dem Primärenergiebedarf eines deutschen Haushalts entspricht, kann also durch Einsatz von Fernwärme aus hocheffizienter Kraft-Wärme-Kopplung um bis zu 45 % im Vergleich zum Referenzszenario reduziert werden.

Ein wichtiges Mittel, um eine höhere Primärenergieeffizienz zu erreichen, ist die Dämmung eines Objekts. Mit dem ExergyFingerprint kann auch ein Szenario abgebildet werden, das von einem gut gedämmten Haus ausgeht, dessen Wärmeversorgung mit einem Gaskessel erfolgt. In Bild 8 ist ein solches Wärmeversorgungsszenario dargestellt.

Es wird deutlich, dass die Exergieeinsparung für dieses Szenario kaum größer ist als die für das in Bild 7 gezeigte Szenario der Versorgung eines Haushalts ohne Dämmung

bei Verwendung von LowEx-KWK Fernwärme. Die Art, wie die Einsparungen erreicht werden, ist jedoch grundsätzlich verschieden. Während bei der Versorgung des Haushalts mit LowEx-KWK Fernwärme die Einsparungen dadurch erreicht werden, dass Energie mit geringer Wandelbarkeit dort eingesetzt wird, wo auch der Bedarf eine geringe Wandelbarkeit aufweist, wird die Einsparung in Bild 8 durch die Reduzierung des energetischen Bedarfs erreicht.

Da beide Einsparansätze prinzipiell kombiniert werden können, stellt sich die Frage: Welche Vorteile bringt eine solche Kombination? In Bild 9 ist dieser Fall exemplarisch dargestellt.

Es wird deutlich, dass für Szenario 4 insgesamt 63 % weniger Exergieeinsatz als im Referenzfall benötigt werden. Dies wird vor allem durch Reduzierung des Wärmebedarfs und die Optimierung der Wärmeversorgung erreicht, jedoch ist für dieses Ergebnis ein hoher Investitionsaufwand erforderlich.

Fazit

In Bild 10 sind die verschiedenen diskutierten Beispiele in einem Diagramm dargestellt, welches die durchschnittliche zur Haushaltsversorgung eingesetzte Qualität (Wandelbarkeit) zum benötigten Primärenergieeinsatz ins Verhältnis setzt. Das Produkt beider Einspargrößen ergibt den Exergieeinsatz als das letztendliche Entscheidungskriterium. Es wird ersichtlich, dass der Einsatz von Energie geringer Qualität (hier: Wärme geringer Temperatur) auch ohne Energieeinsparungen im Haushalt zu einer signifikanten Reduktion des primärenergetischen Exergieeinsatzes führt. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass hochwertige Energieträger nicht zur Deckung geringwertiger Bedürfnisse verschwendet werden. Der Einsatz von Energien geringerer durchschnittlicher Qualität kann dabei als Tendenz zu LowEx-Technologien gesehen werden, während Energieeinsparungen im Heizungssektor vor allem durch Dämmung und energiesparendes Verhalten erreicht werden können.

Die dargestellten Beispiele zeigen, dass für ungedämmte Bestandsbauten der Einsatz von Fernwärme signifikante Einsparpotenziale heben kann. Dämmung ist auch in Kombination mit Fernwärme in vielen Fällen sinnvoll. Das genaue Maß der erreichbaren Einsparungen hängt in jedem Fall von der konkreten Versorgungsstruktur ab, die mit dem ExergyFingerprint transparent charakterisiert werden kann. Wird Fernwärme durch Kraft-Wärme-Kopplung mit hohem elektrischen Nutzungsgrad oder durch Abwärme bereitgestellt, ist generell davon auszugehen, dass signifikante Einsparungen realisiert werden können. Werden ungedämmte Bestandsbauten mit dieser LowEx-Fernwärme versorgt, so ist das gesamte Energiesystem exergetisch vergleichbar gut, wie ein umfangreich gedämmter Neubau bei Versorgung mit einem Erdgas-Brennwertkessel.

Für den Neubausektor bietet sich zusätzlich die Option, einen hohen Dämmstandard zu realisieren. Die Kombination von umfangreicher Objektdämmung und Fernwärme aus hocheffizienter Kraft-Wärme-Kopplung erscheint dabei als guter Weg, um ein Maximum an Exergie-

einsparung und damit Primärenergieeinsparung zu realisieren.

Um eine begründete Entscheidung fällen zu können, sollten weitere Kriterien, insbesondere wirtschaftlicher Natur, berücksichtigt werden. In den *Bildern 6 bis 9* sind daher die benötigten Investitionen aufgeführt, um deutlich zu machen, welche zusätzlichen Investitionen in Dämmung und/oder Infrastruktur notwendig sind.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der ExergyFingerprint die Exergie auf eine neue und transparente Weise als das Produkt von Qualität (Wandelbarkeit) und Energie darstellt. Er ermöglicht es auf einfache Weise, verschiedene Maßnahmen zur qualitätsangepassten Versorgung mit Energieeinsparmaßnahmen vergleichbar zu machen und das Exergiekonzept einfach zu illustrieren. Hiermit ist eine Methode und Darstellung gefunden, die den Begriff der Qualität (Wandelbarkeit) und das Konzept der Exergie intuitiv erfassbar macht.

Referenzen

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, 2007, Energiedaten 2006, www.bmwi.de/BMWI/Navigation/Energie/energiestatistiken.html.

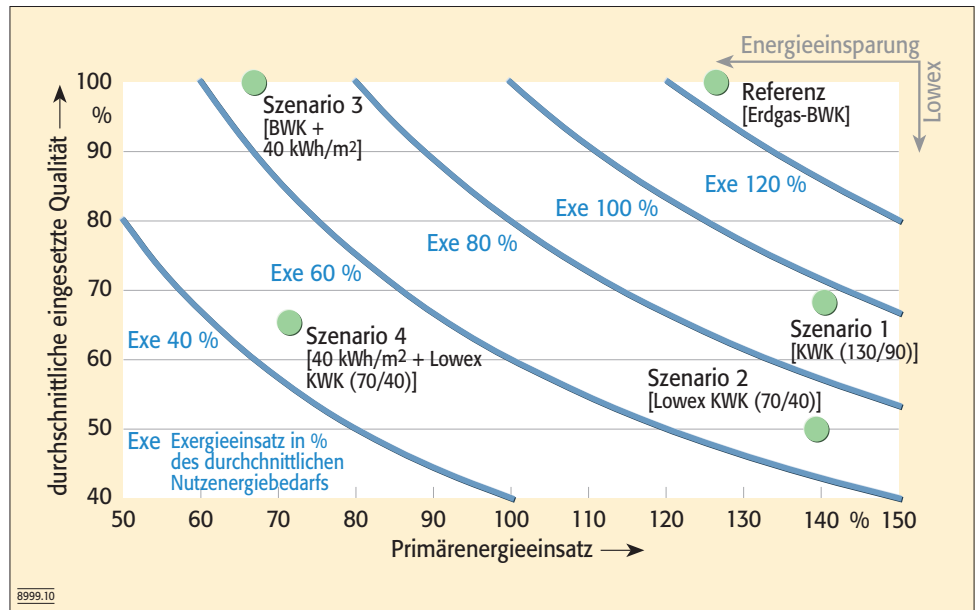


Bild 10. Übersicht über die verschiedenen Wärmebedarfs- und Versorgungsszenarien (Primärenergieeinsatz in % des durchschnittlichen Nutzenergiebedarfs 2006 in Deutschland von 9 MWh je Person und Jahr)

- [2] Deutsche Energieagentur, 2008, Stromcheck für Haushalte, www.stromeffizienz.de/stromspar-service/stromcheck0.html.

- [3] Jentsch, A.: A novel exergy-based concept of thermodynamic quality and its application to energy system evaluation and

process analysis, Dissertation, 2010, <http://opus.kobv.de/tuberlin/volltexte/2010/2576/> ■

christian.doetsch@umsicht.fraunhofer.de

andrej.jentsch@richtvert.de

www.umsicht.fraunhofer.de

Diese Artikelversion wurde am 10.06.2010 von Dr. Andrej Jentsch aktualisiert. Sollten wir Ihr Interesse an vergleichenden Analysen und Bewertungen mit Hilfe des ExergyFingerprint geweckt haben, wenden Sie sich bitte an RICHTVERT - Büro für Energiesystemberatung: www.richtvert.de.