

**Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit**

**Forschungskennzahl 3710 16 124
UBA-FB-00 [trägt die UBA-Bibliothek ein]**

Die Nutzung von Exergieströmen in kommunalen Strom-Wärme-Systemen zur Erreichung der CO₂- Neutralität von Kommunen bis zum Jahr 2050

von

**Hans Hertle
IFEU, Heidelberg**

**Dr. Andrej Jentsch
Richtvert, Münster**

**Lothar Eisenmann
IFEU, Heidelberg**

**Julia Brasche
IFEU, Heidelberg**

**Sarah Brückner
IFEU, Heidelberg**

**Corinna Schmitt
IFEU, Heidelberg**

**Christina Sager
Fraunhofer IBP, Kassel**

**Marlen Schurig
Fraunhofer IBP, Kassel**

**ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
Wilckensstr. 3, 69120 Heidelberg**

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Oktober 2014

Kurzbeschreibung

Mit der Einbeziehung der Exergie eines Energiestroms in die Betrachtung von kommunalen Energiesystemen lässt sich neben der Quantität von Energieströmen auch die Qualität berücksichtigen. Als Maßstab für die Qualität eines Energiestroms gilt dabei die physikalische Arbeitsfähigkeit. Wie die verschiedenen kommunalen Energieversorgungssysteme und Energieabnahmesysteme in Zukunft sowohl exergetisch als auch in Bezug auf CO₂-Minderung optimiert werden können, wurde Rahmen dieses Forschungsprojektes analysiert. Bei der Betrachtung von Basissystemen zeigt sich, dass in den klassischen konventionellen Systemen Exergie in hohem Maße verloren geht. In modernen gekoppelten Fernwärme oder Abwärme-Systemen in Kombination mit der Nutzung erneuerbarer Energieträger und unter Einbeziehung von Kaskaden-Nutzung von Wärme auf jeweils dem angepassten Temperaturniveau zeigt sich die Stärke des Exergie-Konzepts. Hier werden die wenigsten Ressourcen beansprucht, um den größtmöglichen Nutzen zu erhalten. Im Forschungsbericht wird sowohl die Übertragung des Exergie-Konzepts auf die Ausstellung von Energie/Exergie-Ausweisen für Wohn- und Nichtwohngebäude untersucht, als auch ein Vorschlag für die exergetische Bewertung von kommunalen Energiesystemen gemacht.

Die Exergie sollte als zusätzlicher Indikator in das Benchmark Kommunalen Klimaschutz mit aufgenommen werden. Außerdem sollte bei der Berechnung von Kraft-Wärme-Kopplungsprozessen nach der exergetischen Methode allokiert werden. Für Kommunen ist es notwendig, den Exergieansatz in die kommunale Bewertungs- und Planungspraxis zu integrieren.

Abstract

By including the exergy of an energy stream when considering local energy systems, the quantity as well as the quality of energy streams can be taken into account. Physical working capacity can be applied as benchmark for the quality of an energy stream. This research project analyses how different local energy supply systems and energy input systems can be optimised exergetically as well as with regard to CO₂-mitigation in the future. When considering base systems it becomes clear that traditional conventional systems lose exergy to a vast extent. The advantage of the exergy concept is revealed in the analysis of modern CHP district heating or waste heat systems in combination with renewable energy carriers and under application of cascade utilisation of heat according to required temperature level. Here, a minimum of resources is used to achieve the greatest possible benefit. The research report investigates the applicability of the exergy concept on the issuing of energy/exergy labels for residential and non-residential buildings. The report also proposes an exergetic assessment of local energy systems.

Exergy should be included as additional indicator for benchmarking in local climate protection. Moreover, the calculation of combined heat and power processes should be allocated following the exergetic method. It is necessary for communities to integrate the exergy approach in local practice of evaluation and planning.

Abkürzungsverzeichnis

AGEB	AG Energiebilanzen e.V.
AGFW	Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft
AW	Abwärme
BHKW	Blockheizkraftwerk
BmVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BWK	Brennwertkessel
EE	Erneuerbare Energien
EEQ	Erneuerbare Energien Quellen
EFH	Einfamilienhaus
EG	Erdgas
EL	Elektrisch
EnEV	Energieeinsparverordnung
EW	Einwohner
FW	Fernwärme
GFZ	Geschossflächenzahl
GRZ	Grundflächenzahl
GuD-Anlage	Gas und Dampfanlage
HK	Heizkessel
HKF	Heizkessel für Festbrennstoffe
IEA	International Energy Agency
IER	Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung
KEA	Kumulierte Energie Aufwand
KM	Kältemaschine
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWPD	Kraftwerkspark Deutschland
MFH	Mehrfamilienhaus
PEE	Primärenergieeinsparung
PEF	Primärenergiefaktor
PER	Primary Energy Ratio
RK	Raumkühlung
SN	Stadtnetz
SNE	Effizientes Stadtnetz

ST	Solarthermie
T	Temperatur
TWW	Trinkwarmwasser
VTT	VTT Technical Research Centre of Finland
WFL	Wohnfläche
WP	Wärmepumpe
WPE	Effiziente Wärmepumpe
WWF	World Wide Fund for Nature

Glossar

Allokation	Allokation ist im ökonomischen Sinn die Verteilung von (Produktions-)faktoren und betrifft bei KWK-Anlagen die Zurechnung des Primärenergieaufwandes, der Erzeugungskosten oder auch der Emissionen auf die beiden Koppelprodukte Strom und Wärme.
Brennwert (oberer Heizwert)	Der Brennwert gibt (vereinfacht) den Energiegehalt bei vollständiger Verbrennung an, sofern der bei der Verbrennung gebildete Wasserdampf vollständig kondensiert wird. Für die exergetische Betrachtung ist der Brennwert relevant, da dieser auch die Arbeitsfähigkeit des Wasserdampfes abbildet.
Energie	Energie ist eine fundamentale physikalische Größe, die in der Einheit J (=Ws) bzw. davon abgeleitet in kWh, MWh, GWh etc. angegeben wird ¹ . Nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik kann Energie weder verbraucht noch erzeugt, sondern nur umgewandelt werden.
Endenergie	Die Endenergie umfasst nur die Energieträger, die der Erzeugung bzw. Umwandlung von Nutzenergie dienen. Im Rahmen dieses Projektes wird Endenergie als die Energie definiert, die beim Verbraucher tatsächlich ankommt und in der Regel auch über die Rechnungsstellung verbucht wird.
Energiedienstleistungen	Energiedienstleistungen sind die aus dem Einsatz von Nutzenergie und andere Produktionsfaktoren befriedigten Bedürfnisse bzw. erzeugten Güter, wie Beleuchten von Flächen und Räumen, Bewegen und Transportieren, Erwärmen und Kühlen von Stoffen und Gütern, physikalische und chemische Stoffumwandlung, Umformen u.v.a.m.
Exergie	Die Exergie ist ein Maß für das Potenzial eines Energie- oder Stoffstromes in Zusammenarbeit mit der Umgebung technische Arbeit zu erzeugen. Vereinfacht kann die Exergie als Produkt von Energie und Energiequalität umschrieben werden. Dabei beschreibt die Energiequalität den Anteil zu welchem Energie in technische Arbeit umgewandelt werden kann. So sind elektrische und mechanische Energie bereits technische Arbeit und haben damit die maximal mögliche Energiequalität von 100%. Demgegenüber weist thermische Energie stets kleinere Energiequalitäten auf. Dabei gilt für thermische Energie: Je größer die Temperaturdifferenz zur Umgebungstemperatur desto größer die Energiequalität.
Heizwert (unterer Heizwert)	Der Heizwert gibt (vereinfacht) den Energiegehalt bei vollständiger Verbrennung an, sofern das bei der Verbrennung gebildete Wasser in gasförmigem Zustand anfällt und nicht kondensiert wird. Auf den Heizwert beziehen sich in der Regel alle klassischen Energiebilanzen. Ausnahme ist die Abrechnung von Erdgas. Diese wird in der Regel auf den Brennwert bezogen.
Nutzenergie	Nutzenergie umfasst alle technischen Formen der Energie, welche der Verbraucher letztendlich benötigt, also Wärme, mechanische Energie, Licht, elektrische und magnetische Feldenergie und elektromagnetische Strahlung, um Energiedienstleistungen ausführen zu können. Nutzenergien müssen im Allgemeinen zum Zeitpunkt und am Ort des Bedarfs aus Endenergie mittels

¹ 1 kWh = 3.600.000 Ws = 3.600 kJ

	Energiewandlern erzeugt werden.
Primärenergie	Primärenergie ist der Energieinhalt von Energieträgern, die in der Natur vorkommen und technisch noch nicht umgewandelt wurden. Man unterscheidet zwischen den, an menschlichen Maßstäben gemessen, unerschöpflichen bzw. regenerativen, den fossilen und nuklearen Energieträgern.
Sekundärenergie	Sekundärenergie ist der Energieinhalt von Energieträgern, die aus Primärenergie durch einen oder mehrere Umwandlungsschritte gewonnen werden. Im Rahmen dieses Projektes wird mit Sekundärenergie der Wärme-Output aus einem KWK-Prozess beschrieben. In einem Heizkraftwerk einer Kommunen wird z.B. umgewandelte Primärenergie wie Kohle eingesetzt. Das Heizkraftwerk wandelt diese weiter in Strom und Wärme um. Wärme wird als Sekundärenergie frei Kraftwerk z.B. als Fernwärme geliefert. Sobald diese Energie beim Verbraucher ankommt (Hauseingang) wird sie als Endenergie definiert.

Inhaltsverzeichnis

1 Kurzfassung	11
1.2 Grundlagen der Exergieanalyse und Bewertung von Referenzsystemen	11
1.3 Analyse kommunaler Bauprojekte mit dem Exergieausweis.....	14
1.4 Allokation von Koppelprodukten in KWK-Anlagen.....	15
1.5 Exergetische Bewertung von Kommunen	16
1.6 Entwicklungspfade zur CO ₂ -Neutralität.....	19
2 Summary	22
2.1 Principles of exergy analysis and evaluation of reference systems	22
2.2 Analysis of municipal building projects with the exergy pass	25
2.3 Allocation of co-products in cogeneration plants.....	26
2.4 Exergetic assessment of municipalities	27
2.5 Development paths towards CO ₂ neutrality	30
3 Einleitung	33
4 Stand der Forschung	35
4.1 Überblick	35
4.2 Übersicht/Grundlagen.....	35
4.3 Berechnungsmethoden für die Bewertung des Gebäudesektors	37
4.4 Kommunalkonzepte für Nachhaltigkeit.....	37
4.5 Verordnungen/Rechtsgutachten.....	38
4.6 Weitergehende Veröffentlichungen.....	38
5 Grundlagen der Exergieanalyse und Bewertung von Referenzsystemen	40
5.1 Grundlagen der Exergieanalyse	40
5.1.1 Exergie im Vergleich zu Energie	42
5.1.2 Primärenergie im Vergleich zur Primärenergie	43
5.1.3 Exergieanalyse und Treibhausgasemissionen	44
5.1.4 Exergiebasierte Analysen und Exergieausnutzung	44
5.1.5 Exergiebasierte Analysen und Wirtschaftlichkeit	45
5.2 Bewertungsgrenzen.....	46
5.2.1 Festlegung der Primärenergie und Primärenergie	47
5.2.2 Festlegung des Nutzens von Energiesystemen	47
5.2.3 Referenzumgebung	48
5.2.4 Die Referenzumgebung für stationäre (d.h. zeitunabhängige) Analysen	48
5.2.5 Referenzumgebung für dynamische Analysen	49
5.2.6 Referenzumgebung für die kommunale Bewertung	49
5.3 Exergetische Bewertung für Kälteanlagen	50
5.4 Energienachnutzung / Kaskadierung	51
5.5 Einführung in das „LowEx“-Berechnungswerkzeug	53
5.6 Bewertung von Energiesystemen	55
5.7 Exergetische Bewertung von Wärmeversorgungssystemen	55
5.7.1 Bewertungsgrößen	55

5.7.2 Erdgas-Brennwertkessel	58
5.7.3 Erdgas-Brennwertkessel mit 40% solarer Unterstützung (vereinfacht)	59
5.7.4 Holz-Pelletkessel	61
5.7.5 Erd-Wärmepumpe	62
5.7.6 Erdgas-betriebene Absorptionswärmepumpe	63
5.7.7 Luft-Wärmepumpe	65
5.7.8 Fernwärme aus Kraft-Wärme-Kopplung (Vorlauftemp. max. 130°C)	66
5.8 Exergie-Ausnutzung als Bewertungskriterium für Wärmeversorgungssysteme.....	68
5.8.1 Erdgas-Brennwertkessel	74
5.8.2 Strom-Nachtspeicherheizung	75
5.8.3 Holzpellet-Heizkessel	76
5.8.4 Luft-Wärmepumpe	77
5.8.5 Erd-Wärmepumpe	78
5.8.6 Erdgas-Brennwertkessel mit 40% Solarthermie	79
5.8.7 Fernwärme aus Steinkohle-KWK (Alt Dampf)	80
5.8.8 Fernwärme aus Steinkohle-KWK (Alt Wasser)	81
5.8.9 Fernwärme aus Erdgas-KWK (Neu Wasser)	82
5.8.10 Fernwärme aus dem Rücklauf einer Erdgas-KWK (Neu LowEx)	83
5.8.11 Fernwärme aus Abwärme (Industrie LowEx)	84
5.8.12 Fernwärme aus tiefer Geothermie	85
5.8.13 Nahwärme aus Erdgas-BHKW	86
5.8.14 Nahwärme aus Biogas-BHKW	86
5.8.15 Vergleich von exemplarischen Einzelsystemen gemäß der Exergieausnutzung und den CO ₂ -Emissionen	87
6 Analyse kommunaler Bauprojekte mit dem Exergieausweis.....	90
6.1 Einleitung	90
6.2 Beschreibung des Vorgehens bei der Berechnung	90
6.3 Aufbau des Exergieausweises	91
6.4 Vergleich Energieausweis und Exergieausweis.....	97
6.5 Technologievergleiche mit dem Exergieausweis: Wohngebäude.....	106
6.6 Ausblick: Der Exergieausweis in Zukunft	116
7 Allokation von Koppelprodukten in KWK-Anlagen	120
7.1 Überblick über Allokationsmethoden.....	120
7.2 Sensitivität der Allokations-Methoden	121
7.3 Brennstoffmehrbedarf bzw. Arbeitswert-Methode	122
7.4 Carnot-Methode / Exergie-Methode.....	122
7.5 Dresdener Methode	125
7.6 Finnische Methode	127
7.7 Die Stromgutschriften-Methode	128
7.8 Kalorische Methode / IEA-Methode	131
7.9 Fazit.....	133
8 Exergetische Bewertung von Kommunen	136
8.1 Einleitung	136
8.2 Zu Grunde liegende Annahmen und Werte.....	136

8.3 Aufbau der kommunalen Sankey Diagramme.....	139
8.4 Modellstadt (Haushaltssektor)	143
8.5 Ergebnisse: Exergetische Analyse einer Modellkommune (Haushalte)	145
8.5.1 Dezentrale Erzeugung	145
8.5.2 Importierte Fernwärme (Dampf)	146
8.5.3 Konventionelle KWK	147
8.5.4 KWK mit Rücklauf-Nutzung	148
8.5.5 Fernwärme aus tiefer Geothermie	149
8.5.6 Fernwärme aus Abwärme von Industriebetrieben	150
8.6 Zusammenfassung und Auswertung für den Wohngebäudesektor (Modellstadt).....	151
8.7 Ausblick: Erweiterung um den Industrie-Sektor	156
8.8 Ausblick: Erweiterung auf die Gesamtstadt	157
9 Entwicklungspfade zur CO₂-Neutralität.....	158
9.1 Die Multi-Kriterien-Matrix.....	158
9.1.1 Indikatoren der Multi-Kriterien-Matrix	159
9.2 Der Indikator: „Wärmenetz“	160
9.2.1 Bebauungsdichte (städtebauliche Dichte)	160
9.2.2 Wärmebedarf der Gebäude	162
9.2.3 Wärmedichte	163
9.2.4 EXKURS: Zukunft der Wärmenetze	165
9.2.5 Netzverluste	166
9.3 Die Multi-Kriterien-Matrix: Beispiel Neubauwohngebiet	166
10 Empfehlungen und Ausblick	169
11 Beantwortung der zentralen Forschungsfragen.....	176
12 Literaturverzeichnis.....	179
13 Annahmen für die Bewertung der Einzelsysteme in Kapitel 3.8.....	184
13.1.1 Erdgas-Brennwertkessel	184
13.1.2 Strom-Nachtspeicherheizung	184
13.1.3 Holzpellet-Heizkessel	184
13.1.4 Luft-Wärmepumpe	185
13.1.5 Erd-Wärmepumpe	185
13.1.6 Erdgas-Brennwertkessel mit 40% Solarthermie	185
13.1.7 Fernwärme aus Steinkohle-KWK (Alt Dampf)	186
13.1.8 Fernwärme aus Steinkohle-KWK (Alt Wasser)	186
13.1.9 Fernwärme aus Erdgas-KWK (Neu Wasser)	187
13.1.10 Fernwärme aus dem Rücklauf einer Erdgas-KWK (Neu LowEx)	187
13.1.11 Fernwärme aus Abwärme (Industrie LowEx)	188
13.1.12 Fernwärme aus tiefer Geothermie	188
13.1.13 Nahwärme aus Erdgas-BHKW	189
13.1.14 Nahwärme aus Biogas-BHKW	189
14 Annahmen für die Berechnung der Exergieausweise	191

1 Kurzfassung

Wesentliche Handlungsfelder für den Umbau der heutigen Energieversorgungsstruktur liegen in den Energieversorgungs- und Energieverbrauchssystemen. Kommunen stehen hier vor besonderen Herausforderungen, da die Veränderungen vor Ort angestoßen und umgesetzt werden müssen. Eine Forcierung der Bereiche Energieeinsparung, Kraftwärmekopplung und Erneuerbare Energien ist unumstritten. Im Detail bestehen aber zurzeit große Unsicherheiten, wie der Wechsel der Energiesysteme und die Anpassung an den teilweise immer kleiner werdenden Energiebedarf konkret in Angriff genommen werden soll. Zur Beantwortung dieser Frage gerät als Bewertungskriterium, neben der allgemeinen Energieeffizienz und der Treibhausgasreduktion, zunehmend auch die Exergie eines Energiestromes in den Mittelpunkt. Die Exergieanalyse berücksichtigt nicht nur die Menge eines Energiestroms, sondern auch dessen Qualität. Als Maßstab für die Qualität eines Energiestroms gilt dabei die physikalische Arbeitsfähigkeit. Wie die verschiedenen kommunalen Energieversorgungssysteme und Energieabnahmesysteme in Zukunft sowohl exergetisch als auch in Bezug auf CO₂-Minderung optimiert werden können, soll im Rahmen dieses Forschungsprojektes analysiert werden.

1.2 Grundlagen der Exergieanalyse und Bewertung von Referenzsystemen

Allgemein kann die Exergie als Produkt aus der Energie und der Energiequantität eines Energieflusses definiert werden. Das Ziel der exergetischen Optimierung besteht darin, den Exergieverbrauch für eine Versorgungsaufgabe zu minimieren. Das heißt, einerseits müssen Energieverluste reduziert werden. Zusätzlich dazu erlaubt eine bessere Anpassung der Energiequalität des Angebots an die Energiequalität der Nachfrage die Arbeitsfähigkeit der angebotenen Energie besser auszuschöpfen. Energieeinsparung und Energieeffizienz-Maßnahmen führen zu einer Reduzierung des allgemeinen Energiebedarfs. Die zusätzliche Nutzung von Niedertemperaturquellen erlaubt es, zusätzlich die Exergie-Effizienz zu erhöhen.

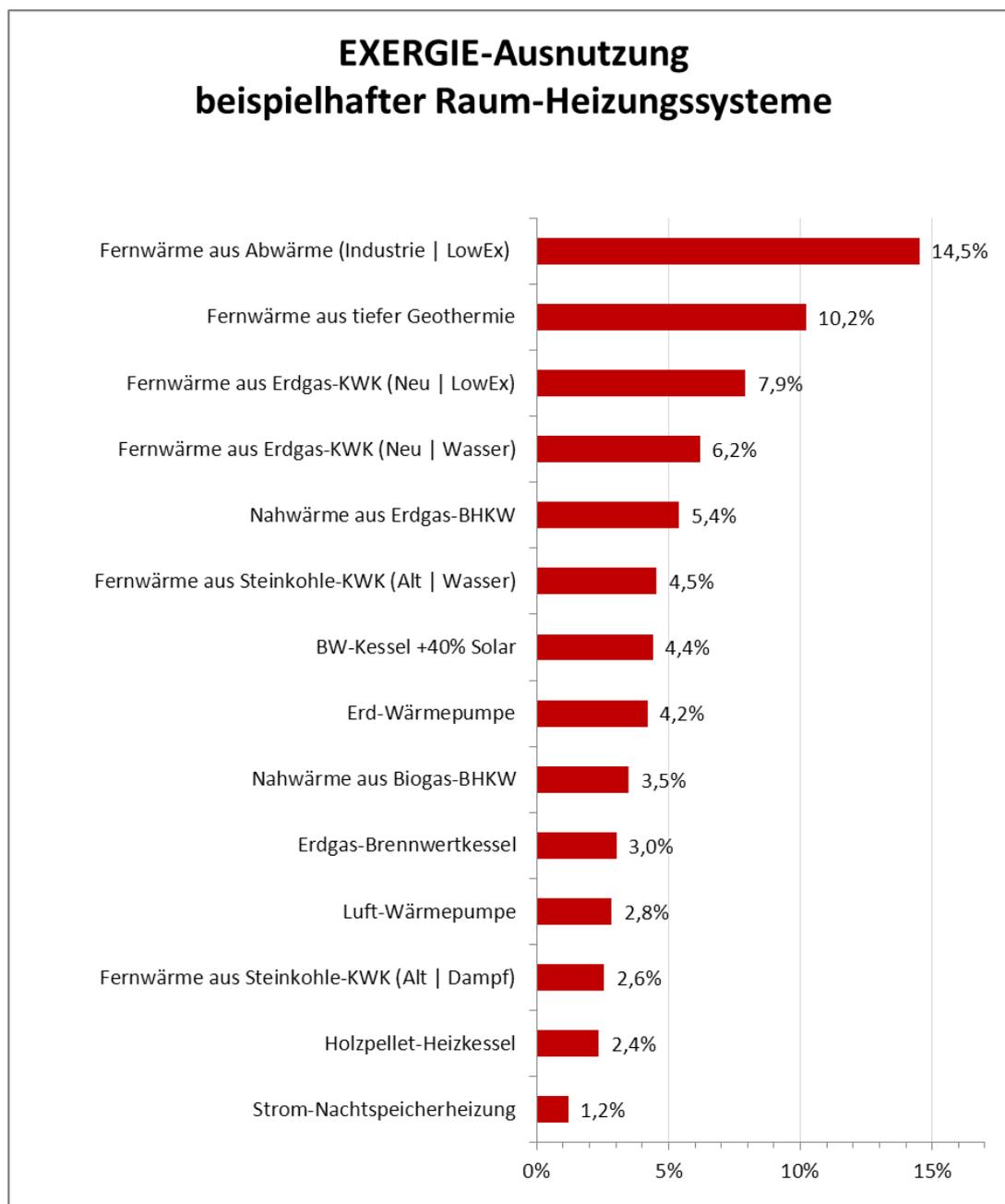
In der Regel übersteigt heute die Energiequalität für die Versorgung den tatsächlich erforderlichen Bedarf wesentlich. Um das Gesamtsystem zu optimieren, sollte in Zukunft auf eine bessere Anpassung der Energiequalität der Versorgung an die Energiequalität des tatsächlichen Bedarfs geachtet werden. Die Nutzung von Niedrigtemperatur-Heizungen und Hochtemperatur-Kühlsystemen in Kombination mit entsprechend geeigneten Versorgungssystemen, sogenannte LowEx-Systeme, kann maßgeblich zur Verringerung des fossilen und erneuerbaren Primärenergieverbrauchs von Gebäuden beitragen.

Da die Größe der Transfers eines Wärmestroms die Auslegung und Dimensionierung technischer Komponenten mitbestimmt, können diese somit nicht ausschließlich auf Basis der Exergie erfolgen. Die Exergie ist somit als Größe anzusehen, die sehr gut für die Bewertung und Analyse von technischen Systemen, für die Auslegung jedoch nur ergänzend geeignet ist.

Die Exergieausnutzung als Weiterentwicklung der Energieeffizienz beinhaltet stets die Energieeffizienz, geht jedoch wesentlich darüber hinaus. Sie macht es möglich, verschiedene Systeme unter Berücksichtigung der Nutzbarkeit der verschiedenen eingesetzten Energieträger und Stoffe zu vergleichen, und erlaubt somit besonders belastbare Aussagen über die Eignung verschiedener Energiesysteme zur Erfüllung eines Versorgungsziels. Die Exergieausnutzung von Kälteanlagen lässt sich in vielen Fällen nur sehr grob auf Basis stationärer Berechnungen abschätzen. Der Kühlfall wurde im Rahmen des Projekts deshalb nicht betrachtet.

Als wichtige Grundlage für die kommunale Betrachtung wurde für verschiedene Wärmesysteme die exergetische Ausnutzung berechnet:

Abbildung I: Vergleich der exergetische Ausnutzung verschiedener Wärmesysteme (Nutzenergie Raumwärme = 60 kWh/(qm*a))

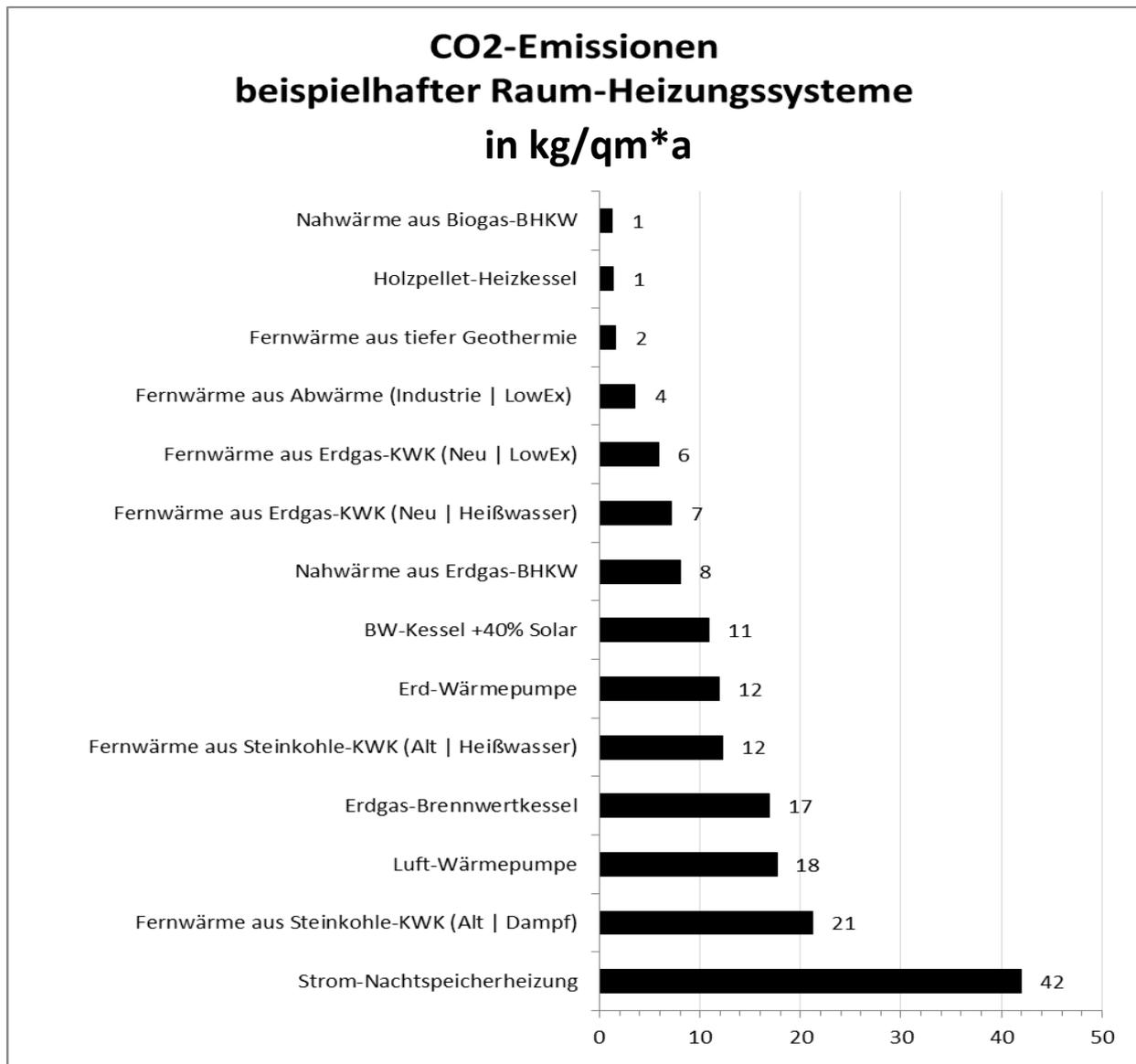


Heizsysteme benötigen unterschiedliche Versorgungstemperaturen für verschiedene Anwendungen im Gebäudebereich, zum einen für die Beheizung von Räumen und zum anderen für die Trinkwarmwasserbereitstellung. Um maximalen Nutzen aus einem Energiefluss erzielen zu können ist es sinnvoll, verschiedene Temperaturniveaus gemäß ihren Anforderungen in der Gebäudetechnik zu kaskadieren. Intelligentes Energiemanagement, Bi-direktionale Versorgungskonzepte, Kurzzeitspeicher und angepasste Versorgungsleitungen bieten vielversprechende Möglichkeiten, um die Gesamteffizienz der Energienutzung exergetisch zu verbessern.

In der folgenden Übersicht nach CO₂-Emissionen wird ersichtlich, dass einige exergetisch wenig effiziente Systeme wie Nahwärme aus Biogas-BHKW und Holzpellet-Heizkessel aufgrund ihres erneuerbaren Brennstoffes gut abschneiden. Für alle auf fossilen Energieträgern basie-

renden Technologien führt eine Erhöhung der Exergie-Ausnutzung gleichzeitig zu einer Verringerung der CO₂-Emissionen.

Abbildung II: Vergleich der CO₂-Emissionen verschiedener Wärmesysteme in kg/qm*a (Nutzenergie Raumwärme = 60 kWh/(qm*a)).



1.3 Analyse kommunaler Bauprojekte mit dem Exergieausweis

Nach der Analyse der Einzelsysteme stellt sich die Frage, wie komplexe Energieversorgungs-lösungen exergetisch bewertet werden können. Hier bietet der Exergieausweis eine gute Möglichkeit zur Einführung einer konsistenten Form der Exergie-Analyse in die kommunale Bewertungspraxis. Er kann kommunale Übersichts-Bilanzen dort ergänzen, wo es um die Bewertung von einzelnen Bauprojekten, d.h. Gebäuden oder Gebäudekomplexen inklusive der verwendeten Technologien für Strom, Wärme und Kälte geht.

Der Exergieausweis ist ein Analysewerkzeug zum Vergleich von Technologiealternativen im Hinblick auf die Energieeffizienz, Primärenergie-Ausnutzung und den Primärenergie-Verbrauch auf Basis einer umfassenden Exergie-Gesamtsystemanalyse (Jentsch 2010).

Abbildung III: Exergieausweis für ein Wohngebäude



Quelle: Richtvert

Der Exergieausweis setzt ganz auf die visuelle Darstellung des Gebäudeenergiesystems. Alle Textangaben welche im Energieausweis angeführt sind, können bei Bedarf in einer Effizienzanalyse mit dem Exergieausweis ergänzt werden. Im Vergleich zum Energieausweis wird sofort deutlich, dass bei dem vorliegenden Gebäudesystem mehr als 90% der eingesetzten Primärenergie verloren geht. Insbesondere interne Verluste führen zu einer sehr geringen Exergieausnutzung.

Während der Energieausweis zu vermitteln versucht, dass der Primärenergieeinsatz sogar etwas geringer ist als der Endenergiebedarf, wird im Exergieausweis deutlich, dass die Primär-

energie um etwa 60% höher ist als die Endenergie. In vergleichbarer Weise kann der Exergieausweis auch für Nichtwohn-Gebäude erstellt werden.

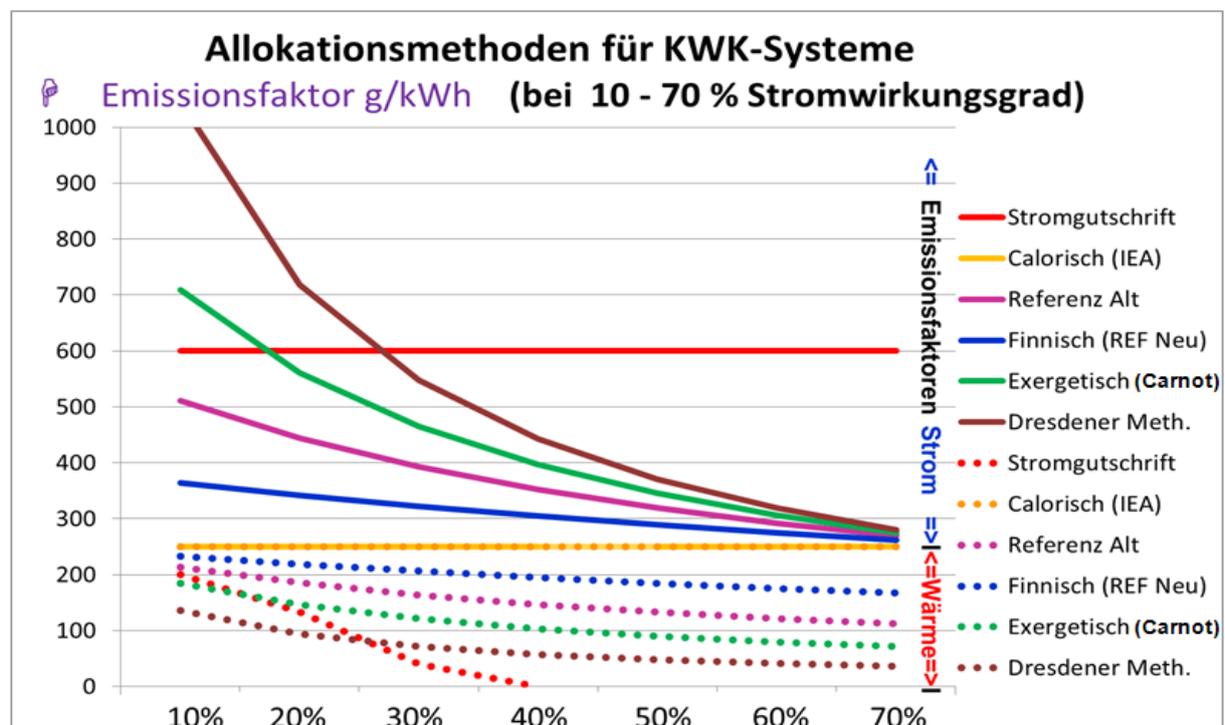
1.4 Allokation von Koppelprodukten in KWK-Anlagen

Für die Beurteilung der Effizienz von kraft-wärmegekoppelten Anlagen und die Allokation von Primärenergie und Emissionen auf die Zielenergien existieren unterschiedliche Verfahren (siehe z.B. /VDI 4608-2/). Um modellhafte Energiesysteme und reale Strom-Wärmesysteme berechnen und vergleichen zu können, muss daher zuerst eine geeignete Methodik ausgewählt werden. Die untersuchten Verfahren waren:

- Carnot-Methode (auch als Exergie-Methode bezeichnet)
- Gutschriftverfahren
- Finnische Methode
- Kalorische Methode/IEA Methode
- Wirkungsgradmethode (nach Mauch 2010)
- Dresdener Methode
- Exergieverlust-Methode

Die unten stehende Grafik zeigt die Emissionsfaktoren Strom und Wärme der oben aufgeführten Methoden im direkten Vergleich.

Abbildung IV: Vergleich verschiedener Allokationsmethoden in Abhängigkeit vom Stromwirkungsgrad



Quelle: IFEU

Bis auf die Stromgutschriftenmethode führen alle Methoden zu positiven Emissionsfaktoren. Die kalorische Methode bewertet Strom und Wärme gleichwertig und ist daher weder in Ein-

klang mit der Physik noch konform mit realen Kraftwerksprozessen. Die finnische Methode, die u.a. über die EU-Dienstleistungsrichtlinie eingebracht wurde, begünstigt die Stromseite zu Ungunsten der Wärmeseite. Die Dresdner Methode begünstigt die Wärmeseite zu Ungunsten der Stromseite. Die bei Ihr angenommene „real“ höhere Wertigkeit des Stroms zusätzlich zur „physikalisch“ höheren Wertigkeit lässt sich nur schwer begründen.

In diesem Projekt sollen Kommunen und die darin vorhandenen Energieerzeugungsanlage exergetisch bewertet werden. Dabei ist es explizit das Ziel, die unterschiedliche thermodynamische Qualität von Strom und Wärme zu berücksichtigen. Deshalb eignet sich aus Sicht des IFEU lediglich die Carnot-Methode (Exergie-Methode) zur unabhängigen und wissenschaftlich fundierten Bewertung von Koppelprodukten, wie sie in diesem Projekt angestrebt wird.

1.5 Exergetische Bewertung von Kommunen

Mithilfe der Basisrechnungen wird nun auf Ebene einer Kommune von der Primärenergie bis zur endgültigen Nutzung insbesondere die Raumheizung betrachtet. Um die Energieströme zu veranschaulichen, werden Sankey-Diagramme erstellt. Durch die Mischung verschiedener Stadt- und Versorgungstypen entstehen typische Versorgungs- und Abnahmevarianten, mit denen reale Städte gemäß ihrer Größe und derzeitigen Versorgung verglichen werden können. Durch die Betrachtung von alternativen Versorgungsoptionen wie KWK-Fernwärme aus dem Rücklauf, Fernwärme aus tiefer Geothermie, Fernwärme aus Abwärme oder Wärmepumpen, können Rückschlüsse auf die Auswirkung einer Versorgungsumstellung gezogen werden. Dies kann bereits vor der Planungsphase von Systemveränderungen in einer Art Vorab-Analyse erfolgen.

Für das Szenario einer rein dezentralen Wärmebereitstellung in den Wohngebäuden ist das entsprechende Sankey-Diagramm in Abbildung V dargestellt.

Abbildung V: Sankey-Diagramm dezentrale Energieversorgung

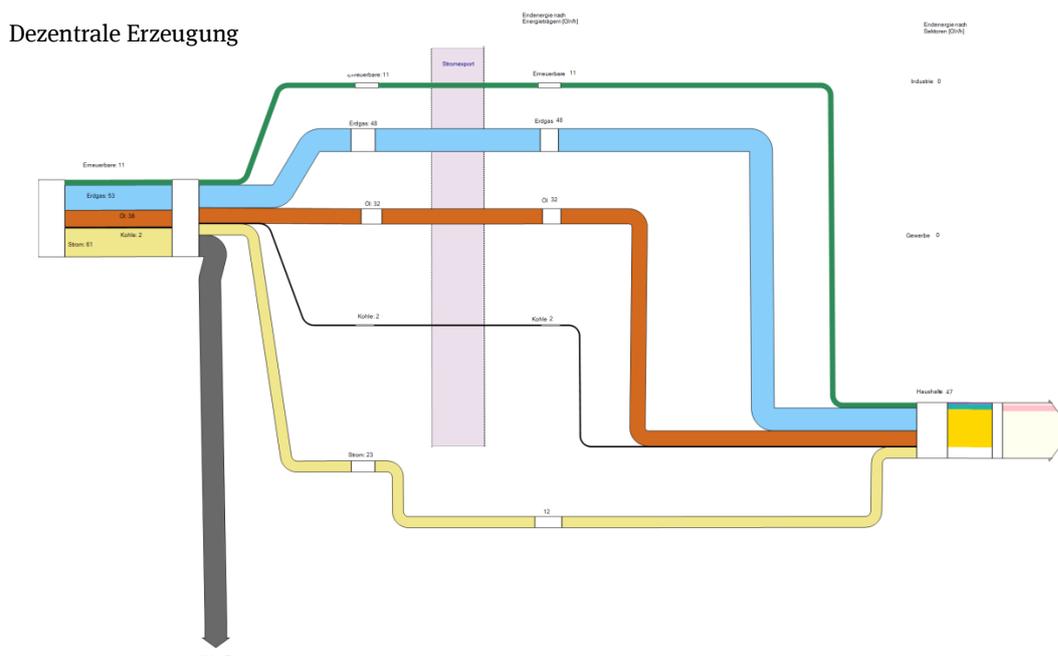
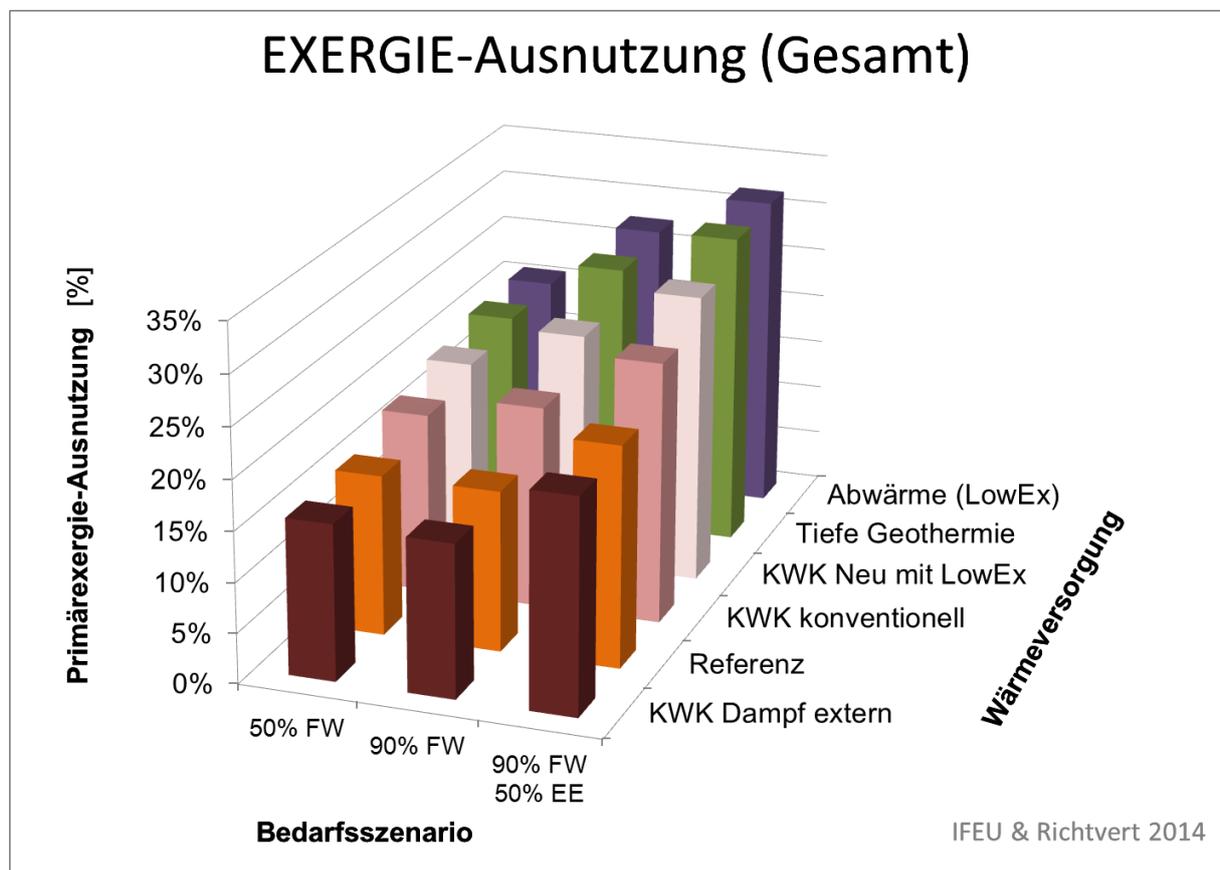


Abbildung VI zeigt die Primärenergie-Ausnutzung über alle Anwendungen (Prozesswärme, Warmwasser, Raumwärme und Strom).

Abbildung VI: Primärenergie-Ausnutzung über alle Anwendungen (Prozesswärme, Warmwasser, Raumwärme und Strom)

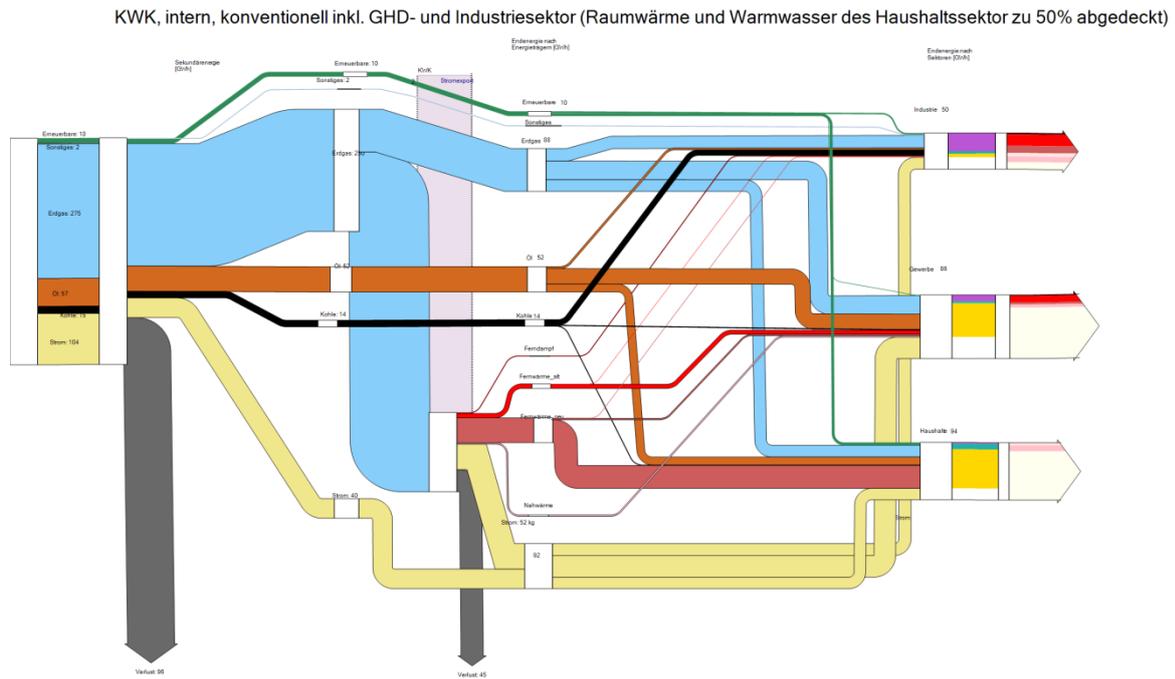


Im Vergleich der verschiedenen Versorgungsoptionen bleibt die Reihenfolge der Systeme unabhängig von dem untersuchten Bedarfsszenario gleich. So erzielt die Versorgung mit Abwärme aus Industriebetrieben mit fast 30% für den Fall 90% FW / 50% EE die besten Werte, gefolgt von Fernwärme aus tiefer Geothermie, Fernwärme aus neuer KWK mit Rücklaufnutzung (LowEx), Fernwärme aus konventioneller KWK, der Referenz und Fernwärme aus „alter“ Dampf-KWK, welche extern erzeugt wird.

Die Primärenergie-Ausnutzung für die Gesamtstadt steigt mit steigendem Anteil an Strombedarf für die Nutzenergie und sinkt mit steigendem Anteil an Wärmebedarf. Dies liegt an der wesentlich höheren Primärenergie-Ausnutzung der Strombereitstellung (z.B. 38%) im Vergleich zur verhältnismäßig geringen Primärenergie-Ausnutzung der Wärmeversorgung insbesondere für die Bereitstellung von Raumwärme und Trinkwarmwasser (z.B. 6%).

Die Betrachtung der Gesamtstadt ergibt dann das folgende Bild:

Abbildung VII: Sankey-Diagramm für die Gesamtstadt



Wird wiederum die Primärenergie-Ausnutzung für die Bereitstellung von Raumwärme und Wärme für die Trinkwarmwasserbereitung betrachtet so würde auch hier auffallen, dass diese vor allem vom baulichen Zustand der Stadt und weniger von den betrachteten Sektoren abhängt.

1.6 Entwicklungspfade zur CO₂-Neutralität

Ziel ist es, den Kommunen ein Werkzeug an die Hand zu geben, das richtungssicher die sinnvollen Entwicklungspfade eines Quartiers (Neubau oder Bestand) zur CO₂-Neutralität aufzeigt. Wesentlicher Fokus liegt dabei auf der qualitativen Einschätzung unterschiedlicher Indikatoren und der Abwägung in Richtung Gesamtziel.

Um die komplexe Materie für kommunale Anwender anschaulich und leicht zugänglich zu präsentieren, wurde im Rahmen des Projektes ein Programm auf Basis von Microsoft Excel 2010 (EXCEL-Tool) erarbeitet.

Abbildung VIII: Multi-Kriterien-Matrix zur qualitativen Bewertung von Energiesystemen auf Quartiersebene

Dämmstandard				
☹	☺	☺	☺	☺
●	●	●	●	
Effizienz_{ex}				
☹	☺	☺	☺	☺
●				
CO₂				
☹	☺	☺	☺	☺
●	●			
EEQ / Abwärme				
☹	☺	☺	☺	☺
Wärmenetz				
☹	☺	☺	☺	☺
○				

Dämmstandard: Hier wird der tatsächliche bzw. geplante Dämmstandard (Heizwärmebedarf) in Bezug gesetzt zu einem Zielwert (Passivhaus). 5 Punkte bedeutet: Zielwert erreicht. 0 Punkte bedeutet: Energiebedarf ca. 3-mal höher als der Zielwert.

Effizienz: Hier wird die Primärenergie-Ausnutzung (siehe auch Kapitel 5.8) in 1,5%-Schritten bepunktet. Zur Abgrenzung gegenüber der klassischen endenergiebezogenen Effizienz abzugrenzen wird das tiefgestellt Kürzel „ex“ angehängt. 5 Punkte bedeutet: 8% oder darüber. 0 Punkte bedeutet: weniger als 2%.

CO₂-Emissionen: Hier werden die CO₂-Emissionen pro Energiebezugsfläche abhängig vom Zielwert bewertet. 5 Punkte bedeuten spezifische CO₂-Emissionen unter 5 kg CO₂/(m²*a), 0 Punkte: CO₂-Ausstoß mehr als 5-mal höher als der Zielwert.

EEQ/Abwärme: Hier wird der Anteil der Erneuerbaren Energien Quellen (EEQ) an der Wärmeversorgung bzw. der Anteil der Abwärme aufgezeigt. 5 Punkte bedeutet: Anteil EEQ/Abwärme bei über 90%. 0 Punkte: keine Nutzung von EEQ

Wärmenetz: Hier wird die Eignung für ein Wärmenetz dargestellt. Die Wärmedichte (siehe Kapitel 9.2.3) wird hier, beginnend mit 300 kWh/(m²*a), in Schritten von 200 kWh/(m²*a) bepunktet. 5 Punkte bedeutet: Wärmedichte über 1.100 kWh/(m²*a).

An einem konkreten Beispiel eines Neubauwohngebiets werden die Möglichkeiten der Multi-Kriterien-Matrix aufgezeigt. Die Multi-Kriterien-Matrix soll qualitativ Effekte darstellen, einen Überblick erlauben und Wesentliches schnell erfassbar machen. Sie kann zwar genauere Be-

rechnungen als Basis für Grundsatz-Entscheidungen nicht ersetzen, bietet sich jedoch als erster Schritt an.

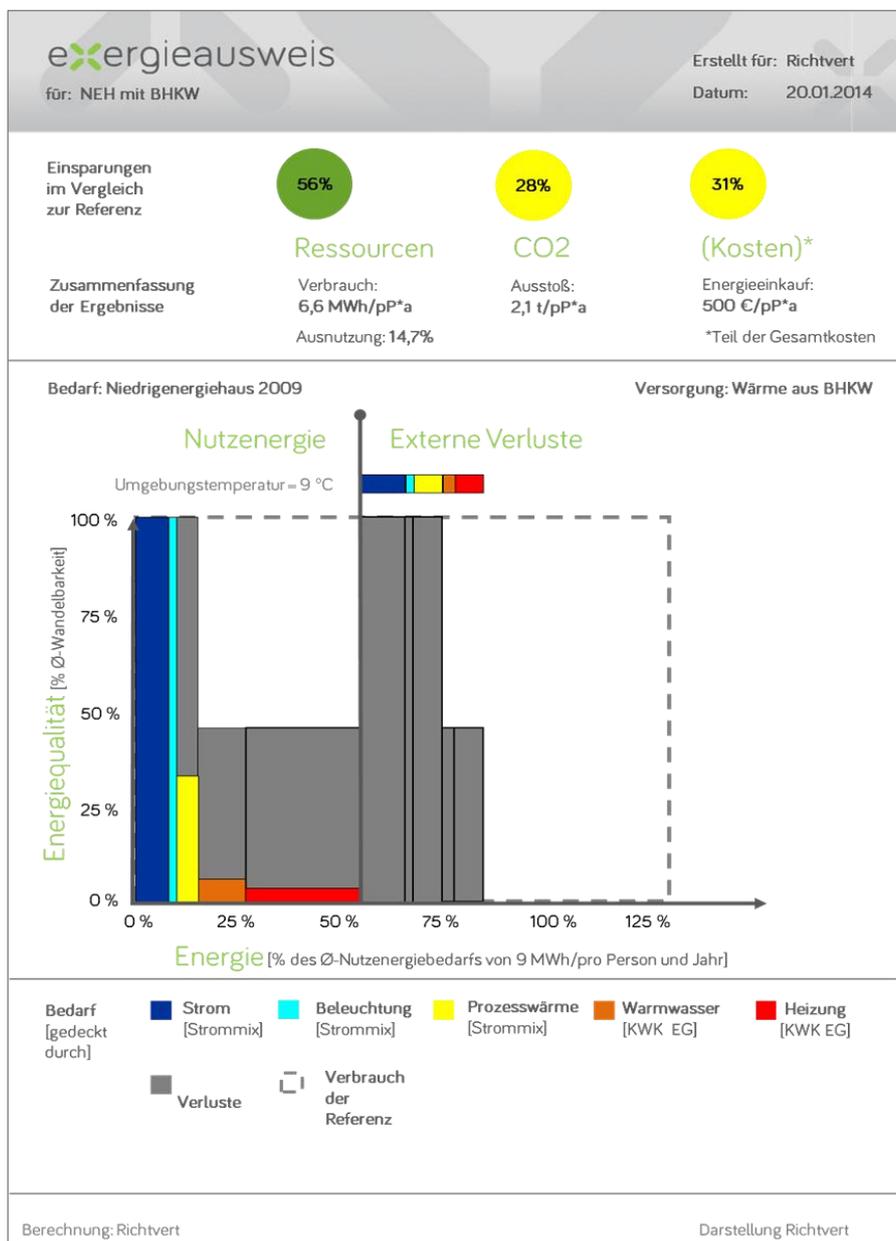
Die Betrachtung der einzelnen Wärmeversorgungssysteme hat deutlich gezeigt, dass neben der quantitativen Bewertung auch die Qualität der Energie, d.h. die prozentuale Arbeitsfähigkeit auf Basis der Exergie, in die Bewertung mit aufgenommen werden muss, um Fehlsteuerungen auf dem Weg zu einer CO₂-neutralen Kommune zu vermeiden.

Die Studie sollte untersuchen, ob die Exergiebewertung als übergeordneter Indikator hilfreich für die Gesamtbewertung einer Kommune auf dem Weg zur CO₂-Neutralität sein kann. Ein wichtiges Ergebnis ist, dass ein exergiebasierter Kennwert geeignet ist, um die anderen Indikatoren, z.B. des Benchmark Kommunalen Klimaschutz, sinnvoll zu ergänzen. Eine Vernachlässigung der Energiequalität bei der Bewertung von Wärmeversorgungssystemen führt zu signifikanten Fehleinschätzungen von Effizienzen und den Verbräuchen energetischer Ressourcen und sollte nach Möglichkeit vermieden werden. Die folgenden Empfehlungen lassen sich aus der Untersuchung ableiten:

- Neben der allgemeinen Sensibilisierung der Kommunen zum Thema exergetische Bewertung kann die Kommune über den Exergieausweis im Detail exergetische Berechnungen zu Einzelgebäuden oder Quartieren durchführen (lassen). Ein einfacher Zugang zum Thema auf Quartiersebene ist auch über die Multi-Kriterien-Matrix möglich. Betrachtungen auf Ebene der gesamten Stadt sind umso leichter nachvollziehbar, je homogener die Energienutzung ist.
- Um die langfristigen Ziele einer weitreichenden Verringerung der Treibhausgasemissionen bis zum Jahre 2050 bei gleichzeitiger Reduzierung des Endenergiebedarfs zu erreichen, müssen die Strategien im Sinne einer exergetischen Optimierung weiterentwickelt werden.
- Nachhaltigkeit bedeutet aber nicht nur, auf fossile Energien weitgehend zu verzichten, sondern auch erneuerbare Energien möglichst effizient zu nutzen. Bereits heute stoßen wir in Deutschland insbesondere bei der Biomasse an die Grenzen der Verfügbarkeit, da der inländische Biomassemarkt in wenigen Jahren weitgehend genutzt sein wird. Außerdem wird der Biomasseeinsatz der Zukunft für viele Sektoren reklamiert (stoffliche Nutzung, Kaskadennutzung, KWK, Verkehr...) sodass hier ein „Wettbewerb der Systeme“ die Folge sein wird.
- Aktuelle Planungskriterien, z.B. im Rahmen der EnEV, fördern durch einen niedrigen Primärenergiefaktor den Einsatz von direkt verbrannter Biomasse und erlauben dann auch eine Abschwächung des Dämmstandards. Hier sollte ein deutliches Signal die begrenzte Verfügbarkeit dieser Ressource aufzeigen. Die exergiebasierte Bewertung sorgt hier z.B. über die Kriterien Primärenergie-Ausnutzung oder Primärenergie-Verbrauch dafür, dass auch Defizite bei der Nutzung speicherbarer erneuerbarer Energien physikalisch fundiert bewertet werden können.
- Neben dem Exergieausnutzungsgrad (in der Multi-Kriterien-Matrix mit „Effizienz_{ex}“ bezeichnet) kann der Primärenergieverbrauch pro Fläche für „Raumwärme- und Warmwasser“ dazu dienen, die Gebäudesubstanz und deren Versorgung in einem Gebiet zu charakterisieren, während der Primärenergieverbrauch pro Einwohner (gesamt) ein übergreifender Indikator für die pro Kopf Exergieintensität des Quartiers ist.
- Um die kommunalen Nutzer nicht unnötig mit der bisher noch nicht übermäßig bekannten Größe Exergie zu konfrontieren empfehlen wir eine sukzessive Heranführung an das Thema. Eventuell bietet es sich auch an, bei der Darstellung des Primärenergie-Verbrauchs auf das Wort Exergie zu verzichten.

- Im Rahmen des Exergieausweises wird z.B. die „Primärenergie“ als „Ressourcen“ dargestellt. Hier handelt es sich allerdings nur um den stofflichen und energetischen Ressourcenverbrauch für den „stationären“ Betrieb und nicht um den Ressourcenverbrauch für den gesamten Lebenszyklus. Perspektivisch kann dieser exergiebasierte Ressourcenbegriff jedoch auch auf die vom VDI vorgeschlagene Lebenszyklus-Bilanzierung erweitert werden (VDI 2014).
- Um konkrete Grundsatz-Entscheidungen in Hinblick auf kommunale Bauprojekte zu treffen, können die Ergebnisse einer exergiebasierten Bewertung detailliert und trotzdem anschaulich mithilfe des Exergieausweises dargestellt werden. In einem Ampelsystem zeigt er gegenüber dem Referenzfall die relative Einsparung bzw. Minderung der Ressourcen und der CO₂-Emissionen und Energiekosten auf. Die Primärenergie-Ausnutzung wird hier als Ressourcenausnutzung zusätzlich angegeben (siehe Abbildung IX).

Abbildung IX: Entwurf für ein Alternativszenario eines erweiterten Exergieausweises



2 Summary

Essential fields of action for the reorganisation of the current energy supply structure may be found in energy supply and energy consumption systems. Local authorities often face challenges due to the fact that changes have to be initiated and implemented locally at the district level. The acceleration of energy conservation, cogeneration (combined heat and power (CHP) processes) and renewable energies is undisputed. However, the specifics of the actual implementation of these concepts, i.e. the switch of energy systems and the adaptation to decreasing energy demands, are currently associated with a certain level of confusion and uncertainty. In addition to criteria such as overall energy efficiency and greenhouse gas savings, the exergy of an energy stream is increasingly employed for assessment purposes. Exergy analysis considers both the quantity and the quality of an energy stream. The quality measure of a given energy stream is its ability to perform physical work. The present study analysed opportunities for future optimisation of municipal energy supply and consumption systems considering both exergy and CO₂ savings potentials.

2.1 Principles of exergy analysis and evaluation of reference systems

In principle, exergy may be defined as the product of the energy and the energy quantity of an energy stream. The goal of exergetic optimisation is the minimisation of the energy consumed for the supply of demand. In consequence, the reduction of energy losses is paramount. Moreover, optimised alignment of supply energy quality with demand energy quality facilitates optimal utilisation of available energy. Energy conservation and energy efficiency measures result in an overall reduction of the general energy demand. In addition, the use of low-temperature sources improves the exergy efficiency.

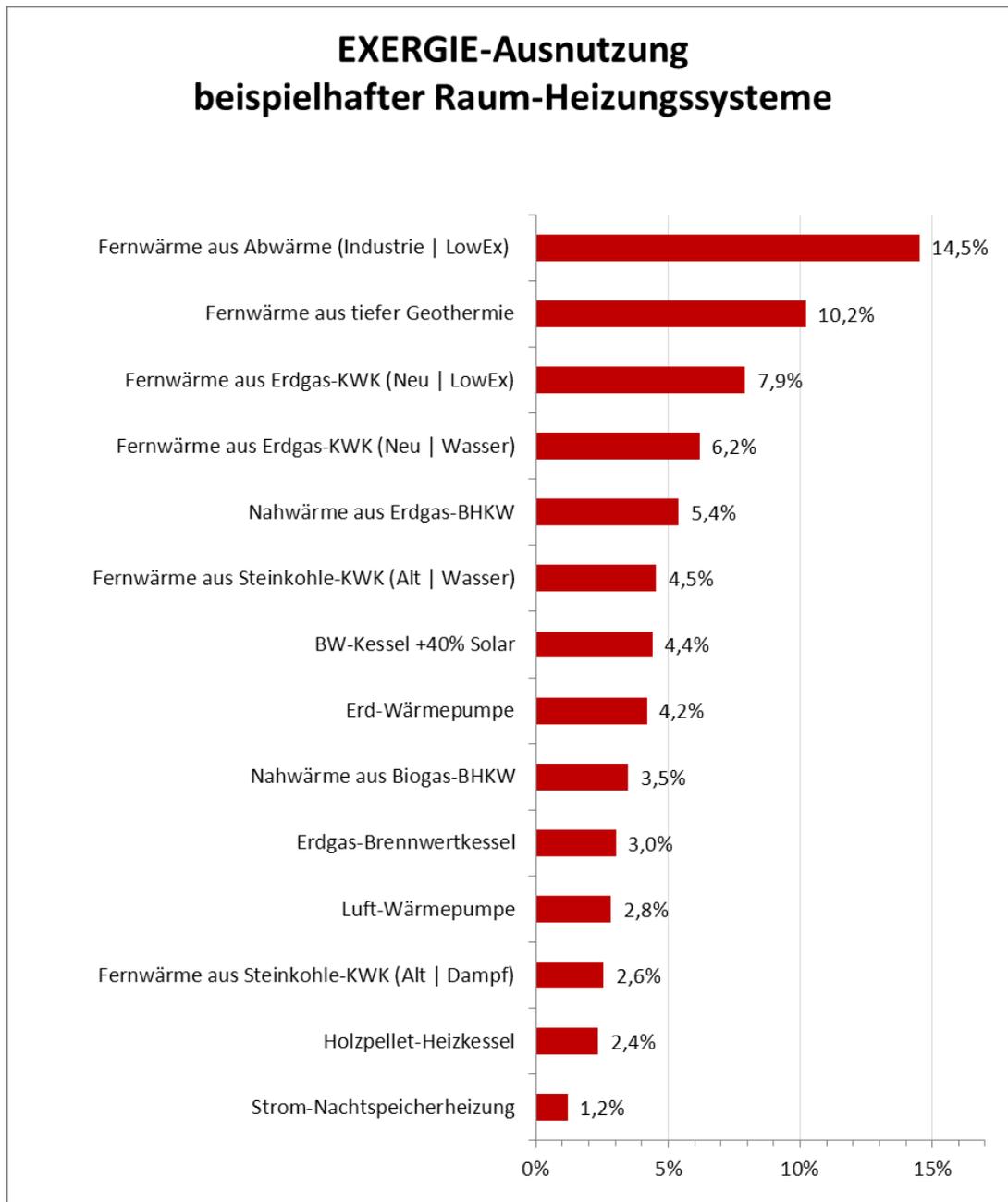
As a rule, the current level of energy supply quality substantially exceeds the actual demand. Future optimisation efforts of the overall system should be directed towards a better alignment of the supply energy quality with the quality of the actual energy demand. The use of low-temperature heating and high-temperature cooling systems in combination with adequate supply systems, i.e. LowEx systems, may substantially reduce both the fossil and renewable primary energy demand of buildings.

The transfer magnitude of a heat stream defines the construction and dimensioning of technical components. In consequence, construction may not be based solely on exergy calculations. Exergy should be regarded as a parameter suitable for the analysis and assessment of technical systems. However, its applicability during construction is limited.

By definition, the utilisation of exergy as an advancement of the energy efficiency concept includes energy efficiency considerations, yet it considerably extends the scope. Exergy utilisation allows the comparison of different systems using diverse energy carriers and materials. Thus, it is possible to examine the suitability of different energy systems for the supply of a given demand with reliable data. However, the exergy usage of cooling systems is often a rough estimate based on stationary calculations. Cooling was therefore excluded from the present project.

The calculation of the exergetic utilisation of different heat systems provided important baseline data for municipal assessment purposes:

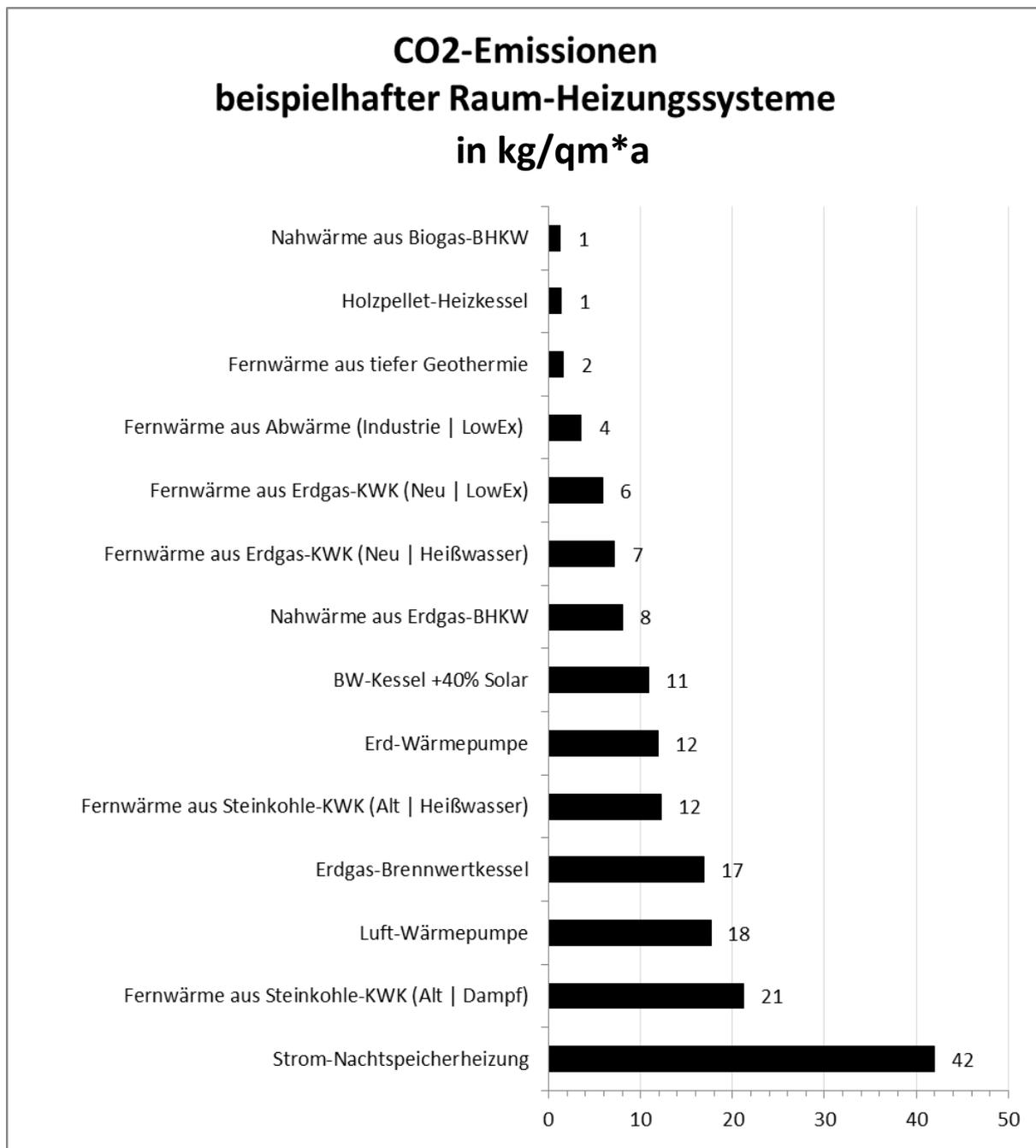
Figure X: Comparison of exergetic utilisation of different heating systems (useful energy for space heating = 60 kWh/(qm*a))



Heating systems require different supply temperatures for different applications in the building sector, i.e. for space heating on the one hand and the supply of hot potable water on the other. To maximise output from an energy stream, it is useful to cascade different temperature levels according to their building technology requirements. Intelligent energy management, bi-directional supply concepts, short-term storage and adapted supply are all associated with promising prospects for the exergetic optimisation of total energy consumption.

The following overview is itemised by CO₂ emissions and illustrates the favourable performance of a number of exergetically non-efficient systems such as local heat from biogas CHP plants or wood pellet boilers due to their use of renewable fuels. For all fossil energy technologies, an increase in exergy utilisation is correlated with a decrease in CO₂ emissions.

Figure XI: Comparison of CO₂ emissions of different heating systems in kg/qm*a (useful energy for space heating = 60 kWh/(qm*a)).

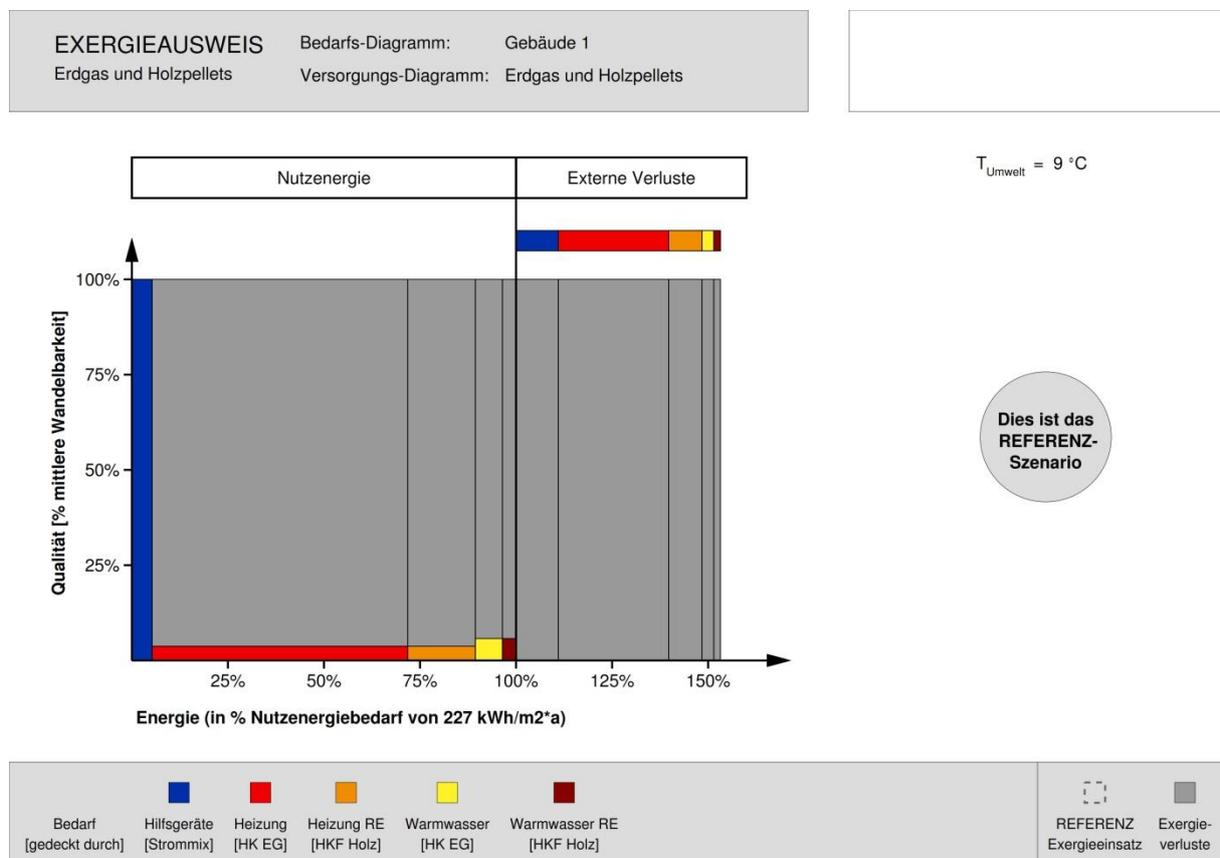


2.2 Analysis of municipal building projects with the exergy pass

After the analysis of individual systems, the question of the assessment of complex energy supply solutions arises. In this context, the exergy pass presents an adequate model for the introduction of a consistent concept for exergy analysis in municipal assessment practice. The exergy pass may supplement municipal overview balances with a detailed assessment of individual construction projects, i.e. buildings or building complexes including the fitted technologies for electricity, heating and cooling.

The exergy pass presents an analytical tool for the comparison of different technologies considering energy efficiency, primary energy use and primary exergy consumption based on a comprehensive system analysis of total exergy (Jentsch 2010).

Figure XII: Exergy pass for a residential building



Source: Richtvert

The exergy pass focuses on the visual representation of the energy system of a building. All data recorded in text format in the energy certificate may be supplemented with the exergy pass after an efficiency analysis. A comparison of energy certificate and exergy pass immediately reveals the loss of more than 90% of primary exergy in current building systems. Internal losses in particular are responsible for low exergy efficiency.

The energy certificate aims to communicate the fact that primary use of energy is slightly lower than final energy consumption. In contrast, the exergy pass reveals that primary energy exceeds final energy by about 60%. The exergy pass may be issued for non-residential buildings in a similar fashion.

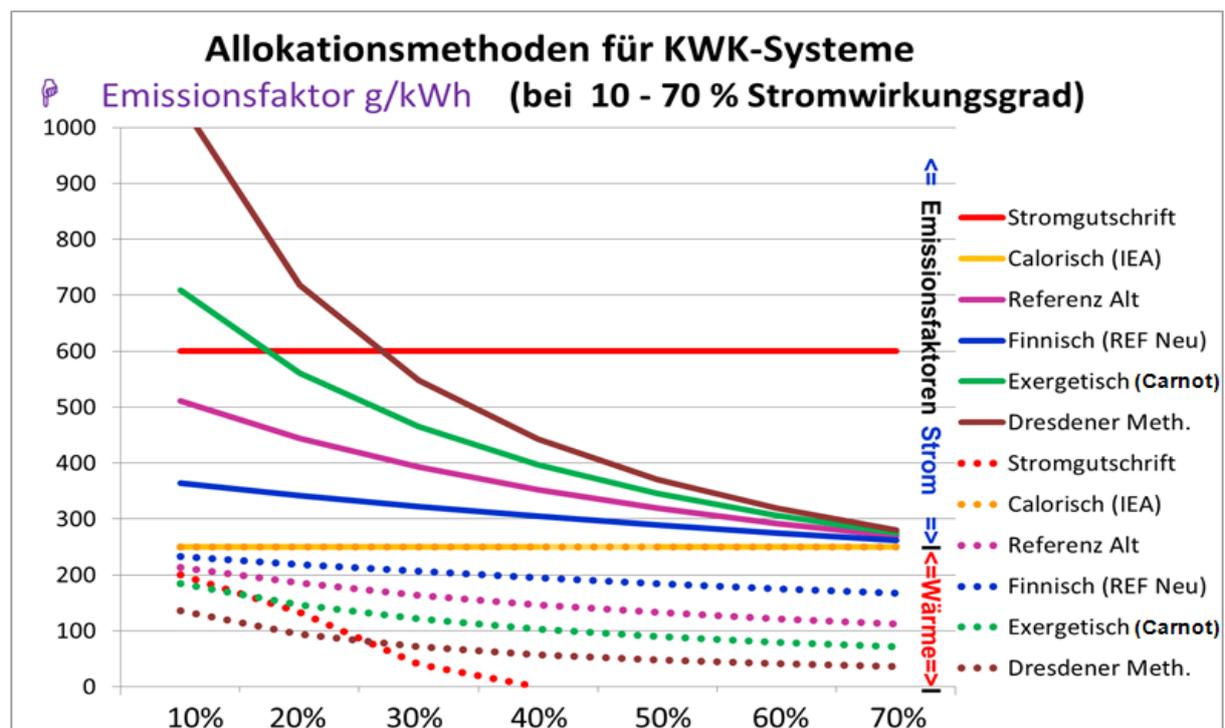
2.3 Allocation of co-products in cogeneration plants

A number of different methods for the assessment of the efficiency of CHP plants and the allocation of primary energy and emissions to target energies are available (see e.g. /VDI 4608-2/). For the purpose of calculation of and comparison amongst model energy systems and real CHP systems, selection of adequate methodology is paramount. The following methods were examined:

- Carnot method (also known as Exergy method)
- Credit method
- Finnish method
- Caloric method/IEA method
- Energy conversion efficiency method (sensu Mauch 2010)
- Dresden method
- Exergy loss method

A comparison of the emission factors electricity and heat of the different methods may be found in the following figure.

Figure XIII: Comparison of different allocation methods in correlation with the electrical conversion efficiency



Source: IFEU

With the exception of the electricity credit method, all methods are associated with positive emission factors. The Caloric method ranks electricity and heat on equal terms, thus refuting both elemental laws of physics and processes in real applications in power plants. The Finnish method endorsed, among others, by the EU Services Directive favours electricity to the disad-

vantage of heat. Conversely, the Dresden method favours heat over electricity. However, the proposed argument of a greater ‘real’ value of electricity in addition to the greater ‘physical’ value is difficult to follow.

The present project proposes an exergetic assessment of municipalities and existing facilities for energy generation. It explicitly aims to factor in the different thermodynamic qualities of electricity versus heat into the overall assessment. In consequence, the IFEU selects the Carnot method (Exergy method) as the only valid method for the independent and scientifically sound assessment of co-products as intended in this project.

2.4 Exergetic assessment of municipalities

In the following, the calculations of the base scenarios are applied to space heating, from primary energy to final consumption, at the municipal level. The different energy streams are illustrated in Sankey diagrams. The combination of different city and supply models generates typical supply and consumption patterns. These prototypes may be compared with real cities according to relevant size and actual supply options. Moreover, it is possible to infer the consequences of a switch in energy supply through the modelling of alternative supply options such as district heating derived from CHP, geothermal or waste heat recovery and heat pumps. These considerations may aid to prepare the ground for the planning of major system changes.

Figure XIV illustrates the Sankey diagram for a decentralised heat supply in residential buildings.

Figure XIV: Sankey diagram for decentralised energy supply

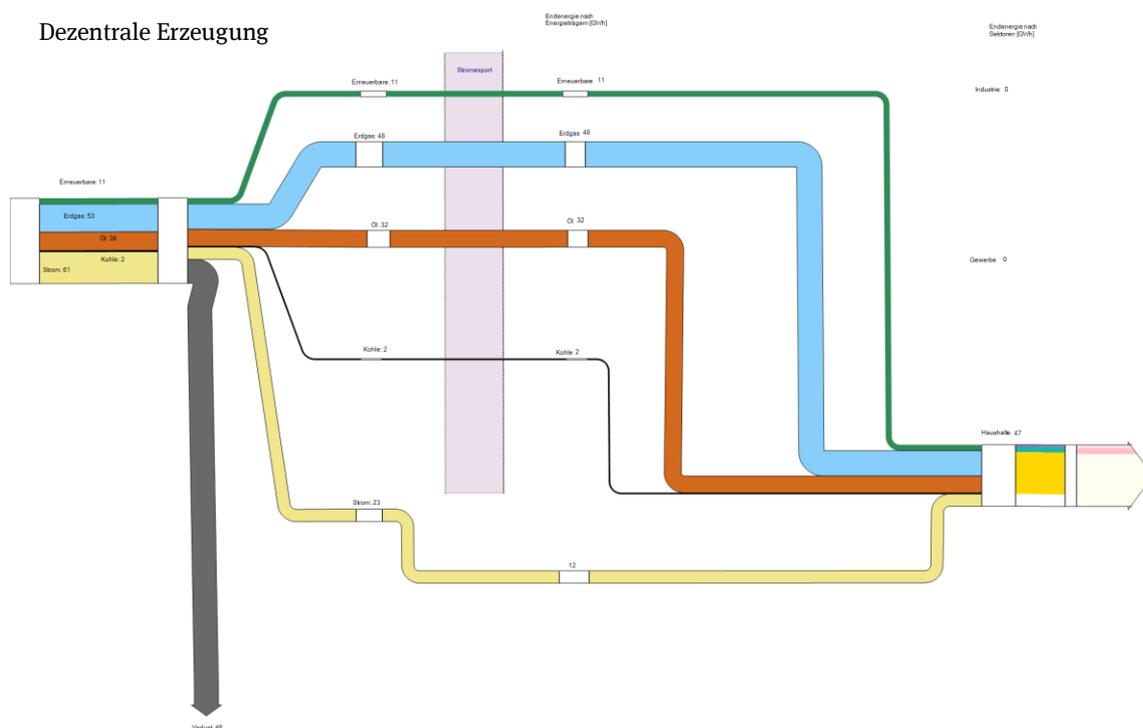
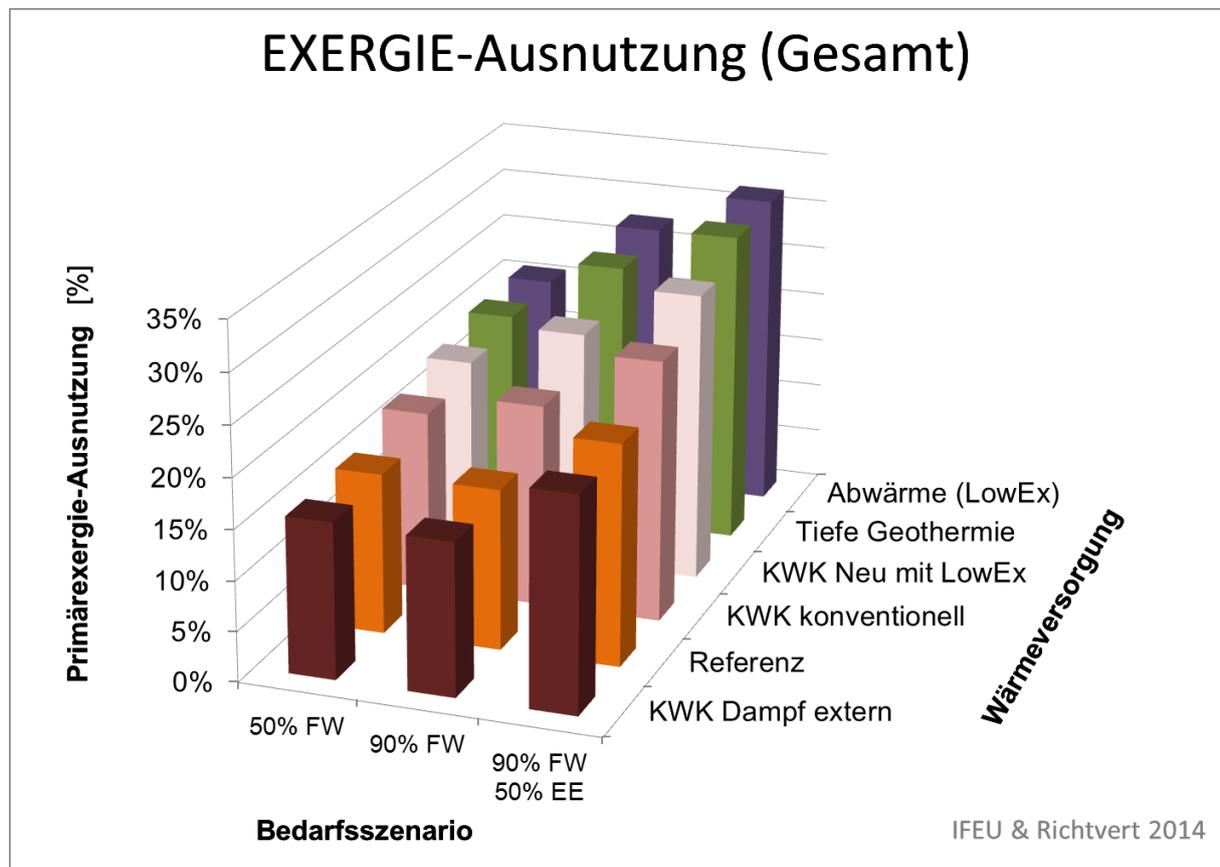


Figure XV illustrates primary energy consumption across all applications (process heat, hot water, space heating and electricity).

Figure XV: Primary energy utilisation across all applications (process heat, hot water, space heating and electricity)

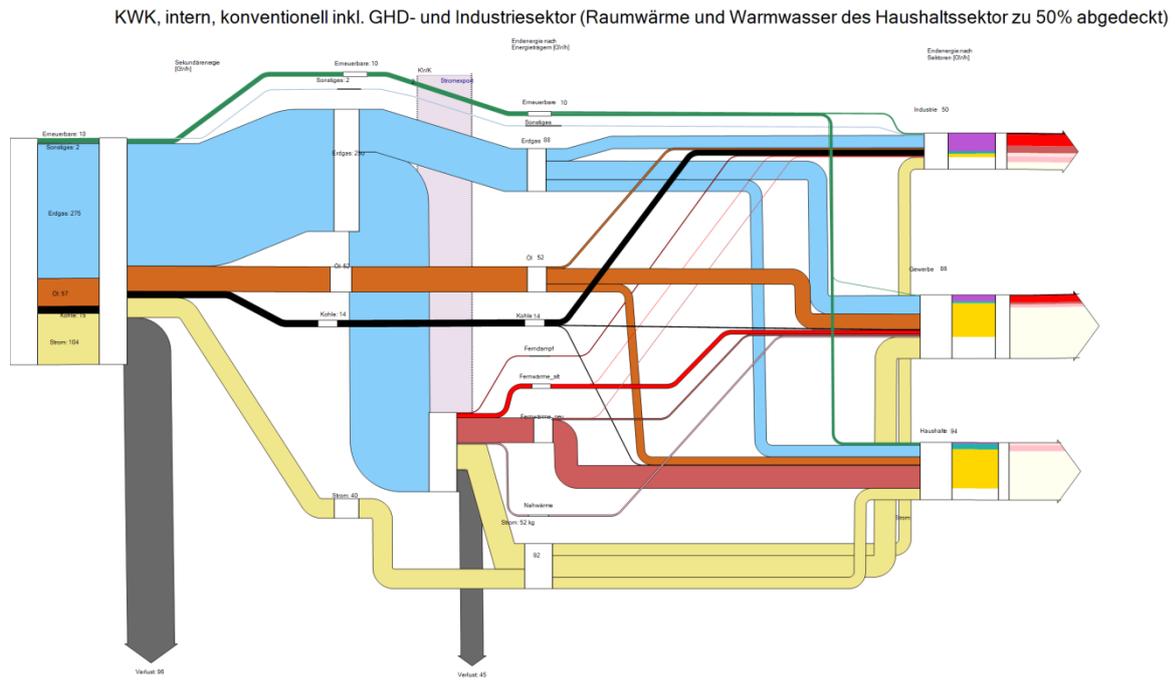


The comparison of different available supply scenarios reveals the same system order pattern independent of the demand scenario under investigation. For instance, supply with waste heat from industrial sources achieves 30% exergy under the assumption of 90% district heating / 50% renewable energies and thus compares favourably with all other options. The second best option is district heating derived from geothermal energy, followed by district heating from new CHP sources, district heating from conventional CHP plants and the reference. The least favourable option is district heating from outdated steam CHP plants with external generation.

Total primary energy utilisation across the entire city increases with an increase of the proportion of electricity required as useful energy and decreases with an increase in heat demand. This is due to the considerably higher primary exergy utilisation of electricity supply (e.g. 38%) compared with the relatively low primary exergy utilisation of heat supply, particularly for space heating and hot water (e.g. 6%).

Consideration of an entire city reveals the following situation:

Figure XVI: Sankey diagram for an entire city



In the case that the investigation focuses on primary exergy utilisation for the supply of space heating and hot water, the evidence primarily reveals a strong correlation with structural conditions in the city and a lesser effect of the sectors under investigation here.

2.5 Development paths towards CO₂ neutrality

The goal is the development of an instrument for municipalities to reliably explore useful options for the progress of individual districts (new developments or existing building stock) towards CO₂ neutrality. The main focus is placed on the qualitative assessment of different indicators and their evaluation in the context of the overall goal.

To illustrate and present the complex material for municipal users, a programme based on Microsoft Excel 2010 (EXCEL Tool) was developed during the project.

Figure XVII: Multi-criteria matrix for the qualitative assessment of energy systems at district level

Dämmstandard				
☹	☺	☺	☺	☺
●	●	●	●	
Effizienz_{ex}				
☹	☺	☺	☺	☺
●				
CO₂				
☹	☺	☺	☺	☺
●	●			
EEQ / Abwärme				
☹	☺	☺	☺	☺
Wärmenetz				
☹	☺	☺	☺	☺
○				

Insulation standard: Here, the actual or proposed insulation standard (heat demand) is correlated with a target value (passive house). 5 points equal target value achieved. 0 points equal an energy demand exceeding the target value approx. three times.

Efficiency: Here, the primary exergy utilisation (see Chapter 5.8) is ranked incrementally in 1.5% steps. To avoid confusion with the classic final energy efficiency, the symbol 'ex' is included. 5 points are awarded for 8% or higher. 0 points equal below 2%.

CO₂ emissions: Here, the CO₂ emissions per energy reference area in correlation with the target value are assessed. 5 points equal specific CO₂ emissions below 5 kg CO₂/(m²*a), 0 points equal CO₂ emissions exceeding the target value five times or more.

RE/ waste heat: Here, the proportion of renewable energies in heat supply or waste heat is factored in. 5 points equal a proportion of RE/ waste heat exceeding 90%. 0 points indicate no use of RE/ waste heat.

Heat grid: Here, the suitability for a heat grid is modelled. The heat density (see Chapter 9.2.3) is ranked in increments of 200 kWh/(m²*a) starting with 300 kWh/(m²*a). 5 points equal a heat density exceeding 1100 kWh/(m²*a).

The opportunities for application of the multi-criteria matrix are exemplified in the modelling of a new residential housing estate. The multi-criteria matrix intends to illustrate quantitative effects, give an overview and highlight priority aspects. The matrix may not replace in-depth analyses as the base of fundamental decisions. However, it presents a valuable first step in the decision-making process.

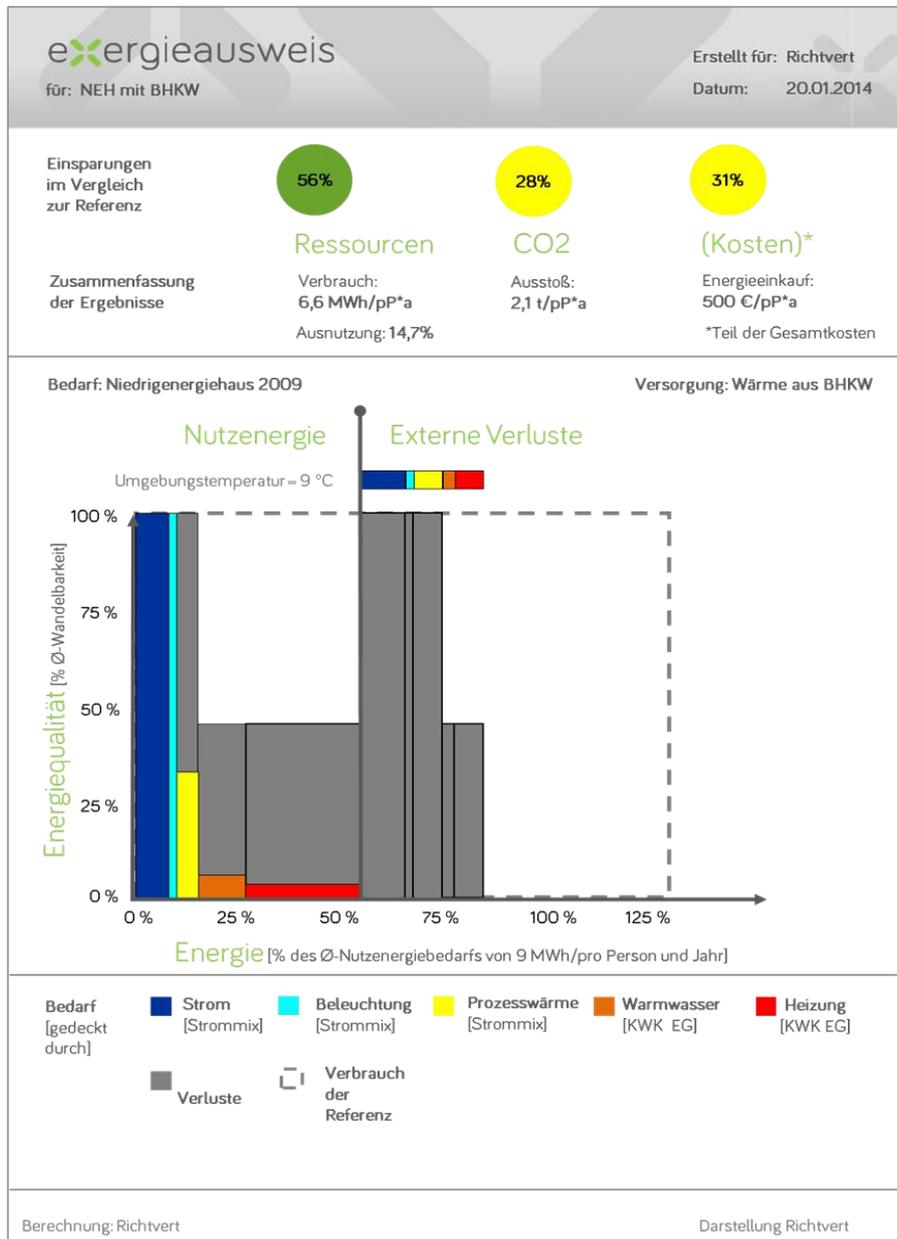
The examination of individual heat supply systems clearly revealed a need for the consideration of the energy quality in addition to quantitative assessment. In other words, the working capacity in percent based on exergy should be included to avoid mismanagement on the way towards CO₂ neutrality at the municipal level.

The present study was designed to explore the usefulness of exergy assessment as an indicator for the overall assessment of a municipality striving for CO₂ neutrality. One important outcome is the suitability of an exergy-based parameter to complement existing indicators, e.g. the Benchmark Kommunal Klimaschutz. A neglect of the energy quality during the assessment of heat supply systems leads to substantial miscalculations of efficiencies and energy resource consumption. These errors of judgment should be avoided wherever possible. The study concluded with the following recommendations:

- In addition to overall information and education of municipalities on the topic of energy assessment, the exergy pass may serve as a tool for detailed exergetic calculations examining individual buildings or districts. A simple introduction may be found with the multi-criteria matrix. The assessment of an entire city is easier to comprehend if the level of energy homogeneity is high.
- Strategies for exergetic optimisation are needed for the achievement of the overall goal of a general reduction of greenhouse gas emissions with simultaneous decrease of final energy consumption by 2050.
- The concept of sustainability includes both the general abandonment of fossil energy use and the most efficient use of renewable energies. Already, the availability of biomass in Germany reaches capacity due to the fact that the domestic biomass market will be fully utilised in the near future. Moreover, the future biomass market is relevant for many sectors (material use, cascade use, cogeneration, transport). In consequence, a 'competition of systems' is expected.
- Current criteria for planning, e.g. within the scope of German energy saving regulations (EnEV), promote the use of primary biomass combustion due to a low primary energy factor and allow the easing of insulation standards. A distinct signal reflecting the limited availability of the resource is needed. For instance, an exergy-based assessment employing the criteria primary exergy use and primary exergy consumption would factor in deficits associated with the use of storable renewable energies with an adequate foundation in general principles of physics.
- In addition to the level of exergy utilisation (see 'efficiency_{ex}' in multi-criteria matrix), the primary exergy consumption per area for space heating and hot water may be used to characterise existing building stock and supply in an area. In contrast, the primary exergy consumption per capita (total) serves as an indicator of higher order for the exergy intensity per capita in a given district.
- For municipal users, we recommend a gradual introduction to the currently little known exergy parameter. It may be prudent to initially avoid the term exergy when illustrating the primary exergy consumption.
- In the exergy pass, primary exergy is defined as a resource. In this context, it addresses material and energetic resource consumption in stationary applications, as opposed to resource consumption across the entire life cycle. Future approaches may include an exergy-based resource definition for the life cycle analysis method proposed by the VDI (VDI 2014).
- For specific decisions on municipal construction projects, the results of an exergy assessment may be reported in a detailed, yet clear manner with an exergy pass. The pass

highlights relative savings or decreases in resource consumption, CO₂ emissions and energy costs with the help of a traffic light system. In addition, utilisation of primary exergy as a measure of resource utilisation is reported (see Figure XVIII).

Figure XVIII: Draft of an alternative scenario for a revised exergy certificate



3 Einleitung

Anthropogene Treibhausgasemissionen werden vorrangig durch den Verbrauch von Ressourcen verursacht. Insbesondere die Verbrennung von fossilen Energieträgern für den Betrieb der technischen Infrastruktur und die Produktion von Gütern führt zu einer stetigen Erhöhung von Treibhausgasen in der Atmosphäre. Es existieren zwei prinzipielle Möglichkeiten diese Treibhausgasemissionen zu reduzieren.

Einerseits kann eine „Energiequelle“ gewählt werden, welche ohne die Emission von Treibhausgasen betrieben werden kann (z.B. Wind- oder Solarenergie) auf der anderen Seite können Technologien so kombiniert werden, dass ein reduzierter Energie- und Ressourceneinsatz erreicht wird. D.h. neben der Entscheidung für erneuerbare Energien sind die Energie- und Ressourceneffizienz sowie die Absenkung des Energiebedarfs zentrale Handlungsfelder zur Reduktion der Treibhausgasemissionen.

Nach dem aktuellen Energiekonzept der Bundesregierung liegen die Treibhausgas-Minderungsziele auf Bundesebene bei 80% bis 2050 gegenüber 1990. Um diese Ziele erreichen zu können, müssen ambitionierte Maßnahmen auf Bundes-, Landes- und kommunaler Ebene umgesetzt werden. Gleichzeitig müssen entsprechende Rahmenbedingungen europaweit geschaffen werden, die eine solche Entwicklung unterstützen.

Wie drastisch die Veränderungen bis 2050 sein werden, zeigen die Auswertungen im Rahmen des „Modell Deutschland“ des WWF: Das Energieabnahmesystem der Zukunft wird sich stark verändern (müssen). So wird beispielsweise im Energieszenario des WWF davon ausgegangen, dass der Heizenergiebedarf eines Gebäudes im Jahr 2050 bei durchschnittlich 10 bis 15 kWh/m²a liegt – alle Gebäude verfügen demnach bis dahin über einen Passivhausstandard. Ähnliche Veränderungen werden im industriellen Bereich notwendig. In der Studie zum Klimaschutzkonzept 2020 plus für Baden-Württemberg wurde vom IFEU dargestellt, dass sich demnach auch Produktionsprozesse stark verändern werden.

Offene Fragen bestehen deshalb vor allem in der Wegbeschreibung zum Energiesystem der Zukunft wie auch in der technisch-wirtschaftlichen Umsetzbarkeit. Im Stromsystem sind erste Weichen für eine Gesellschaft mit erneuerbarem Strom gestellt: Im Rahmen der E-Energy-Forschung werden Systemintegrationsmodelle geschaffen, die eine verbesserte Einspeisung und Regelung der erneuerbaren Energien zum Ziel haben. Gerade in der Wärmeversorgung für die Sektoren Private Haushalte, GHD oder Industrie sind diese Transformationsprozesse noch nicht ausreichend erforscht. Überschneidungen zum Strommarkt müssen hier im Rahmen der erneuerbaren Energien und der KWK berücksichtigt werden.

Wesentliche Handlungsfelder für den Umbau der heutigen Energieversorgungsstruktur liegen in den Energieversorgungs- und Energieverbrauchssystemen. Kommunen stehen hier vor besonderen Herausforderungen, da die Veränderungen vor Ort angestoßen und umgesetzt werden müssen. Diese Veränderungen betreffen Bewohner, Betriebe, die öffentlichen Einrichtungen wie auch die Stadtwerke, die entsprechend der zukünftigen Entwicklungen Geschäftsfelder überdenken müssen.

In Deutschland gibt es bereits fortschrittliche Kommunen, die seit einiger Zeit aktiv den Klimaschutz vorantreiben. Viele Aktivitäten auf kommunaler Ebene beziehen sich auf Emissionsreduktionsziele bis 2020. Die langfristige Betrachtung der Klimaschutzziele sowie eine entsprechende Vorausschau, welche Maßnahmen notwendig wären, um bis 2050 ambitionierte CO₂-

Neutralitätsziele zu erreichen, gewinnen zunehmend an Interesse. Neben den kleineren Kommunen, die ggf. im Bereich Erneuerbare Energien über ein Energieüberangebot verfügen, treten in dieser Diskussion Städte und Agglomerationen vermehrt in den Mittelpunkt.

Eine Forcierung der Bereiche Energieeinsparung, Kraftwärmekopplung und Erneuerbare Energien ist unumstritten. Im Detail bestehen aber zurzeit große Unsicherheiten, wie der Wechsel der Energiesysteme und die Anpassung an den teilweise immer kleiner werdenden Energiebedarf konkret in Angriff genommen werden soll. Zur Beantwortung dieser Frage gerät als Bewertungskriterium, neben der allgemeinen Energieeffizienz und der Treibhausgasreduktion, zunehmend auch die Exergie eines Energiestromes in den Mittelpunkt. Die Exergieanalyse berücksichtigt nicht nur die Menge eines Energiestroms, sondern auch dessen Qualität. Als Maßstab für die Qualität eines Energiestroms gilt dabei die physikalische Arbeitsfähigkeit. Wie die verschiedenen kommunalen Energieversorgungssysteme und Energieabnahmesysteme in Zukunft sowohl exergetisch als auch in Bezug auf CO₂-Minderung optimiert werden können, soll im Rahmen dieses Forschungsprojektes analysiert werden.

Das Thema Exergie ist eher dem Kraftwerksplaner als dem kommunalen Klimamanager ein Begriff. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wird untersucht, wie die verschiedenen kommunalen Energieversorgungssysteme und Energieabnahmesysteme in Zukunft sowohl exergetisch als auch in Bezug auf CO₂-Minderung optimiert werden können. Dabei könnte die Exergie als ein weiterer Indikator neben bekannten Indikatoren wie Endenergieverbrauch oder CO₂-Emissionen in die kommunale Klimaschutzpraxis einfließen.

Vereinfacht kann die Exergie als Produkt aus Energie und ihrer Qualität verstanden werden (Jentsch 2010). Die Qualität der Energie, die auch Wandelbarkeit, Wertigkeit oder Exergie- bzw. für Wärme Carnotfaktor genannt werden kann, ist dabei ein Maß für die Umwandelbarkeit der Energie in technische Arbeit. Einige Energieformen wie z. B. Strom können theoretisch zu 100% in technische Arbeit gewandelt werden, während andere, z. B. Wärmeströme, auf dem Temperaturniveau von Raumwärme nur zu einem geringen Anteil von z. B. 4% in technische Arbeit gewandelt werden können. Diese Sichtweise erlaubt es, einen wesentlichen Aspekt des Unterschieds von Exergie und Energie zu verstehen. Während die Energie ein ausschließliches Maß für die Größe eines Transfers darstellt, erlaubt es die Exergie zusätzlich, auch die Nutzbarkeit der betrachteten Energieform vor dem Hintergrund der definierten Umwelt zu berücksichtigen. Die Exergie ermöglicht damit umfassendere Analysen und Bewertungen im Vergleich zu ausschließlich energiebasierten Betrachtungen.

4 Stand der Forschung

In verschiedenen Projekten wurden bereits exergetische Aspekte mit dem Ziel der CO₂-Einsparung betrachtet. Deshalb wurde eine Literatur- und Dokumentenrecherche durchgeführt, um wichtige Materialien zum Thema Exergie zu sichern. Neben dem Internet wurden die folgenden Recherchequellen genutzt: Datenbanken BMU, BMWi, Landesinstitute der Ministerien, Verbände, KliBa, EU-Projektdatenbank, Zentrum für politische Bildung.

Es wurden etwa 80 Publikationen und Internetquellen festgehalten. Im Folgenden sind die für die Fragestellung des Vorhabens interessantesten Projekte aufgelistet. Der Fokus liegt dabei auf der Auswertung der langfristigen Szenarien für die zukünftige Energieversorgung und den strategischen Empfehlungen bzgl. des Zusammenspiels der Energienachfrage mit dem Energieangebot. Außerdem stehen wissenschaftliche und praxisorientierte Studien und Projekte zum Thema exergetische Betrachtung von Energiesystemen im Mittelpunkt, wie z.B. das Projekt „Low Exergy Systems for High-Performance Buildings and Communities“. Die Literaturrecherche baut ebenfalls auf bisherigen Recherchen, z.B. im Rahmen des Projektes „Energiebalance“ sowie zum Projekt „Null-Emissions-Kommune“ auf.

Darüber hinaus wurden folgende Studien mit einbezogen:

- CO₂ – freies München (Siemens)
- Leitstudien des BMU
- Modell Deutschland (WWF)
- Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Quellen (UBA)
- Energiebalance
- Veröffentlichungen von Städten mit dem Ziel der CO₂-Neutralität.

4.1 Überblick

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass umfangreiche Literatur zu technischen und bauphysikalischen Grundlagen zu finden ist, weniger hingegen zu vergleichenden exergetischen Berechnungsmethoden auf kommunaler Ebene.

4.2 Übersicht/Grundlagen

Die Grundlagen der exergetischen Bewertung, die Definition der Exergie sowie die thermodynamischen Zusammenhänge und Gesetzmäßigkeiten sind in zahlreichen nationalen und internationalen Fachliteraturen enthalten. Zu den bekanntesten und meist zitierten zählen:

- Thermodynamik - Grundlagen und technische Anwendungen. (Baehr, Kabelac, 2012)
- Exergy – Energy, Environment and Sustainable Development. (Dincer, Rosen, 2007)
- Fundamentals of Engineering Thermodynamics. (Moran, Shapiro, 1998)
- Advanced Engineering Thermodynamics. (Bejan, 1997)

Darauf aufbauend sind in den Projekten

- Projektverbund LowEx: Nutzung von regenerativen Energiequellen in Gebäuden durch den Einsatz von Niedrig-Exergiesystemen und
- IEA ECBCS Annex 37: Heating and Cooling with Focus on Increased Energy Efficiency and Improved Comfort.

auf nationaler sowie auf internationale Ebene Ansätze für die exergetische Bewertung von Gebäuden und deren Anlagentechnik entwickelt worden. Dies beinhaltet eine Beschreibung der Energie- und Exergieflüsse innerhalb von Gebäuden sowie der Bewertungsgrenzen für die ein-

zelen Systemkomponenten. Allgemeine Erläuterungen zum Exergie-Konzept sowie eine detaillierte Beschreibung finden sich u.a. in

- Exergy Concept and its application to the built environment, Building and Environment. (Shukuya, 2007) und
- Introduction to the Concept of Exergy – for a better Understanding of Low-Temperature-Heating and High-Temperature-Cooling Systems. (Shukuya, Hammache, 2002).

Im Rahmen dieser Projekte entstand auch eine erste Fassung des IEA ECBCS Pre-Design Tools – Tool for buildings exergy analysis, das sowohl eine stationäre energetische als auch exergetische Bewertung von Gebäuden und deren Anlagentechnik ermöglicht. Eine ausführliche Beschreibung des Pre-Design Tools ist in folgenden Arbeiten nachzulesen:

- Methodology for the Modelling of Thermally Activated Building Components in Low Exergy Design. (Schmidt, 2004)
- More sustainable buildings through exergy analysis – Solar thermal and/or ventilation systems. (Schmidt, Torío, 2009)
- Exergy analysis applied to building design. (Sakulpipatsin, Schmidt, 2011)

Der Review-Report von Torio, Angelotti und Schmidt (2008) „Exergy analysis of renewable energy-based systems for buildings: A critical view“ fasst die Entwicklungen des „LowEx“-Konzepts bis zum Jahr 2008 zusammen. Er beinhaltet eine Diskussion zu einigen bis dahin diskutierten Referenzumgebungen bzw. Berechnungsansätzen.

Im Rahmen des internationalen IEA ECBCS Annex49: „Low Exergy Systems for High-Performance Buildings and Communities“ wurde aufbauend auf dem Exergie-Konzept eine Bewertungsmethodik zur exergetischen Bewertung von Gebäuden und deren Anlagentechnik für den Heizfall entwickelt. Ebenso erfolgte eine Weiterentwicklung des vorgestellten Pre-Design Tools. Weiterhin wurden erste stationäre und dynamische Ansätze für die exergetische Bewertung der Kühlung und Kommunen vorgestellt. Einzelne Aspekte werden in dem Zeitraum von März 2007- März 2010 erschienenen Newslettern ausführlich beschrieben und diskutiert.

Einige der entstanden Tools für verschiedene exergetische Fragestellungen sind auf der Seite des IEA ECBCS Annex 49: www.annex49.com zum Download verfügbar.

Der Endbericht des IEA ECBCS Annex 49 fasst die in dem Projekt entwickelte Methodik und Beispiele zur Anwendung der Tools zusammen.

Bewertungsansätze für die dynamische und ökonomische Bewertung der Exergie sowie der exergetischen Bewertung von Kommunen sind unter anderem in den Tagungsbeiträgen zu unterschiedlicher Konferenzen zu finden:

- IEA Future Buildings Forum Think Tank, 20.-21. März 2007 in Helsinki, Finnland.
- BMWi LowEx Symposium, 29. Oktober 2009 in Kassel, Deutschland.
- Annex 49 Conference, 19.-21. Oktober 2010 in München, Deutschland

Eine Übersicht zum Stand der exergetischen Bewertung in Kommunen bis 2009 bietet der Artikel:

- Towards «Energy Efficient Cities» Optimising the energy, energy and resource efficiency of the demand and supply side on settlement and community level. (Sager, 2009)

4.3 Berechnungsmethoden für die Bewertung des Gebäudesektors

Im Rahmen von energieeffizienten Bauanleitungen finden Exergieberechnungen Berücksichtigung, wie z.B. in: „Energieeffizientes Bauen - Umsetzungsstrategien und Perspektiven“ (Hauser 2008) oder hinsichtlich Abwasserwärmerückgewinnung: „Exergy analysis of wastewater heat recovery for optimal LowEx heat pump performance“ (Meggers 2010).

“A key review on exergetic analysis and assessment of renewable energy resources for a sustainable future” von Arif Hepbasli stellt einen Vergleich verschiedener Systeme unter Berücksichtigung erneuerbarer Energiequellen vor und ist bereits 2006 veröffentlicht worden.

Im Rahmen der „Studie zu den Energieeffizienzpotentialen durch den Ersatz von elektrischen Strom im Raumwärmebereich“ (CO₂-Online) wird in Kapitel 4 auch „Energie vs. Exergie: wie sinnvoll ist die elektrische Wärmeheizung?“ diskutiert, wozu in kurzer Form allgemeine Aspekte der Exergieanalyse angesprochen werden.

4.4 Kommunkonzepte für Nachhaltigkeit

Bezüglich der kommunalen Beispiele sind Veröffentlichungen der EnEff Stadt/EnEff Wärme Projekte zu berücksichtigen, die die Einbeziehung der exergetischer Aspekte (Rahmen LowEx) teilweise in die jeweiligen Nachhaltigkeitsszenarien integriert haben.

- Aiblingen (LowEx-Ansatz bei Sanierungen berücksichtigt).
- Haidhausen (Lilienstraße München Nord: LowEx-Ansatz umgesetzt, z.B. bei der Trinkwassererwärmung).
- Kassel Oberzwehren (Bewertung auf Basis der Exergie im Vergleich zu Energieberechnungen auf Basis von CO₂ Emissionsfaktoren).
- Karlsruhe Rintheim (Sanierung zweier Wohnblöcke, Anwendung der Exergieanalyse auf Quartiersebene).
- Freiburg Weingarten (inkl. LowEx Demonstrations-Gebäude).

Als Praxisbeispiel zu benennen ist weiterhin das Projekt REMINING-LowEx: „Redevelopment of European Mining Areas into Sustainable Communities by Integrating Supply and Demand Side based on Low Exergy Principles“¹ im Rahmen dessen in vier europäischen Kommunen Wege gesucht werden, neue Energie aus alten Minen zu gewinnen.

In der Münchener Ausgabe „Sustainable Urban Infrastructure – Wege in eine CO₂-freie Zukunft“² (Schüwer 2009) wird generell auf das Potenzial von Niedertemperatur-Lösungen hingewiesen. Im Klimaschutzkonzept der Stadt Münster (IFEU/GERTEC 2009) wird bei der Allokation von Strom- und Fernwärmeemissionen die exergetische Allokationsmethode eingesetzt und auch erläutert³. Dabei werden deren Vorteile gegenüber der Gutschriftenmethode aufgezeigt.

Das 2010 auf dem Kolloquium „Aktuelle Probleme der Energietechnik“, der ETH Zürich vorgestellte Konzept: „Die Stadt Zürich auf dem Weg zur 2000-Watt-Gesellschaft: Herausforderun-

¹ <http://concerto.eu/concerto/concerto-sites-a-projects/sites-con-sites/sites-con-sites-search-by-name/sites-remining-lowex-heerlen.html>

² <https://www.mobility.siemens.com/mobility/global/SiteCollectionDocuments/de/sustainable-muenchen-2009-de.pdf> (S. 41)

³ Das IFEU-Heidelberg berechnet seit 1990 im Rahmen der kommunalen Energie- und Klimaschutzkonzepte die Zuordnung von Koppelprodukten aus Strom- Wärmesystemen exergetisch.

gen für die ewz⁴ (Wickart 2013) erläutert zukünftige Stromerzeugungstechnologien aber weniger explizit Exergiekonzepte.

Im Exergiekonzept Innerschwyz wird Exergie-Effizienz im Rahmen des „Masterplans“ des optimierten Energieeinsatzes berücksichtigt. („Exergiekonzept Innerschwyz“, Elektrizitätswerk des Bezirks Schwyz AG, Ulrich 2007).

Im Exergiekonzept der Schweizer Stadtgemeinde Brig-Glis sind Exergie-Einsparmöglichkeiten am Beispiel eines unsanierten Einfamilienhauses dargestellt (STADTINFO 4. Jahrgang, Nr. 17, August 2008).

Veröffentlichungen der Kanadischen ICES Projekte (Integrated Community Energy Solutions) beinhalten LowEx-Konzepte im Bereich „Housing and Building“, jedoch sind keine weiteren Berechnungen angeführt („Integrated Community Energy Solutions, A Roadmap for Action“ Council of Energy Ministers, Canada, 2009).

4.5 Verordnungen/Rechtsgutachten

Von Belang sind:

- VDI- Richtlinie 4608 Blatt 1 Energiesysteme Kraft-Wärme Kopplung Begriffe, Definitionen, Beispiele,
- VDI- Richtlinie 4608 Blatt 2 Energiesysteme Kraft-Wärme Kopplung Begriffe, Allokation und Bewertung.
- DIN V 18599 – Energetische Bewertung von Gebäuden
- DIN V 4701-10 : Energetische Bewertung heiz- und raumlufttechnischer Anlagen - Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung
- AGFW- Arbeitsblatt FW 308 Zertifizierung von KWK-Anlagen - Ermittlung des KWK –Stromes.
- AGFW Rechtsgutachten 315 Zulässigkeit der Preiskontrolle von Fernwärmeversorgungsverträgen nach § 315 BGB

4.6 Weitergehende Veröffentlichungen

Aufbauend auf der anfangs recherchierten Grundlagenliteratur sind zu den Aufsätzen, die die Ausgangspunkte der Thermodynamik sowie die einzelnen Rechenmethoden behandeln, zunehmend Veröffentlichungen von Kommunen und Gemeinden bezüglich ihrer Klimaschutzmaßnahmen berücksichtigt worden. Denn neben der Literaturrecherche zu Publikationen über Berechnungsverfahren und Darstellungsmöglichkeiten verschob sich der Fokus zunehmend auf die Recherche nach empirischen Daten. Anhand der für das Projekt ausgewählten Modelregionen werden unterschiedliche Strom- und Wärmenetze untersucht. Da sowohl alle Städte, als auch alle örtlichen Energieversorger und zudem viele einzelne Projekte, im Rahmen derer entsprechende Anlagen realisiert worden sind, über eigene Internetauftritte verfügen, werden die Online-Quellen für die Datenrecherche wichtiger. Vermehrt wurden einzelne Projektbeschreibungen gesichtet und hinsichtlich der exergetischen Optimierungspotentiale studiert. Um die Modellregionen praxisnah beschreiben zu können, wurden Angaben von den Internetseiten der einzelnen Versorgungsunternehmen bzw. Städte herangezogen. Auch Pressemeldungen

⁴ <http://www.energieforschung-zuerich.ch/index.php?id=2>

und Bekanntmachungen bezüglich Neu- oder Umbau von Kraftwerken und Netzen wurden bei der Recherche berücksichtigt.

Die im Rahmen des „IEA ECBCS Annex 49“ Projektes vorgestellten Berechnungsmethoden wurden mit Blick auf die exergetischen Optimierungspotentiale auf Anwendbarkeit im Projekt (Übertragbarkeit von Gebäudeebene auf Kommunen) geprüft, ebenfalls konnten einzelne Beschreibungen aus BINE-Veröffentlichungen verglichen werden.

Bei der Gegenüberstellung unterschiedlicher Allokationsmethoden (VDI 4608-2) wurde in den entsprechenden Publikationen sowie der Masterarbeit von Daniel Kühler (Kühler D., 2008) recherchiert. In Hinblick auf die Darstellungsmöglichkeiten wurden zusätzlich Grundlagen zu SANKEY-Diagrammen und dem Exergieausweis (ehemals ExergyFingerprint) recherchiert.

Vertiefend für die methodische Herangehensweise sind vor allem die Dissertation von Andrej Jentsch („A novel exergy-based concept of thermodynamic quality and its application to energy system evaluation and process analysis“) (Jentsch 2010) und die teilweise darauf aufbauende Dissertation von Stefan Bargel: Entwicklung eines exergetischen Analysemodells zum umfassenden Technologievergleich von Wärmeversorgungssystemen unter Berücksichtigung des Einflusses einer veränderlichen Außentemperatur, (Bargel 2010) diskutiert worden.

Die erste Arbeit (Jentsch 2010) leitet her wie Exergie als ein „Produkt von Qualität (Wandelbarkeit) und Energie“ dargestellt werden kann und legt eine Grundlage für eine widerspruchsfreie und einfache Bilanzierung von Gebäudeenergiesystemen. Sie bildet die Basis für die anschauliche Bewertung von Energiesystemen mit dem in Kapitel 6 vorgestellten Exergieausweis und die im Wesentlichen davon übernommenen Grundlagen für die kommunale Exergieanalyse (siehe Kapitel 5). Die zweite erwähnte Arbeit (Bargel 2010) fokussiert sich mehr auf die Anwendung der Exergieanalyse für die Bewertung der Effizienz von Wärmeversorgungstechnologien. Dabei wird der Einfluss einer statischen Referenzumgebung auf das Bewertungsergebnis detailliert diskutiert.

Eine Studie, die ebenfalls Eingang in das Projekt gefunden hat, ist der Forschungsbericht des IER „Räumlich hoch aufgelöste Modellierung leitungsgebundener Energieversorgungssysteme zur Deckung des Niedertemperaturwärmebedarfs“ (Blesel 2002).

5 Grundlagen der Exergieanalyse und Bewertung von Referenzsystemen

5.1 Grundlagen der Exergieanalyse

Die Energie in Gebäuden wird heutzutage vorrangig zum Heizen und Kühlen von Räumen eingesetzt, um die Innenraumtemperatur bei ca. 20°C zu halten. Für die Versorgung durch Heiz- und Kühlsysteme wird angestrebt, Medientemperaturen zu nutzen, die sich nah der gewünschten Innenraumtemperatur bewegen. Dadurch wird es möglich Wärmeversorgungssysteme einzusetzen, die besser an den exergetischen Bedarf angepasst sind.

Allgemein kann die Exergie als Produkt aus der Energie und der Energiequantität eines Energieflusses definiert werden. Das Ziel der exergetischen Optimierung besteht darin den Exergieverbrauch für eine Versorgungsaufgabe zu minimieren. Das heißt einerseits müssen Energieverluste reduziert werden. Zusätzlich dazu erlaubt eine bessere Anpassung der Energiequalität des Angebots an die Energiequalität der Nachfrage die Arbeitsfähigkeit der angebotenen Energie besser auszuschöpfen. Energieeinsparung und Energieeffizienz-Maßnahmen führen zu einer Reduzierung des allgemeinen Energiebedarfs. Die zusätzliche Nutzung von Niedertemperaturquellen erlaubt es zusätzlich die Exergie-Effizienz zu erhöhen. Mögliche Niedertemperaturquellen sind: Solarthermie, Erdwärme und Abwärme aus Industrieprozessen oder Kraftwerken. Selbst bei heutigen modernen und energetisch hocheffizienten Heizsystemen, wie dem Gas-Brennwertkessel, ist die Exergie-Effizienz sehr gering (<<10%). Das Potenzial des Brennstoffs Erdgas, die komplette Energie in Arbeit oder elektrischen Strom umzuwandeln liegt bei 100%. Dementsprechend ist die Energiequalität von Erdgas⁵ bei 100% (Jentsch 2010). Auf der anderen Seite ist die Energiequalität der benötigten Raumwärme niedrig (ca. 4%). Die hohe Energiequalität des Gases geht somit fast vollständig beim Umwandlungsprozess im Kessel verloren ohne dass dies durch Energieverluste ersichtlich wird.

Für die Anlagen innerhalb eines Gebäudes sind unterschiedliche Temperaturniveaus erforderlich (s. Abbildung 1). Die Bereitstellung von Trinkwarmwasser erfordert Temperaturen von etwa 55°C. Die dafür erforderliche Energiequalität ist etwas höher als die, die zur Beheizung eines Raumes auf 20°C benötigt wird. Für Energieanwendungen wie Kochen oder das Heizen einer Sauna ist eine noch höhere Energiequalität erforderlich, da für diese Anwendungen Temperaturen größer 55°C bereitzustellen sind. Die höchste Energiequalität von 100% ist für den Betrieb von elektrischen Haushaltsgeräten oder die Beleuchtung mit Strom aufzubringen.

Die heutige Energieversorgungsstruktur ist an die Qualität des Energiebedarfs der Gebäude nur unzureichend angepasst. Betrachtet man die gängige Versorgung von Gebäuden, so ist festzustellen, dass zumeist Energieträger mit hoher Energiequalität (z.B. Strom, Gas und Öl) zur Temperierung von Gebäuden eingesetzt werden. Eine unnötige Erhöhung der CO₂-Emissionen und eine vermeidbare Verknappung fossiler Energieträger sind dabei die Folge.

Abbildung 1 zeigt ein Beispiel für eine typische Versorgung eines Gebäudes mit fossilen Energieträgern. Links ist die Energieversorgung und rechts ist der Energiebedarf dargestellt. Die Energiequalität repräsentiert den Anteil Strom der mindestens pro bereitgestellte Energieein-

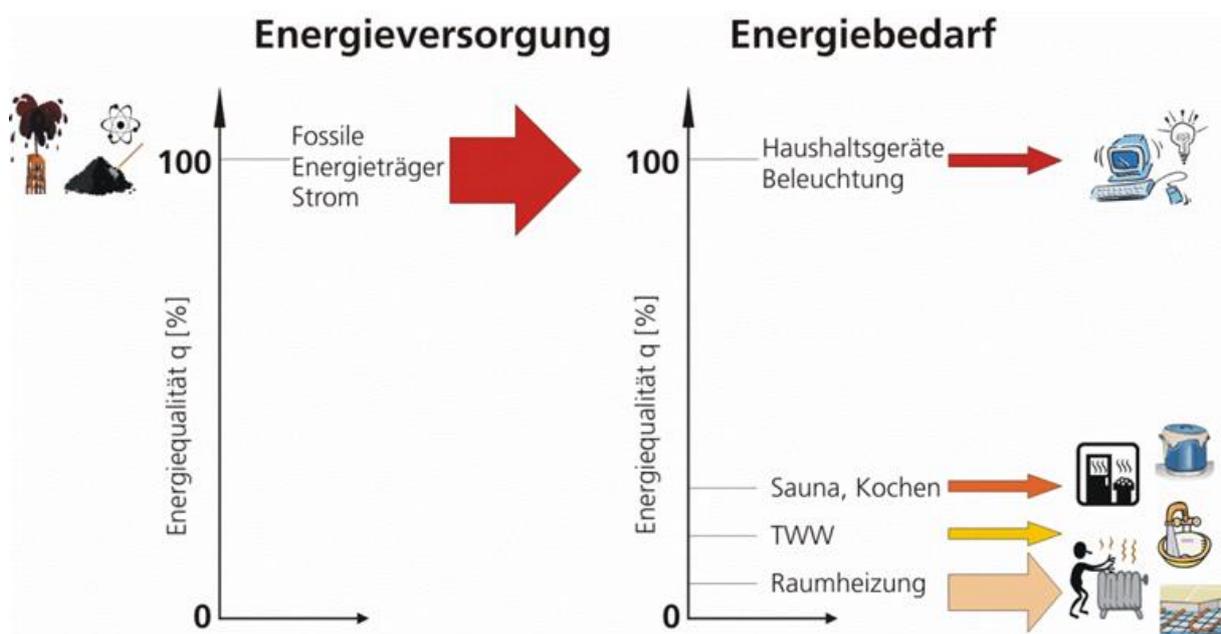
⁵ Auch die Energiequalität aller anderen chemischen Brennstoffe liegt bei 100% (Jentsch 2010).

heit eingesetzt werden muss⁶. Dabei wird ersichtlich, dass die Energiequalität für die Versorgung den tatsächlich erforderlichen Bedarf wesentlich übersteigt.

Um das Gesamtsystem zu optimieren, sollte in Zukunft auf eine bessere Anpassung der Energiequalität der Versorgung an die Energiequalität des tatsächlichen Bedarfs geachtet werden (s. Abbildung 2). Dies kann durch die Nutzung von Energie erfolgen, die bereits ursprünglich mit einem möglichst angemessenen Temperaturniveau vorliegt. Für die Anwendung solcher Systeme existiert eine große Vielzahl an Übergabesystemen auf dem Markt, wie beispielsweise wassergeführte Fußboden-Heiz-Systeme. Diese bieten die Möglichkeit, Gebäude mit geringen Vor- und Rücklauftemperaturen zu beheizen. Vorteilhaft dabei ist, wenn auch der Bedarf des Gebäudes mit Hilfe von Sanierungsmaßnahmen reduziert und damit eine Versorgung mit Niedertemperaturwärme ermöglicht wird.

Die Nutzung von Niedrigtemperatur-Heizungen und Hochtemperatur-Kühlsystemen in Kombination mit entsprechend geeigneten Versorgungssystemen, sogenannte LowEx-Systeme, kann maßgeblich zur Verringerung des fossilen und erneuerbaren Primärenergieverbrauchs von Gebäuden beitragen.

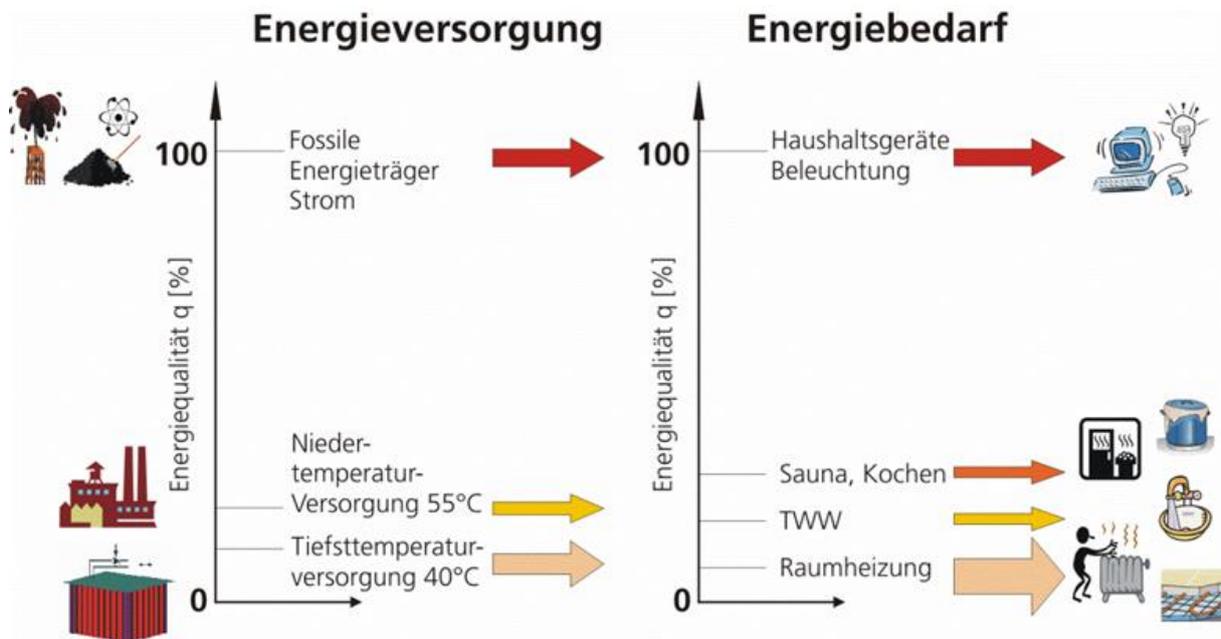
Abbildung 1: Konventionelle Energieversorgung durch hochwertige Energieträger für ein typisches Gebäude mit mehreren Bedarfsarten mit unterschiedlichen Qualitätsstufen



Quelle: durch das IBP angepasste Grafik des VTT (Schmidt, Ala-Juusela 2004)

⁶ Energiequalität kann als maximaler Stromanteil verstanden werden, welcher aus einem betrachteten Energiefluss erzeugt werden kann. Dieser Prozess ist umkehrbar. Das heißt gleichzeitig ist die Energiequalität ein Maß für den minimalen Stromanteil der aufgewendet werden muss, um einen betrachteten Energiefluss zu erzeugen.

Abbildung 2: Angepasste Energieversorgung mit Quellen unterschiedlicher Qualitätsstufen für ein Gebäude mit Nutzungen in unterschiedlichen Qualitätsstufen



Quelle: durch das IBP angepasste Grafik des VTT (Schmidt, Ala-Juusela 2004)

5.1.1 Exergie im Vergleich zu Energie

Wie bereits dargestellt kann die Exergie vereinfacht auch als Produkt aus Energie und ihrer Qualität verstanden werden (Jentsch 2010). Die Exergie ermöglicht damit umfassendere Analysen und Bewertungen im Vergleich zu ausschließlich energiebasierten Betrachtungen.

Die Energieeffizienz, auf deren Grundlage verschiedene Technologien meist bewertet werden, ist in der Exergie-Effizienz enthalten. D. h. Effekte, welche die Energieeffizienz verringern, vermindern im selben Maße auch die Exergie-Effizienz. Aufgrund des größeren Umfangs der exergetischen Bewertung sind die Werte der Effizienz jedoch meist unterschiedlich. So ergibt sich beispielsweise für einen Gaskessel, der zur Raumwärmeerzeugung mit einer Energieeffizienz von 80% dient in Bezug auf die Qualität der Energienutzung nur eine Exergie-Effizienz von ca. 3% siehe Kapitel 5.7. An diesem Beispiel wird deutlich, dass mit Hilfe der exergetischen Bewertung Optimierungspotenziale bedeutend umfassender identifiziert werden können als mit Hilfe der Energieanalyse.

Obwohl das Exergiekonzept gegenüber dem Energiekonzept wesentliche Vorteile aufweist, kann das eine Konzept das andere nicht ersetzen. So ist es durch die Berücksichtigung der Quantität (Energienmenge) und der Qualität (Wandelbarkeit oder Energiequalität) in einer physikalischen Größe nicht möglich, allein aufgrund eines Exergiewertes auf die Größe eines Transfers zu schließen. So kann beispielsweise ein kleiner Wärmestrom hoher Temperatur mit dem gleichen Exergiestrom verbunden sein wie ein großer Wärmestrom niedriger Temperatur. Da die Größe der Transfers die Auslegung und Dimensionierung technischer Komponenten mitbestimmt, können diese somit nicht ausschließlich auf Basis der Exergie erfolgen.

Die Exergie ist somit als Größe anzusehen, die sehr gut für die Bewertung und Analyse von technischen Systemen, für die Auslegung jedoch nur ergänzend geeignet ist.

5.1.2 Primärenergie im Vergleich zur Primärenergie

Bislang steht der Primärenergieansatz, z.B. in der EnEV (EnEV 2009), neben der endenergetischen Bewertung von Energiesystemen. Der Primärenergieansatz ergänzt diese Betrachtung in wesentlichen Punkten, was im Folgenden nochmals deutlich herausgestellt wird.

Die Primärenergie im Allgemeinen bezeichnet die ursprünglich der Umwelt entnommenen Energie-Rohstoffe und unterteilt sich in fossile und erneuerbare Primärenergie. Für Brennstoffe deckt sich die Brennwert-bezogene Primärenergie (fossil und erneuerbar) grob mit der Primärenergie (Bejan 1996). Für andere Wärmequellen wie tiefe Geothermie, Solarwärme, Abwärme etc. unterscheidet sich die Primärenergie (fossil und erneuerbar) jedoch signifikant von der Primärenergie, da letztere die physikalische Energiequalität berücksichtigt, während die Energiequalität in der Primärenergiebetrachtung nicht direkt mit betrachtet wird. So ist die Primärenergie (fossil und erneuerbar) in Summe all dieser Energieformen in etwa 1, während die Primärenergie für diese Energieformen in der Größenordnung von 0,3 liegt.

In der Primärenergiebetrachtung der EnEV (EnEV 2009) kommen Primärenergiefaktoren kleiner 1 vor. Diese bezeichnen den fossilen Anteil der Primärenergie. Werden ausschließlich fossile Primärenergiefaktoren verwendet, bedeutet dies, dass auf eine effiziente Nutzung erneuerbarer Energien nicht geachtet werden muss. Insbesondere vor dem Hintergrund eines begrenzten Biomassepotenzials kann diese Festlegung zu Fehlsteuerungen, z.B. zur übermäßigen Förderung ineffizienter Technologien, z.B. wie dem Holzpellet-Heizkessel führen.

Auch für die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) stellt sich der Primärenergieansatz als problematisch heraus. Entweder werden Primärenergiefaktoren „fossil“ verwendet die kleiner 1 sind und somit dem Energieerhaltungssatz widersprechen, was eine normale Primärenergiebilanz nach physikalischen Regeln unmöglich macht, oder es werden die Primärenergiefaktoren „fossil und erneuerbar“ verwendet, was wiederum nicht erlaubt den Vorteil der KWK abzubilden.

Hinzu kommt das aktuelle Problem einer Allokation mit der Stromgutschriften-Methode (siehe auch Kapitel 7), welche nicht langfristig gültige Ergebnisse erzeugen kann. Die sinnvollste Alternative zu dieser Methode ist die Exergie-Methode (Carnot-Methode), welche die Allokation auf Basis der Exergie vornimmt (siehe Kapitel 5.7). Wird bereits eine exergetische Allokation bei der KWK eingesetzt, bietet es sich an für die Analyse von Energiesystemen mittel- und langfristig von der Energieanalyse auf die physikalisch vollständigere Exergieanalyse umzustellen.

Exergie basiert auf dem ersten und zweiten Hauptsatz der Thermodynamik und ist damit das vollständigere Konzept im Vergleich zu Energie, welches letztlich nur den ersten Hauptsatz berücksichtigt. Energie kann nicht verbraucht, sondern nur gewandelt werden. Exergie kann verbraucht werden und entspricht daher eher unserem allgemeinen Energieverständnis als die physikalische Größe Energie.

Mit dem Primärenergieansatz kann versucht werden, physikalische Realitäten nachzubilden. Dennoch bleibt der Ansatz stets auf neue politische Festlegungen angewiesen. Damit lässt sich auf Basis der Primärenergie keine abschließende Bewertung aller Energiesysteme durchführen. Neue Sonderfälle werden stets neue politische Festlegungen erfordern. Da letztere verhandelbar sind, besteht dabei die Gefahr von politischer Beeinflussung von Analyseergebnissen und somit von Entscheidungsgrundlagen.

Die Primärenergie, welche auf der physikalisch-technischen Realität des ersten und zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik aufbaut, kann auf solche Festlegungen verzichten. Damit ermöglicht die Primärenergie die Bewertung aller Systeme ohne die Notwendigkeit Technologie-spezifischer Festlegungen. Sie erlaubt es eine physikalisch und praktisch widerspruchsfreie Bewertung aller Energiesysteme vorzunehmen, welche die Grundlage für realitätsnahe politische Festlegungen bieten kann.

Neben diesen Vorteilen soll noch auf einen für die Zukunft wichtigen Aspekt verwiesen werden. Zunehmend wird deutlich, dass für die abschließende Bewertung von Technologien eine Lebenszyklusbetrachtung notwendig ist (VDI 2014). Während die Primärenergie es erlaubt ausschließlich Energie-Rohstoffe zu berücksichtigen, hat die Primärenergie das Potenzial auch stoffliche Rohstoffe (Metalle, Nicht-Metalle) physikalisch fundiert mit zu berücksichtigen. Damit wird es langfristig in Hinblick auf den kommunalen Sektor möglich, alle Rohstoffe in eine übergreifende Kennzahl (Primärenergieverbrauch) zu integrieren und nicht nur Energieeffizienz sondern eine umfassende Ressourceneffizienz der Wirtschaft zu erreichen.

Primärenergie⁷ kann als universelles Maß für stoffliche Ressourcen angesehen werden und geht damit wesentlich über den Primärenergiebegriff hinaus, der nur einen Teilaspekt der Ressourcen darstellt.

5.1.3 Exergieanalyse und Treibhausgasemissionen

Die Differenzierung in erneuerbare und fossile Energien spielt in der Bewertung des Einflusses von Versorgungssystemen auf den Treibhausgaseneffekt eine große Rolle. Allerdings lässt sich aus der Emissionsbetrachtung – insbesondere bei Systemen, die nur geringe zusätzliche Treibhausgasemissionen verursachen – häufig nicht auf die technische Güte bzw. Effizienz der untersuchten Systeme schließen.

Da erneuerbare speicherbare Primärenergieträger, wie z.B. Biomasse, aufgrund ihres Flächenbedarfs nur begrenzt zur Verfügung stehen, muss jedoch auch bei deren Nutzung darauf geachtet werden, dass diese Ressourcen möglichst sparsam eingesetzt werden. Hier kann die zusätzliche exergiebasierte Analyse einen wesentlichen Beitrag leisten. Da es für die exergetische Bewertung keine Rolle spielt, ob Brennstoffe erneuerbar oder fossil sind, sondern nur deren physikalische Qualität berücksichtigt wird, können mit Hilfe der exergetischen Analyse auch in Versorgungssystemen mit großem Anteil an erneuerbarem Energieeinsatz die technischen Verbesserungspotenziale genau bestimmt werden.

Die exergetische Betrachtung erlaubt es somit, der Bewertung der Umweltbelastung mit Hilfe der Treibhausgasemissionen eine umfassende Bewertung der Güte der Ressourcennutzung hinzuzufügen. Gemeinsam mit entsprechenden Wirtschaftlichkeitsanalysen werden so transparente Entscheidungsgrundlagen geschaffen, die eine solide Grundlage für langfristige Entscheidungen bilden können.

5.1.4 Exergiebasierte Analysen und Exergieausnutzung

Ein Schlagwort, welches im Kontext von Klima- und Umweltschutz häufig verwendet wird, ist „Effizienz“. Allerdings greift der Begriff der Energieeffizienz zu kurz, da dieser interne⁸ Verluste

⁷ Dabei ist auf widerspruchsfreie Bilanzregeln zu achten, wie sie z.B. in Kapitel 5 dargestellt werden.

⁸ Der Begriff interne Verluste wurde für den Exergieausweis entwickelt. Er bezeichnet innere Exergieverluste, welche nicht durch anschließende Energieverluste erkannt werden können.

nicht abbildet. Mit Hilfe der Exergie lässt sich eine Berechnungsvorschrift für die Effizienz entwickeln, welche umfassend, universal anwendbar und gut wissenschaftlich begründet ist. Zur Abgrenzung von der Energieeffizienz soll dieser universale und übergreifende Effizienzbegriff: „Exergieausnutzung“ genannt werden.

Die Exergieausnutzung beinhaltet stets die Energieeffizienz, geht jedoch wesentlich darüber hinaus. Sie macht es möglich verschiedenste Systeme unter Berücksichtigung der Nutzbarkeit der verschiedenen eingesetzten Energieträger und Stoffe zu vergleichen und erlaubt somit besonders belastbare Aussagen über die Eignung verschiedener Energiesysteme zur Erfüllung eines Versorgungsziels.

Ist das Versorgungsziel für alle betrachteten Systeme das gleiche, kann statt der Exergieausnutzung der Primärenergie-Einsatz, also die Summe der für die Versorgungsaufgabe eingesetzten Exergieströme, verglichen werden. Dies hat den Vorteil, dass der absolute Exergieaufwand für die Versorgung offensichtlich wird und auch der Einfluss der verbrauchenden Systeme, wie z.B. der Gebäudedämmung, berücksichtigt werden kann.

5.1.5 Exergiebasierte Analysen und Wirtschaftlichkeit

Als physikalische Bewertungsmethode kann die Exergieanalyse eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nicht ersetzen. Sie erlaubt es jedoch die technischen Charakteristika von Energiesystemen umfassend und universal zu bewerten, so dass besonders fundierte, „gerechte“ Technologievergleiche im Hinblick auf den stofflichen und energetischen Ressourcenverbrauch (wie der Primärenergieverbrauch auch bezeichnet werden kann) und Effizienz verschiedener Systeme möglich werden. Ressourcenverbrauch und Effizienz haben wiederum einen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit, z.B. resultiert ein verringerter Ressourceneinsatz üblicherweise in einer geringeren Anfälligkeit für Preisschwankungen an den Rohstoffmärkten, da weniger Verluste „mitbezahlt“ werden müssen. Zusätzlich sinken in vielen Fällen aus dem gleichen Grund die Betriebskosten, welche jedoch den Abschreibungen für die evtl. zusätzlich notwendigen Investitionen gegenüberzustellen sind und so nicht unbedingt zu einem geringeren Preis der Versorgung führen.

Durch die universelle Bestimmbarkeit des Ressourceneinsatzes für nahezu alle verfügbaren Technologien und Energiesysteme auf Basis der Exergie lassen sich Entscheidungen nicht mehr nur ausgehend von großen Unsicherheiten behafteten Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen, sondern auch basierend auf präzise bestimmbareren Kosten-Nutzen-Verhältnissen treffen. So kann die exergiebasierte Analyse helfen Entscheidungsgrundlagen zukunftsfähiger und belastbarer zu machen.

Ein weiterer Pluspunkt der Exergie-Analyse im Kontext mit der Wirtschaftlichkeit ist, dass mit der Verfügbarkeit einer universellen und wissenschaftlich belastbaren Bewertungsmethodik die Energiesysteme eindeutig identifiziert werden können, welche es erlauben, ökologische Ziele mit den geringstmöglichen Kosten zu erreichen. So kann beispielsweise der Ressourcenverbrauch eines Passivhauses mit Holzpelletkessel auch durch den Einsatz effizienter Versorgungssysteme in wesentlich schwächer gedämmten Gebäuden erreicht werden. Auf Basis der exergiebasierten Analysen kann somit transparent die Vielzahl der Handlungsoptionen zur Erreichung eines Effizienzziels miteinander verglichen werden. Dies wiederum erweitert den Spielraum für Entscheider im Hinblick auf die Suche nach der wirtschaftlichsten Lösung für das Erreichen eines ökologischen Ziels.

5.2 Bewertungsgrenzen

Ebenso wichtig wie die Festlegung geeigneter Bewertungsgrößen ist eine schlüssige Definition der Bewertungsgrenzen⁹, d.h. der Systemgrenzen, an denen Ein- und Ausgangsströme bewertet werden. Ohne den Einsatz eines in sich schlüssigen Verfahrens zur Bilanzraumdefinition kann es durch inkonsistente Bilanzgrenzenwahl für ähnliche Energiesysteme zu signifikant unterschiedlichen Bewertungsergebnissen kommen. Für die vergleichende Bewertung von Energiesystemen mit verschiedenen Eingangsströmen werden für das Projekt folgende Bilanzierungsregeln verwendet (siehe auch Jentsch 2010):

- **Als Eingangsströme werden Ströme direkt speicherbarer Primärenergie oder – im Fall von nicht-direkt-speicherbaren Energieformen (Sonne, Wind) – Ströme speicherbarer Sekundärenergie angesehen.** Das heißt, dass der Eingangsstrom für die Bewertung solarer Energiesysteme in einem technologieübergreifenden Vergleich nicht die solare Strahlung ist, sondern die entsprechende Energieform nach der Wandlung in eine speicherbare Energieform (also Wärme oder Strom). Ebenso muss bei der Berücksichtigung von elektrischem Strom aus dem Netz die Umwandlungseffizienz von speicherbaren Primärenergieträgern (vor allem Brennstoffe) in Strom mit berücksichtigt werden. Nicht direkt-speicherbare Energie kann nur bei Verfügbarkeit (Sonne) oder nach Umwandlung in direkt speicherbare Energie genutzt werden. Direkt speicherbare Energie kann deshalb auch als bedarfsgerecht einsetzbare Energie bezeichnet werden.
- **Für die Berechnung von Effizienzen, werden die theoretisch benötigten Energiestromparameter für die zu erbringende Dienstleistung auf Nutzenergieebene zugrunde gelegt.** Das heißt z.B.: nicht die Heizungsvorlauftemperatur, sondern die gewünschte Raumtemperatur bildet zusammen mit der Definition der Umwelttemperatur die Grundlage der vergleichenden exergetischen Bewertung. Würde beispielsweise die Effizienz eines Gaskessels mit Hilfe der Temperaturniveaus im Heizkörper statt der Raumtemperatur bestimmt, würde sich zeigen, dass der Gaskessel in Kombination mit einem Radiator exergetisch effizienter ist, als der gleiche Kessel mit Fußbodenheizung. Da jedoch in beiden Fällen in etwa gleich viel Brennstoff verbraucht werden würde, entspräche ein solches Ergebnis nicht den tatsächlichen Gegebenheiten.
- **Alle betrachteten Technologien werden vor dem Hintergrund des gleichen Versorgungsziels verglichen.** Für den betrachteten Fall bedeutet diese Festlegung, dass alle verglichenen Systeme die Bereitstellung der gleichen Dienstleistung, d. h. die Versorgung mit Raumwärme bei 20 °C, ausreichend Trinkwarmwasser bei mindestens 43 °C und die Einhaltung der vorgeschriebenen Luftwechselrate ermöglichen. Dadurch wird sichergestellt, dass nicht „Äpfel mit Birnen verglichen werden“.. Bei Systemen, welche gleichzeitig Wärme und Strom erzeugen, wird mit Hilfe einer exergiebasierten Brennstoffaufteilung auf Wärme und Strom (Carnot-Methode siehe 7.4) festgelegt, wie viel von dem Eingangsstrom allein der Wärme zuzuordnen ist und wie viel dem Strom. Beide Funktionen einer Anlage zur Kraft-Wärme-Kopplung können so in Vergleichen berücksichtigt werden, als ob jeweils nur ein Produkt (Strom oder Wärme) erzeugt werden würde.

Mit Hilfe dieser einfachen Bewertungsregeln kann sichergestellt werden, dass die Ergebnisse des Vergleiches aussagekräftig sind und die Tatsachen quantitativ korrekt abbilden können.

⁹ Technische Bewertungsgrenzen werden häufig auch als Bilanzgrenzen bezeichnet.

Sie bilden dabei die realen Verhältnisse so gut ab, wie es auf Basis der vorhandenen Daten möglich ist.

5.2.1 Festlegung der Primärenergie und Primärenergie

Entsprechend dieser Bewertungsregeln sind u.a. folgende Energien als Eingangsströme bzw. Primärenergie für einen übergreifenden Technologievergleich zu betrachten:

- Fossile Brennstoffe in der Lagerstätte
- Erneuerbare Brennstoffe auf dem Feld bzw. im Wald
- Wärme aus Geothermie mit der entsprechenden Mitteltemperatur der Wärmeaufnahme durch das Wärmeversorgungssystem
- Industrielle Abwärme mit der entsprechenden Mitteltemperatur der Wärmeaufnahme durch das Wärmeversorgungssystem
- Wärme aus Sonnenkollektoren mit der entsprechenden Mitteltemperatur der Wärmeaufnahme durch das Wärmeversorgungssystem
- Umweltwärme bei Referenztemperatur
- Strom aus Solarzellen
- Strom aus Windkraftanlagen
- Strom aus Laufwasserkraftwerken
- Potenzielle Energie aus Stauwasserkraftwerken

Für den Fall der Erzeugung mehrerer Produkte wird die Primärenergie entsprechend der Carnot-Methode (siehe Kapitel 7.4) aufgeteilt.

Die Primärenergie ergibt sich als Produkt der Primärenergie¹⁰ mit der entsprechenden Energiequalität.

5.2.2 Festlegung des Nutzens von Energiesystemen

Energie wird in Städten vorrangig zur Gewährleistung eines gewissen Lebensstandards verbraucht. D.h. es handelt sich weniger um ein Produkt als um eine Dienstleistung, welche die verglichenen Energiesysteme erbringen. Als Nutzen für die Gebäudeversorgung von Städten werden folgende Aspekte betrachtet:

- Die Aufrechterhaltung einer Raumtemperatur von 20°C in Gebäuden
- Die Versorgung mit Trinkwarmwasser bei 43 °C
- Die Versorgung mit elektrischem Wechselstrom auf Niederspannungsebene¹¹

Für die Bereiche Industrie sowie Gewerbe, Handel, Dienstleistungen wird die Durchführung der unternehmerischen Aufgabe (Produktion oder Handel) als Nutzen betrachtet.

Für die vorliegende Analyse werden die für diese Dienstleistungen erforderlichen Mindest-Exergiebedarfe als Nutzen angesehen.

¹⁰ Dies ist eine Vereinfachung, welche nur zu geringen Fehlern führt. Für die stationäre Analyse in Kommunen ist sie ausreichend genau. Die exakte Definition der Energiequalität und der dazu passenden Energie findet sich in (Jentsch 2010).

¹¹ Dies ist eine zulässige Vereinfachung aller mit Strom bereitgestellten Dienstleistungen, wie Wärme zum Kochen und Backen, Lebensmittelkühlung, Helligkeit, Wäschereinigung etc.

5.2.3 Referenzumgebung

Die mit einem Energiefluss verbundene Arbeitsfähigkeit, d.h. seine Exergie, ist gleichermaßen abhängig von den Parametern¹² des Energieflusses als auch von denen der Umwelt. Aus diesem Grund ist die Definition der Referenzumgebung für Exergieberechnungen von genauso hoher Bedeutung wie die Eigenschaften der betrachteten Energie- und Stoffströme.

Die Referenzumgebung für die Exergieberechnung ist allgemein als ein ruhendes System definiert, das sich im thermodynamischen Gleichgewicht befindet und dessen Parameter durch Wechselwirkungen mit dem betrachteten System nicht verändert werden können. Das heißt einerseits, dass die Referenzumgebung in sich keine Temperaturdifferenzen (thermisches Gleichgewicht) oder Druckdifferenzen (mechanisches Gleichgewicht) aufweist. Ebenfalls herrscht in ihr ein stoffliches und chemisches Gleichgewicht. Zusätzlich ist sie im Verhältnis zum betrachteten System so groß, dass sie Energie und Stoffe mit dem betrachteten System austauschen kann ohne sich in Ihren Parametern zu verändern.

Die Übertragung dieser Definition auf eine reale Referenzumgebung für Energieprozesse in Gebäuden impliziert, dass alle Energieprozesse im Gebäudebereich in Folge von Temperatur- und Druckunterschieden zur Außenluft stattfinden. Die unmittelbare Grenze zwischen dem Gebäudeenergiesystem inklusive aller Vorketten und der äußeren Umgebung kann somit als wichtigste Bewertungsgrenze angesehen werden.

5.2.4 Die Referenzumgebung für stationäre (d.h. zeitunabhängige) Analysen

Die Beschreibung der stationären Referenzumgebung erfolgte in der Vergangenheit (Alpuche et al. 2005), (Baehr et al. 1963), (Wepfer et al. 1979) basierend auf vordefinierten Standardbedingungen, die festgelegte oder zeitunabhängige Werte für die klimatischen Gegebenheiten der Umgebung darstellen (Sakulpipatsin 2008). Diese Standardbedingungen entsprechen einer Normtemperatur von 273,15 K und einem Normdruck von 1,013 bar. Für diese Bedingungen sind alle nicht mechanischen oder thermischen Exergien¹³ definiert. Besonders relevant für die Bewertung von kommunalen Energiesystemen ist dabei neben der thermischen Exergie, die chemische Exergie von Brennstoffen.

Um mit der stationären Exergieanalyse Ergebnisse zu erzeugen, die möglichst nahe an den realen Gegebenheiten liegen, sollte die Referenzumgebung weitestgehend der natürlichen Umgebung entsprechen. Da die Parameter der natürlichen Umwelt je nach Standort und Jahreszeit variieren, muss für eine stationäre Analyse eine Referenzumgebung auf Basis von Mittelwerten definiert werden. Die Referenzumgebung beeinflusst stets die Energiequalität der Nutzenergie und bei einigen Technologien auch die mittlere Energiequalität der eingesetzten speicherbaren Primärenergie. Die Abweichung der Analyseergebnisse für die Exergieausnutzung einer stationären von einer exakten, dynamischen Berechnung, insbesondere für die Exergieausnutzung von Wärmeerzeugern kann bei Annahme einer stationären Referenzumgebung, mit Hilfe eines Faktors kompensiert werden (Bargel 2010). Dieser ist für alle verglichenen Systeme ähnlich und lässt sich mit 1,17 mitteln. D.h. dass die Exergieausnutzung unter Verwendung realer Außentemperaturen ca. 1,17-mal höher ist als bei Verwendung einer statischen Referenzumge-

¹² Als Parameter werden hier die einen Energie- oder Stoffstrom charakterisierenden, größenunabhängigen Zustandsgrößen bezeichnet, wie Temperatur, Druck oder spezifische Zusammensetzung.

¹³ Es existieren folgende Exergiearten: thermisch, mechanisch, chemisch, kinetisch, potenziell und nuklear. Für die Bewertung üblicher Wärmeversorgungs-systeme ist es meist ausreichend ausschließlich thermische und chemische Exergie zu betrachten.

bung. Für den Vergleich von Primärenergien ist der Wert jedoch wesentlich geringer, da hier ausschließlich im Vergleich zur Raumwärme relativ hochwertige Energieformen verwendet werden, deren Energiequalität nur in wesentlich geringem Maße von der Außentemperatur abhängt¹⁴.

In jedem Fall muss die Referenzumgebung stets bei der Analyse mitbeschrieben werden. Denn die Exergie ist gleichermaßen eine Funktion der Referenzumgebung wie des betrachteten Energiestromes. Die unterschiedlichen Referenzumgebungen können dazu führen, dass ein Vergleich der einzelnen Untersuchungen nicht immer direkt möglich ist. Prinzipiell lassen sich die Ergebnisse jedoch mit ausreichender Genauigkeit in einander umrechnen. Dazu ist jedoch eine detaillierte Beschreibung der verwendeten Annahmen erforderlich.

Die stationäre Referenzumgebung findet vorrangig Anwendung in Untersuchungen für erste Abschätzungen von verschiedenen Versorgungskonzepten im Gebäudebereich sowie für die Bewertung von Quartieren und Kommunen.

5.2.5 Referenzumgebung für dynamische Analysen

Ist es das Ziel, Komponenten der zu untersuchenden Anlagentechnik zu optimieren oder die Bewertung von Kühlanlagen durchzuführen, dann ist es förderlich, die Referenzumgebung dynamisch im jahreszeitlichen Verlauf zu modellieren, um möglichst genaue Aussagen über die Betriebsweise und die Verluste im System treffen zu können.

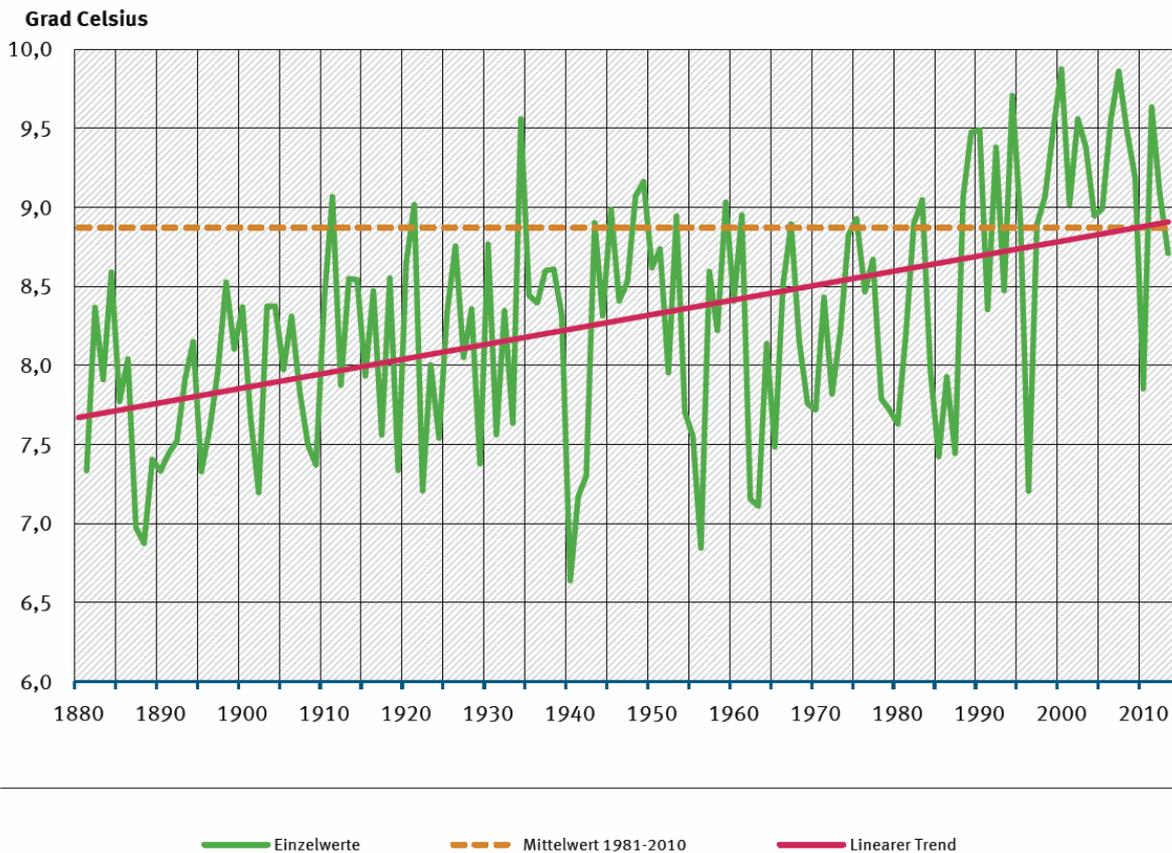
Eine dynamische Referenzumgebung bringt den Nachteil eines wesentlich erhöhten Berechnungsaufwandes mit sich. Daher sollte die Exergieberechnung nur dann vor dem Hintergrund einer dynamischen Referenzumgebung durchgeführt werden, wenn eine hohe Genauigkeit oder die Bewertung zeitlich veränderlicher Effekte notwendig ist. Bei der Bewertung kommunaler Energiesysteme im Rahmen des vorliegenden Berichtes spielt die dynamische Analyse keine Rolle.

5.2.6 Referenzumgebung für die kommunale Bewertung

Für die exergetische Bewertung kommunaler Systeme im Rahmen des Projektes wird eine stationäre Referenzumgebung angenommen. Die Referenztemperatur beträgt 9°C und repräsentiert die Jahresmitteltemperatur in Deutschland.

Abbildung 3 zeigt deutlich den Anstieg der jährlichen mittleren Tagestemperatur seit 1881. Heute (2014) liegt der langjährige lineare Trend bei etwa 9°C.

¹⁴ Z.B. Ist die Energiequalität von Raumwärme (20°C) bei 9°C Referenztemperatur um 36% niedriger als bei 5 °C. Bei einer Wärmequelle welche mit Wärme bei 70°C versorgt ändert sie die Energiequalität jedoch bei gleicher Änderung der Referenztemperatur nur um 7%. Die Energiequalität von Brennstoffen ist vollständig unabhängig von der Referenztemperatur.

Abbildung 3: Jährliche mittlere Tagestemperatur in Deutschland von 1881 bis 2013.**Jährliche mittlere Tagesmitteltemperatur in Deutschland 1881 bis 2013**

Quelle: Umweltbundesamt und Deutscher Wetterdienst

5.3 Exergetische Bewertung für Kälteanlagen

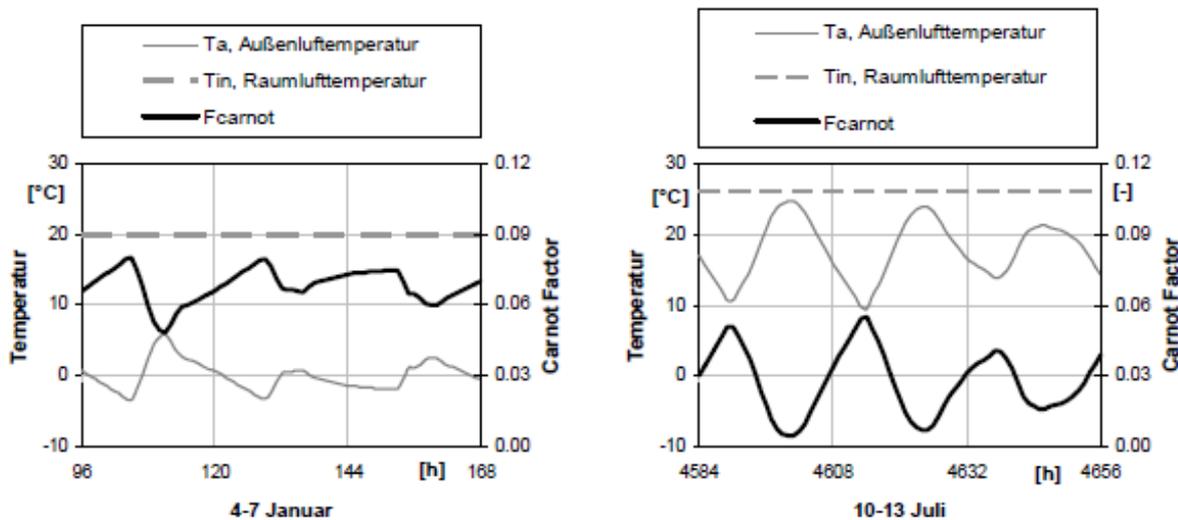
Die Exergieausnutzung von Kälteanlagen lässt sich in vielen Fällen nur sehr grob auf Basis stationärer Berechnungen abschätzen. Dies liegt insbesondere daran, dass häufig der Kältebedarf nur aufgrund einer unzureichend schnellen Gebäudeauskühlung besteht. So müssen Bürogebäude mit Glasfassaden häufig auf der Südseite gekühlt werden damit eine Raumtemperatur von 20°C nicht überschritten wird, trotz dem die Außentemperatur unterhalb von 20 °C liegt. Hier liegt statisch gesehen kein Exergiebedarf für Kühlung vor, sondern es sollen nur bauliche Eigenheiten technisch kompensiert werden.

Da die Innenraumtemperatur auch bei Außentemperaturen höher als 20 °C im Sommer nah an der Umgebungstemperatur liegt, wird der Carnot-Faktor, und damit die Exergieflüsse, starken Schwankungen während der sommerlichen Kühlperiode ausgesetzt. Das hat zur Folge, dass stationäre Bewertungen von den Exergieflüssen für die Kühlperiode auf der Grundlage von Durchschnittswerten für Umgebungstemperaturen dazu führen, dass signifikante Ungenauigkeiten auftreten (Sakulpipatsin 2008; Angelotti und Caputo 2007). Dies gilt allerdings vor allem für die Bewertung der Exergieausnutzung der Kühl-Anwendungen.

Zusätzlich kann es durch den Einsatz von Kühlanlagen zu einem Anstieg der relativen Luftfeuchtigkeit im Raum (Verdunstungskühlung) oder zu Austrocknungserscheinungen der

Raumluft (Entfeuchtung) kommen. Daher ist für die umfassende exergetische Bewertung des Kühlfalls zusätzlich eine exergetische Bewertung der feuchten Luft und damit der chemischen Exergie erforderlich.

Abbildung 4: Vergleich Heiz- und Kühlfall (Torio 2008).



Untersuchungen (Sakulpipatsin 2008) zeigen das Verhalten der Exergie feuchter Luft unter verschiedenen klimatischen Bedingungen. Der Einfluss von Veränderungen in der Definition der Umgebung auf die Genauigkeit der Bewertung der Exergieströme hängt stark davon ab, wie sehr sich die Eigenschaften der Umgebung gegenüber dem zu untersuchenden System unterscheiden. Diese ist als Nutzen durch Aufwand definiert. Insbesondere die Exergie welche mit der Nutzkälte verknüpft ist, kann stark in Abhängigkeit von der Umgebung schwanken. Wird der exergetische Aufwand für die Kühlung berücksichtigt, so basiert dieser häufig auf dem Verbrauch von Strom der durch die Verbrennung von Brennstoffen erzeugt wurde.

Damit ist der exergetische Aufwand auch für die Kühlung in vielen Fällen nur in geringem Maße von der exakten Definition der Referenzumgebung abhängig. Demzufolge sind stationäre Annahmen für eine erste Bewertung und Analyse der Exergieflüsse für gemäßigte bis kalte Klimata akzeptabel und meist ausreichend genau. Detaillierte Analysen von Kühlanwendungen erfordern jedoch dynamische Bewertungen und damit aufwändige Berechnungen (Torio, Angelotti und Schmidt 2008).

Mit Hilfe des Exergieausweises (siehe Kapitel 6) lassen sich bereits jetzt einfache Kälteanwendungen in Bauprojekten grob bewerten, da dort der Ressourcenverbrauch im Vordergrund steht. Allerdings erfordert die Übertragbarkeit dieser Ansätze auf Kommunen noch eine detaillierte Untersuchung. Da diese nicht Kern des Projektes war, wurde der Kühlfall für die Bewertung der Kommunen vorerst für außen vor gelassen und ist in nachfolgenden Projekten separat zu untersuchen.

5.4 Energienachnutzung / Kaskadierung

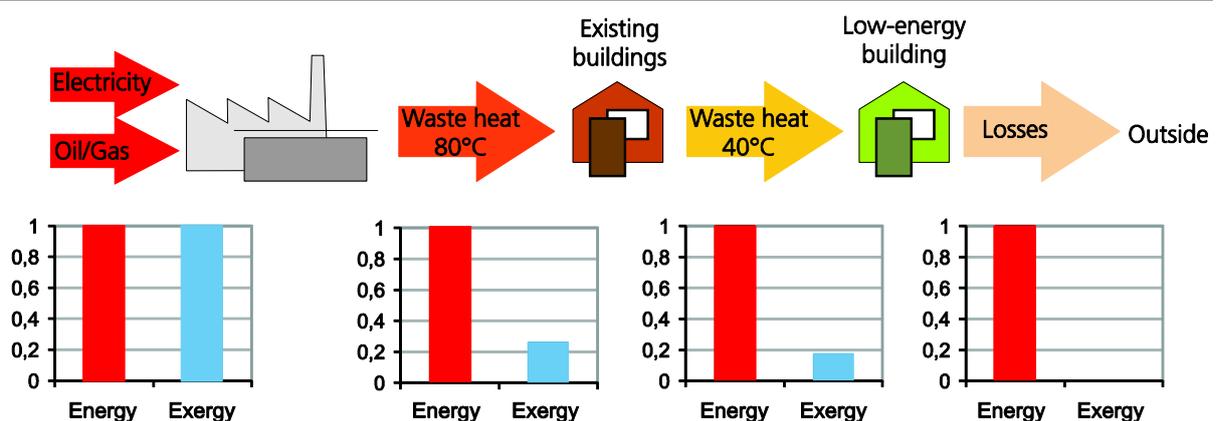
Heizsysteme benötigen unterschiedliche Versorgungstemperaturen für verschiedene Anwendungen im Gebäudebereich, zum einen für die Beheizung von Räumen und zum anderen für die Trinkwarmwasserbereitstellung. Um maximalen Nutzen aus einem Energiefluss erzielen zu können ist es sinnvoll, verschiedene Temperaturniveaus gemäß ihren Anforderungen in der

Gebäudetechnik zu kaskadieren. Das heißt erst werden Wärmeströme auf hohem Temperaturniveau genutzt. Dabei entsteht meist Abwärme auf niedrigerem Temperaturniveau, welche wiederum in geeigneten Anwendungen genutzt werden kann. Häufig erfordert dies eine Integration verschiedener Bedarfe. Intelligentes Energiemanagement, Bi-direktionale Versorgungskonzepte, Kurzzeitspeicher und angepasste Versorgungsleitungen bieten vielversprechende Möglichkeiten, um die Gesamteffizienz der Energienutzung exergetisch zu verbessern.

Mit einer Potentialanalyse können in einem ersten Schritt die verschiedenen Temperatur-Bedarfsniveaus einer Siedlung klassifiziert werden. Dabei können hochwertige und geringwertige Exergiequellen (s. Abbildung 5) unterschieden werden. Hochwertige Exergiequellen sind Strom und chemische Energieträger wie Öl, Gas und Biomasse, die sowohl hohe Versorgungstemperaturen als auch hochqualitative Bedarfe versorgen können. Geringwertige Exergiequellen sind Wärmequellen wie z.B. Niedertemperaturabwärme aus Industrieprozessen, Wärme nahe der Umgebungstemperatur sowie auch Grubenwasser, die vorrangig Niedertemperaturbedarfe wie die Raumheizung decken können.

Im Allgemeinen bieten exergetische Anwendungen die hochwertige Exergiequellen nutzen das größte Potential für eine kaskadierte Exergienutzung. Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen produzieren gleichzeitig Strom und Wärme. Dabei macht sich diese Technologie die Tatsache zu Nutze, dass Strom nur dann aus Verbrennungswärme erzeugt werden kann, wenn gleichzeitig Abwärme erzeugt wird. Die erzeugte Wärme kann dabei im Temperaturniveau angepasst und zur Versorgung von Fernwärmenetzen eingesetzt werden. Auch die Abwärme aus Industrieprozessen auf einem Temperaturniveau von ca. 80°C ist für die Beheizung von bestehenden Gebäuden (s. Abbildung 5) einsetzbar. Der Rücklauf ist oftmals noch warm genug, um gut gedämmte Niedrigenergiehäuser ausreichend mit Wärme zu versorgen. Die Energie des ursprünglich verwendeten hochwertigen Exergiestroms wird dabei mehrmals verwendet, um mit der zur Verfügung stehenden Exergie so viele Bedarfe wie möglich abzudecken (Kaskadennutzung / Mehrfachnutzung von Energieströmen).

Abbildung 5: Kaskadierung eines Wärmestroms nach einem KWK-Prozess oder Industrieprozess



© Fraunhofer IBP

Die Kaskadierung von Exergieströmen erfordert mitunter neue Versorgungsnetze in denen sowohl Vor- als auch Rücklauf zur Wärmeversorgung genutzt werden können. Da durch die Kas-

kadierung die Komplexität des Versorgungssystems steigt, sind vor der Umsetzung häufig eingehendere Untersuchungen notwendig.

Im Fall der Rücklaufnutzung eines Fernwärmenetzes sind beispielsweise folgende Punkte vor der Umsetzung zu beachten und zu untersuchen (Zepf 2012):

- der anliegende Massenstrom und die Rücklauftemperatur
- Häufung von Rücklaufanschlüssen in einem Gebiet und die damit verbundene Reduzierung der Rücklauftemperatur
- Jeder Rücklaufanschluss benötigt zusätzliche Hausanschlussleistung
- nachgeschaltete Rücklaufanschlüsse benötigen mehr Vorlaufwasser
- In Netzbereichen, die am Endstrahl liegen, ist die Möglichkeit einer Gebietsbeimischstation zu prüfen (höhere Versorgungssicherheit, geringere Kosten).

5.5 Einführung in das „LowEx“-Berechnungswerkzeug

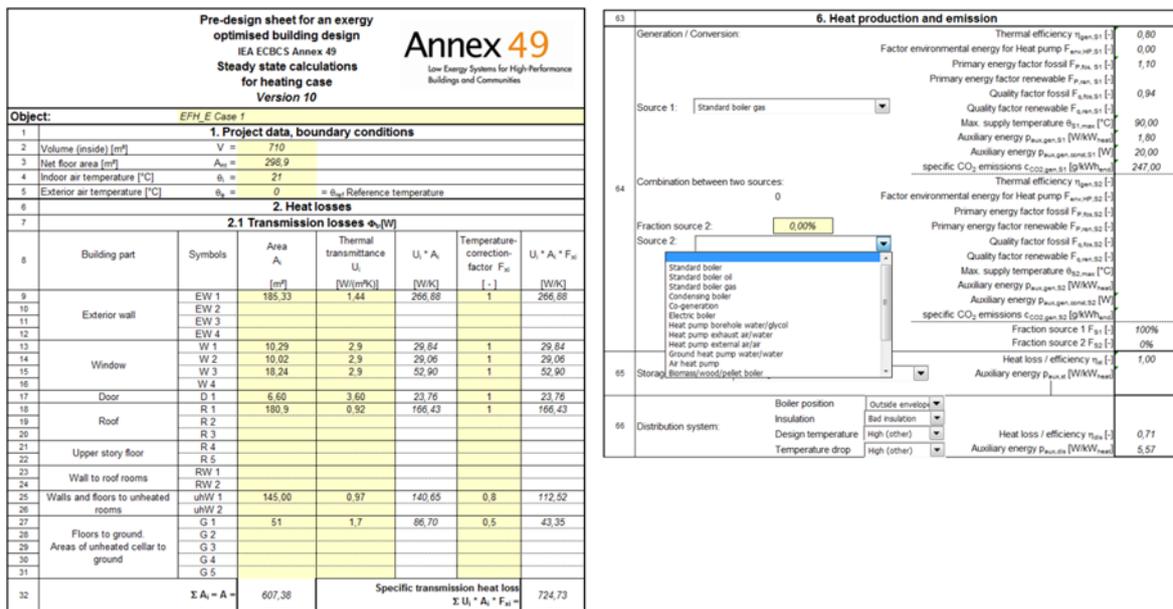
Um die Nutzung des Exergie-Konzeptes unter Gebäudeplanern und Entscheidungsträgern zu etablieren, wurden eine Vielzahl von Software-Berechnungswerkzeugen (Software-Tools) innerhalb des IEA ECBCS Annex 49 und des nationalen LowEx-Verbundes entwickelt. Diese sind unterschiedlich komplex und können für verschiedenste Anwendungsfälle eingesetzt werden.

In diesem Abschnitt soll das „LowEx“-Berechnungswerkzeug des Fraunhofer IBP kurz vorgestellt werden. Das „LowEx“-Berechnungswerkzeug ist ein auf MS-Excel-basierendes Berechnungswerkzeug, das zur detaillierten Analyse der Energieversorgung und des Energieverbrauchs in Gebäuden dient. Es beruht auf einem vereinfachten stationären Ansatz für die energetische und exergetische Bewertung von Gebäuden und deren Anlagentechnik. Grundlagen die im „LowEx“-Bewertungskonzept Anwendung finden, sind teilweise mit in die in diesem Kapitel dargestellten Bewertungsgrundlagen für kommunale Energiesysteme mit eingeflossen.

Es ist zu beachten das das „LowEx“-Berechnungswerkzeug in einigen Fällen andere Bewertungsgrundlagen als die in diesem Projekt verwendeten ansetzt, da es sich auf einzelne Gebäudekomponenten konzentriert und den Stand der Forschung nur bis zum Zeitpunkt seines Entstehens (2007) mit aufnehmen konnte. So wurden im „LowEx“-Bewertungswerkzeug Primärenergiefaktoren komplett aus der EnEV 2007 entnommen. Für die vorliegende Betrachtung werden nur die Primärenergiefaktoren für Brennstoffe und Strom aus der EnEV 2007 entnommen. Die Primärenergiefaktoren für Fernwärme werden bei der in diesem Projekt vorliegenden Betrachtung gemäß der Carnot-Allokation (siehe Kapitel 7.4) berechnet. Ebenso werden Primärenergiefaktoren für Solarthermie, Geothermie und industrielle Abwärme auf Basis exergetischer Betrachtungen bestimmt. Aus diesem Grund können Ergebnisse des „LowEx“-Berechnungswerkzeuges von den in diesem Bericht dargestellten abweichen.

Das LowEx-Berechnungswerkzeug basiert auf der deutschen Energieeinsparverordnung (EnEV 2007). Es ermöglicht die Darstellung der Exergie-Effizienz einzelner Komponenten eines Versorgungssystems von der Primärenergieumwandlung, über die Erzeugung bis hin zur Verteilung und Übergabe an den Raum. Auf zwei Excel-Seiten (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) werden alle benötigten Daten eingegeben bzw. die Anlagentechnik aus vorgegebenen Menüs ausgewählt. Auf zwei weiteren Seiten werden die Ergebnisse in Tabellen bzw. Diagrammen zusammengefasst. Alle Schritte der Energienutzungskette - von der Primärenergie, über das Gebäude, zur Umgebung (d.h. Außenlufttemperatur) - werden in der Analyse abgebildet. Charakteristika der Gebäudehülle und der Anlagentechnik können in mehreren Stufen zunehmend detaillierter eingegeben werden.

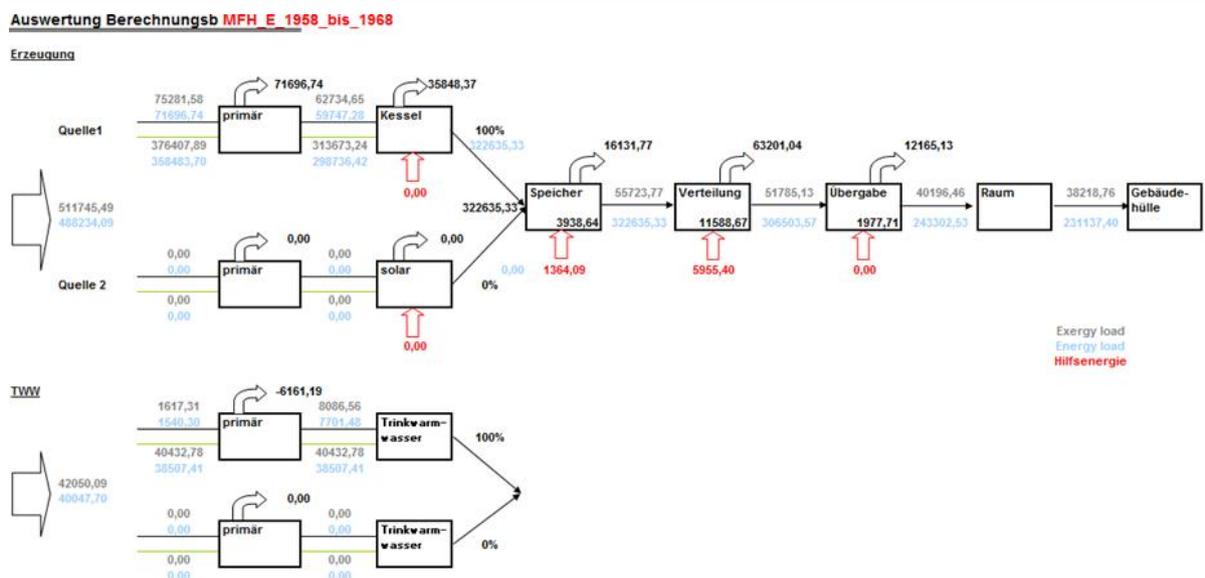
Abbildung 6: (a) Felder für die Eingabe von Daten für die Definition der Gebäudehülle im ECBCS Annex 49 pre-design tool (b) Drop-down Menüs zur Auswahl der Haustechnik



© Fraunhofer IBP

In dem „LowEx“-Berechnungswerkzeug ist es möglich, zwei unterschiedliche Erzeuger parallel auszuwählen. Dies ist notwendig, wenn z.B. zum Gas-Brennwertkessel zusätzlich Solarthermie-Kollektoren betrieben werden, um die Heizung bzw. Trinkwarmwasserbereitung regenerativ zu unterstützen.

Abbildung 7: Aufteilung der Energieflüsse bei der Erzeugung und Primärenergieumwandlung in einen fossilen und regenerativen Anteil



© Fraunhofer IBP

Dafür werden der Erzeugungs- und Primäranteil in einen fossilen und einen regenerativen Anteil aufgeteilt, was eine genaue Bestimmung des regenerativen Anteils ermöglicht wird, der bei der Berechnung des Primärenergiefaktors gemäß der EnEV- Bewertung nicht mitbilanziert wird.

Die Gleichungen für jede der durchgeführten exergetischen Berechnungen sind direkt im jeweiligen Berechnungsblatt ausgewiesen. Somit können sie bei Bedarf auch angepasst werden. Darüber hinaus sind alle erforderlichen Annahmen, wie die Energieeffizienz und Temperatur für den Betrieb der Gebäudesysteme, die in den Tabellen eingeführt wurden, in den verschiedenen Arbeitsblättern und den Berechnungen aufgeführt. Der Benutzer kann jederzeit die Standardwerte für diese Parameter so ändern, dass sie dem jeweiligen System angepasst werden.

Die Ergebnisse der berechneten Energie- und Exergieflüsse können in mehreren Diagrammen dargestellt werden.

5.6 Bewertung von Energiesystemen

Im Rahmen des Projekts wurde eine exergetische Bewertung verschiedener bestehender und zukünftiger Energiesysteme untersucht und bewertet. In einem ersten Schritt wurden alle Berechnungen mit Hilfe eines weiterentwickelten Auszugs aus dem oben beschriebenen „LowEx“-Berechnungswerkzeug durchgeführt. Als Berechnungsgrundlage werden dabei Mittelwerte herangezogen, die für die jeweils betrachtete Technologie typisch sind. Die untersuchten Systeme beinhalten Erdgaskessel, Brennwertkessel, Wärmepumpen und Solaranlagen sowie Holzpelletkessel. Für Kraft-Wärme-gekoppelte Systeme werden KWK-Systeme mit unterschiedlichen Temperaturniveaus und auch unterschiedlichen Brennstoffen betrachtet. Ebenso wird auch die Verwendung industrieller Abwärme und von Fernwärme aus tiefer Geothermie untersucht. Die so berechneten Systeme finden sich in Kapitel 5.7.

Im Rahmen des Projekts wurde die Systematik des „LowEx Werkzeugs“ weiterentwickelt. Insbesondere waren Vereinfachungen und Standardisierungen notwendig, um die anschließende kommunale Betrachtung zu ermöglichen. Außerdem haben sich zugrunde liegende Normen, wie die zurückgezogene Vorgängerversion der DIN V 18599-1, geändert. Dies wird ab Kapitel 8 beschrieben.

5.7 Exergetische Bewertung von Wärmeversorgungssystemen

5.7.1 Bewertungsgrößen

Wie bereits in Kapitel 5 dargestellt, bietet es sich an sowohl die Exergie-Ausnutzung, als auch den Primärenergie-Verbrauch zu bewerten. Da sich eine Exergie-Ausnutzung auch für Teilsysteme definieren lässt, ist es wichtig die für eine Gesamtbewertung verwendete Kennzahl gesondert zu kennzeichnen. Im Allgemeinen soll daher bei Verwendung der in Kapitel 5 dargestellten Grundlagen, von Primärenergie-Ausnutzung und Primärenergie-Verbrauch die Rede sein. Da diese Worte jedoch häufig insbesondere in Diagrammen zu sperrig sind, soll „EXERGIE“ als Synonym für Primärenergie verwendet werden. D.h. statt Primärenergie-Verbrauch kann auch EXERGIE-Verbrauch und statt Primärenergie-Ausnutzung kann EXERGIE-Ausnutzung verwendet werden.

Den folgenden Berechnungen in diesem Kapitel liegt das Mehrfamilienhaus MFH-E des Projekts TABULA¹⁵ zugrunde. Dabei handelt es sich um ein Gebäude aus dem Jahr 1958-1968. Im Originalzustand liegt der spezifische Heizenergiebedarf bei 151,6 Kilowattstunden pro Quadratmeter und Jahr, nach einer Sanierung mit üblichen Standards beträgt er 63,8 kWh/m²a. Der spezifische Jahres-Exergie-Bedarf beträgt 2,39 kWh/m²a. Ein Mehrfamilienhaus wurde gewählt, weil es in einem Gebiet mit Fernwärmeversorgung typischerweise anzutreffen ist. Aus Gründen der Vergleichbarkeit mit den teilweise nur in gedämmten Gebäuden einsetzbaren Heizungssystemen (Wärmepumpe, Rücklaufeinspeisung aus Fernwärme) wurde das Gebäude nach konventioneller Sanierung mit einem verhältnismäßig niedrigem spezifischen Heizwärmebedarf betrachtet.

Die Trinkwarmwasserbereitstellung wurde nicht betrachtet.

Der spezifische Jahres-Exergie-Bedarf (E_x) ergibt sich aus der Multiplikation des Carnot-Faktors mit dem spezifischen Heizwärmebedarfs Q_h des Gebäudes.

$$E_x = F_{\text{Carnot}} \times Q_h$$

Die Referenztemperatur ($T_0 = 9^\circ\text{C}$) entspricht der Jahresdurchschnittstemperatur in Deutschland. Die Innenraumlufttemperatur (T) wird mit 20°C angenommen und entspricht den allgemeinen zu erreichenden Komfort-Bedingungen. Der Carnot-Faktor gibt dabei an, wie groß der Exergie-Gehalt der Raumlufte in Bezug auf die Referenztemperatur ist:

$$F_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_0}{T}$$

Weitere allgemeine Annahmen sind in Kapitel 5.2 dargestellt. Es wird davon ausgegangen, dass das Gebäude als Wohnhaus genutzt wird.

Die eingesetzte Primärenergie bzw. die entsprechende Exergie wird für Brennstoffe mit Hilfe von Primärenergiefaktoren bestimmt. Die Werte orientieren sich weitestgehend an (Pehnt 2010). Die Werte für Solarenergie, tiefe Geothermie und Umweltwärme wurden entsprechend (Jentsch 2010) festgelegt.

Tabelle 1: Primärenergiefaktoren für Brennstoffe, Strom und erneuerbare Energien

Strommix	Fossile Brennstoffe	Erneuerbare Brennstoffe	Strom aus dem Grenzkraftwerk	Solarenergie, tiefe Geothermie, Umweltwärme
2,7	1,1	1,2	3	1

Für Fernwärme aus Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) wird in der EnEV häufig ein Primärenergiefaktor gesamt kleiner 1 angegeben. Das Problem dieser Festlegung ist, dass damit die Primärenergie kleiner als die benötigte Endenergie ist und somit der Energieerhaltungssatz der Physik verletzt wird. Daher lässt sich für einen so festgelegten Primärenergiefaktor keine sinnvolle Kombination mit dem auf physikalischen Prinzipien basierenden Konzept der Energiequalität und somit der Exergie finden. Aus diesem Grund wurden für die Fernwärme mehrere Anpassungen im Vergleich zur konventionellen Bewertung vorgenommen.

¹⁵ Intelligent Energy Europe: Typology Approach for Building Stock Energy Assessment, unter Mitarbeit des IWU; www.building-typology.eu (abgerufen am 1.2.2012).

In einem ersten Schritt wird die Primärenergie, welche vom Heizkraftwerk verbraucht wird gemäß der Carnot-Methode (siehe Kapitel 7.4) auf Strom und Wärme aufgeteilt. Dabei erhält die Wärme meist einen Anteil der dazu führt, dass das Verhältnis von fossiler Primärenergie zu Wärme kleiner 1 ist. Obwohl auch hier somit Primärenergiefaktoren von kleiner 1 auftreten, wird jedoch deutlich, dass es sich dabei nur um den fossilen Anteil handelt. Aufgrund der Allokation nach der Carnot-Methode weicht dieser fossile Anteil generell von den üblichen Werten ab, die entweder pauschal mit 0,7 oder gemäß der Stromgutschriften-Methode (siehe Kapitel 7.7) berechnet wurde.

Da der Energieerhaltungssatz gilt, ist es physikalisch nicht möglich, mehr Energie zu verbrauchen als von Erzeugungsanlage bereitgestellt wird. Hier wird auf ein in (Jentsch 2010) vorgestelltes Konzept zurückgegriffen, demzufolge die Differenz zwischen allokiertem Brennstoff und bereitgestellter Wärme aus Abwärme bei Umgebungsbedingungen (also mit Energiequalität = 0) bereitgestellt wird. Diese Festlegung basiert auf der Tatsache, dass Strom aus Wärme auch im Idealfall nur unter Abgabe von Wärme an die Umwelt erzeugt werden kann (Carnot 1824).

Für die Fernwärme existieren somit Primärenergiefaktoren, welche sich aus einem Abwärmeanteil und einem Anteil fossiler Primärenergie zusammensetzen. Diese sind stets größer gleich 1. Da die fossile Primärenergie jedoch eine Energiequalität von 100% besitzt und die Abwärme bei Referenztemperatur eine Energiequalität von 0%, ergibt sich ein Exergieeffizienz pro energetische Wärmeeinheit von kleiner 1. Dabei ist zu beachten, dass hier eine exergetische Größe auf eine energetische bezogen wird, wodurch kein Widerspruch zu Physik besteht. Denn Exergie ist grundsätzlich kleiner oder gleich als die damit verbundene Energie.

Die exakten Faktoren für die Fernwärme ergeben sich aus den Nutzungsgraden des Heizkraftwerkes und Vor- und Rücklauftemperaturen, sowie aus weiteren Annahmen für die Netze und die Haustechnik. Da die Fernwärmefaktoren somit hochspezifisch für ein bestimmtes System sind, wird auf eine tabellarische Darstellung verzichtet. Sie gehen jedoch direkt mit in die exemplarische Bewertung der Einzelsysteme mit ein.

Um die Systeme und die eingesetzten Brennstoffe genauer zu analysieren, wird die Art der eingesetzten Exergie und Energie für die einzelnen Energieträger bestimmt. Die Primärenergie ist nach Energieträgern aufgeteilt. Dabei kommt die oben dargestellte Regelung zum Umgang mit Primärenergiefaktoren zum Einsatz. Im Anschluss werden über CO₂-Faktoren die zugerechneten Emissionen bestimmt. Beides wird im Diagramm als Balken, aufgeteilt nach den entsprechenden Energieträgern.

Die anlagenspezifischen Annahmen zu der Vorlauf- und Rücklauftemperatur, Übergabesystem, Trinkwarmwasser (TWW) und Bereitstellungsnutzungsgrad sind für die untersuchten Systeme jeweils separat zu beschreiben.

Die Ergebnisse der hier folgend aufgeführten Einzelsysteme beinhalten alle Verluste von der Primärenergieumwandlung, Erzeugung, Speicherung, Verteilung und Übergabe. Die Darstellung erfolgt in einem Sankey-Diagramm, das aus anderen Energiebilanzen¹⁶ bekannt ist. Dabei werden die Ergebnisse für die energetische und exergetische Bewertung getrennt ausgewiesen, um sowohl eine energetische als auch exergetische Bewertung des Systems durchführen zu

¹⁶ Siehe z.B. Energieflussbild Deutschland der AG-Energiebilanzen (www.ag-energiebilanzen.de/EN/home/home.html)

können. Auf die Darstellung der Ergebnisse aus der Speicherung, Verteilung und Übergabe wurde aus Übersichtsgründen verzichtet.

Es wird davon ausgegangen, dass die Exergie eines Brennstoffes seinem Brennwert entspricht. Der dadurch entstehende Fehler liegt unter 2% (Bejan 1996).

Die Energie bzw. Exergie für die Trinkwarmwassererzeugung mit Hilfsenergie sind in den nachfolgenden Sankey-Diagrammen dieses Kapitels nicht enthalten.

5.7.2 Erdgas-Brennwertkessel

In Abbildung 8 sind die Ergebnisse für die energetische und exergetische Bewertung eines Erdgas-Brennwertkessels dargestellt.

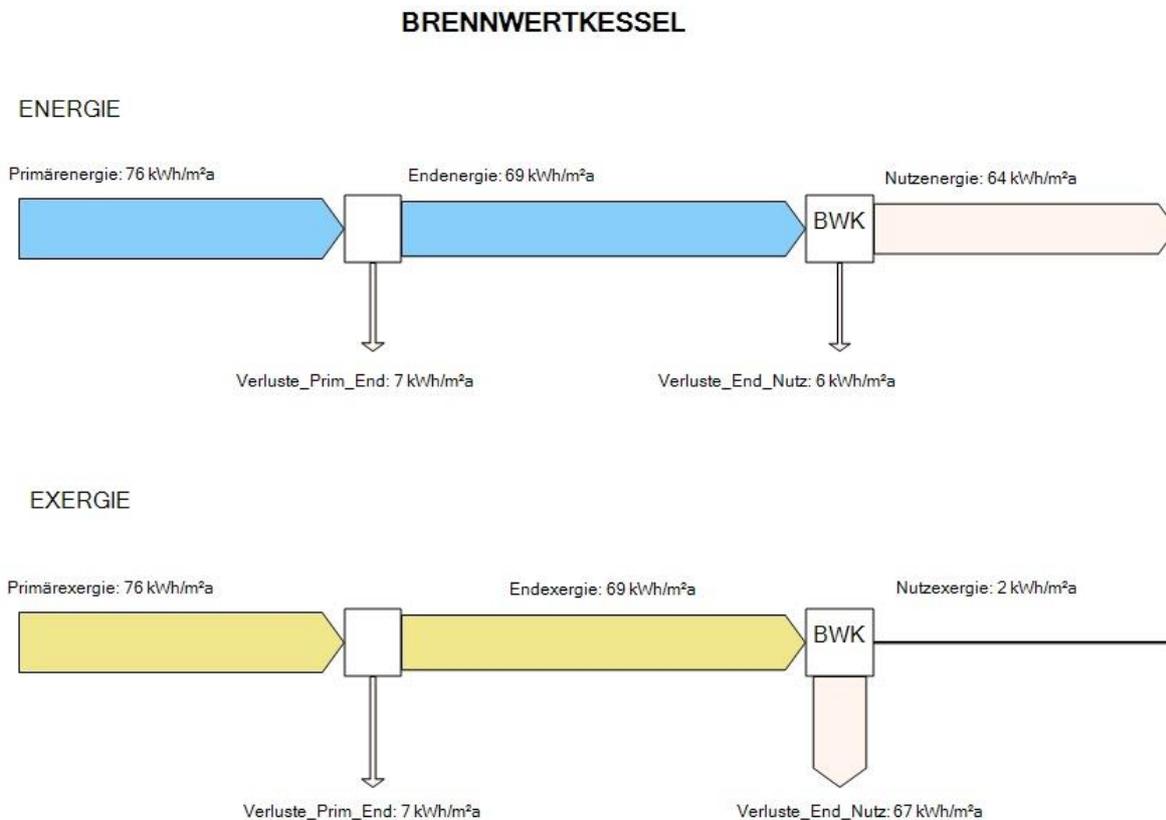
Alle notwendigen Annahmen für die Bewertung sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Annahmen für die energetische und exergetische Bewertung eines Erdgas-Brennwertkessels zur Bereitstellung von Raumwärme

Größe	Wert	Einheit
Nutzungsgrad	92%	
Primärenergiefaktor Erdgas	1,1	
Raumtemperatur	20	°C
Referenztemperatur	9	°C

Die Ergebnisse im Sankey-Diagramm zeigen, dass sich durch die Wärmebereitstellung mit einem Gas-Brennwertkessel, trotz seines sehr guten energetischen Bereitstellungsnutzungsgrades von 92% (bezogen auf den oberen Heizwert), relativ hohe Exergie-Verluste von ca. 74 kWh/m²a im Vergleich zu den Energie-Verlusten von ca. 12 kWh/m²a ergeben. Diese Exergie-Verluste entstehen größtenteils infolge des Verbrennungsprozesses des Gases, durch den hochwertige chemische Exergie (Energiequalität 100%) in geringwertige thermische Exergie für die Niedertemperaturversorgung eines Raumes mit einer Innenraumtemperatur von 20°C (Energiequalität 3,8% bei 9°C Referenztemperatur) umgewandelt wird. Daher ist der Gas-Brennwertkessel zwar energieeffizient, aber ein Beispiel für eine exergetisch schlechte Ausnutzung eines exergetisch hochwertigen Brennstoffes wie Gas. Aus diesem Grund sollte Gas vorrangig für Hochtemperatur-Bedarfe bzw. in einer Kraft-Wärme-gekoppelten Anlage genutzt werden, in der neben Wärme auch Strom erzeugt wird.

Abbildung 8: Sankey-Diagramm eines Erdgas-Brennwertkessels. Werte bezogen auf Energie bzw. Exergie pro Quadratmeter und Jahr beheizte Fläche.



5.7.3 Erdgas-Brennwertkessel mit 40% solarer Unterstützung (vereinfacht)

Im zweiten Beispiel wird der Gas-Brennwertkessel aus Beispiel 1 zusätzlich mit 40% Solarenergie für die Heizung ausgestattet.

Normalerweise werden solch hohe solare Deckungsgrade nur bei Mitberücksichtigung der Trinkwarmwassererzeugung erzielt. Für den generellen Einzelsystemvergleich müssen aber alle Systeme die gleiche Versorgungsaufgabe erfüllen. Daher wird hier vereinfachend angenommen, dass auch dieses System ausschließlich Heizwärme erzeugt. Dabei werden auch Speicherverluste vernachlässigt, um so das generelle System einfach und verständlich zu halten.

Im Vergleich zum reinen Gas-Brennwertkessel ist die Exergie-Ausnutzung besser, so liegen die Verluste bei ca. 47 kWh/m²a (siehe Abbildung 9) im Vergleich zu 74 kWh/m²a beim Gas-Brennwertkessel ohne solare Unterstützung durch Vakuumröhrenkollektoren. Dies ist darauf zurückzuführen, dass 40% der Gesamtenergie mit Hilfe von Solarwärme bereitgestellt werden, wodurch sich die Verluste infolge der Verbrennung von Erdgas reduzieren.

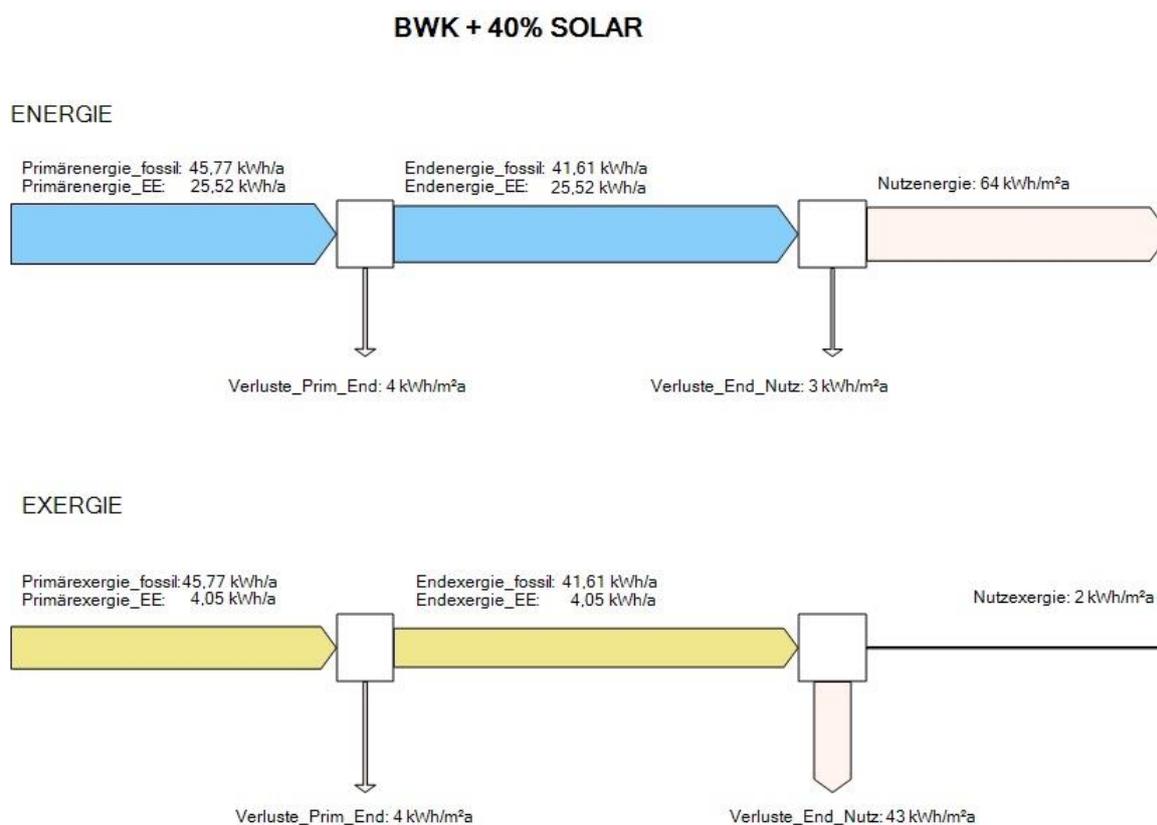
Die genutzte Solarwärme (Energiequalität 11%) besitzt eine wesentlich geringere Energiequalität als Erdgas (Energiequalität 100%) und führt damit zu einer besseren exergetischen Gesamtbilanz.

Alle notwendigen Annahmen für die Bewertung sind Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Annahmen für die energetische und exergetische Bewertung eines Erdgas-Brennwertkessels mit solarer Unterstützung zur Bereitstellung von Raumwärme

Größe	Wert	Einheit
Nutzungsgrad	92%	
Primärenergiefaktor Erdgas	1,1	
Raumtemperatur	20	°C
Referenztemperatur	9	°C
Primärenergiefaktor Solar	1	
Vorlauftemperatur Solarwärme	55	°C
Rücklauftemperatur Solarwärme	35	°C
Anteil der Solarwärme an der Endenergie	40%	

Abbildung 9: Sankey-Diagramm eines Gas-Brennwertkessels mit 40% solarer Unterstützung für Heizung.



5.7.4 Holz-Pelletkessel

Beim Holz-Pelletkessel wird Wärme ähnlich wie beim Erdgas-Brennwertkessel mithilfe eines hochwertigen Brennstoffs (Holz-Pellet) erzeugt.

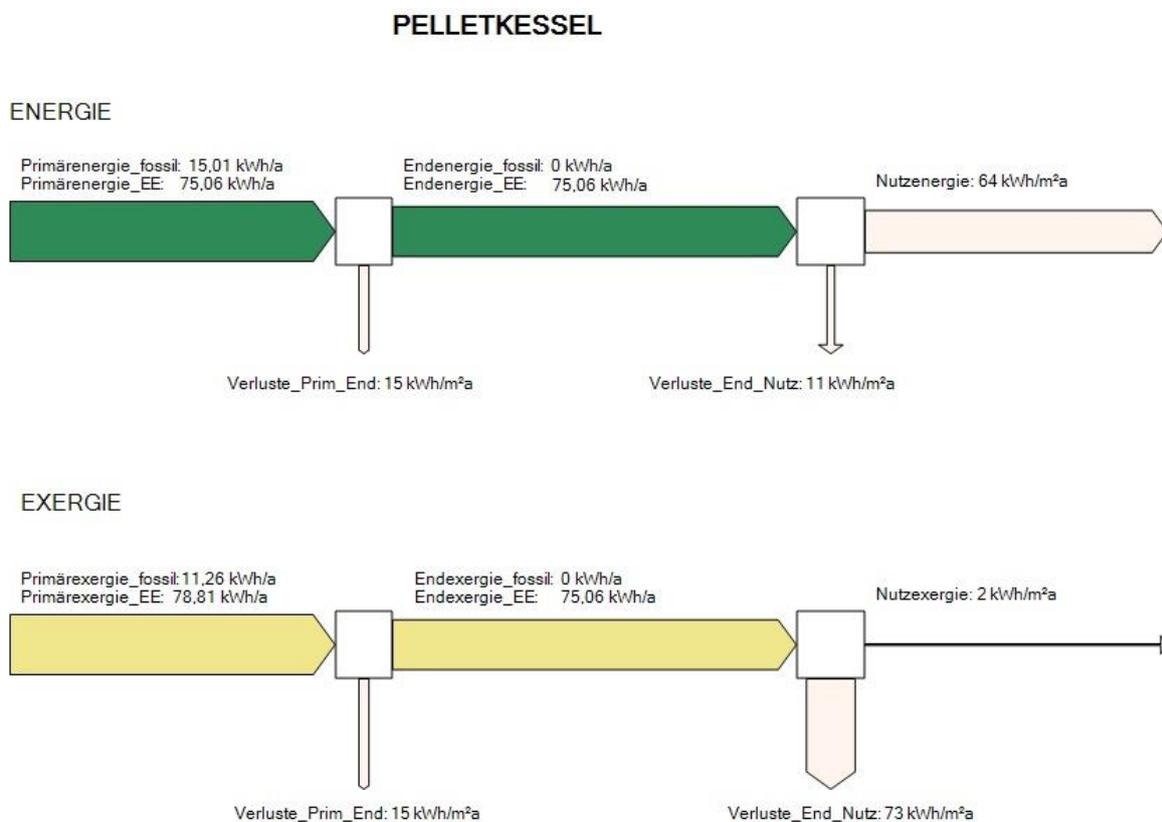
Alle notwendigen Annahmen für die Bewertung sind Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Annahmen für die energetische und exergetische Bewertung eines Holzpellet-Kessels zur Bereitstellung von Raumwärme

Größe	Wert	Einheit
Nutzungsgrad	85%	
Primärenergiefaktor fossil	0,2	
Primärenergiefaktor erneuerbar	1	
Raumtemperatur	20	°C
Referenztemperatur	9	°C

Dass dieser erneuerbar ist spielt für die exergetische Betrachtung keine Rolle, sondern äußert sich ausschließlich auf der Ebene der CO₂-Emissionen. Wie beim Erdgas-Brennwertkessel geht ebenfalls ein Großteil der Exergie im Verbrennungsprozess verloren. Die Verluste liegen bei 88 kWh/m²a im betrachteten Beispielgebäude.

Abbildung 10: Sankey-Diagramm für den betrachteten Holz-Pelletkessel



Bei einer rein energetischen Betrachtung nach EnEV 2009 (BmVBS 2009) wird der erneuerbare Anteil von Holz nicht mit bewertet, wodurch Holz primärenergetisch sehr günstig abschneidet. Bezieht man jedoch den erneuerbaren Anteil mit in die Bewertung mit ein, so ist festzustellen, dass sich die Verbrennung von Holz nicht viel anders verhält als die Verbrennung von Erdgas. Mit dem Unterschied, dass die Verbrennung von Erdgas effizienter ist (Brennwert-Nutzungsgrad BWK = 95% und Brennwert-Nutzungsgrad Holz-Pelletkessel = 85%).

Aus diesem Grund muss mehr Primärenergie für den Holz-Pelletkessel bereitgestellt werden als für den Gas-Brennwertkessel. Da Holz wie auch fossile Brennstoffe eine Energiequalität von 100% hat, wird die Verbrennung von Holz exergetisch sehr schlecht bewertet.

5.7.5 Erd-Wärmepumpe

Die Ergebnisse der Analyse für die Erd-Wärmepumpe mit einem thermischen Wirkungsgrad (COP) von 3,7 zeigen, dass für die Wärmeversorgung des sanierten Mehrfamilienhauses MFH_E zwar mehr Primärenergie (98 kWh/m²a) im Vergleich zum Gas-Brennwertkessel (76 kWh/m²a) aufgebracht werden muss, jedoch nur 52 kWh/m²a für die Primärenergie. Der hohe Primärenergiebedarf ist auf die Verwendung der Endenergie Strom zurückzuführen, der für Wärmepumpen mit dem Verdrängungsstrommix¹⁷ von 3,0 bewertet wird.

Alle notwendigen Annahmen für die Bewertung sind Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5: Annahmen für die energetische und exergetische Bewertung einer Erd-Wärmepumpe zur Bereitstellung von Raumwärme

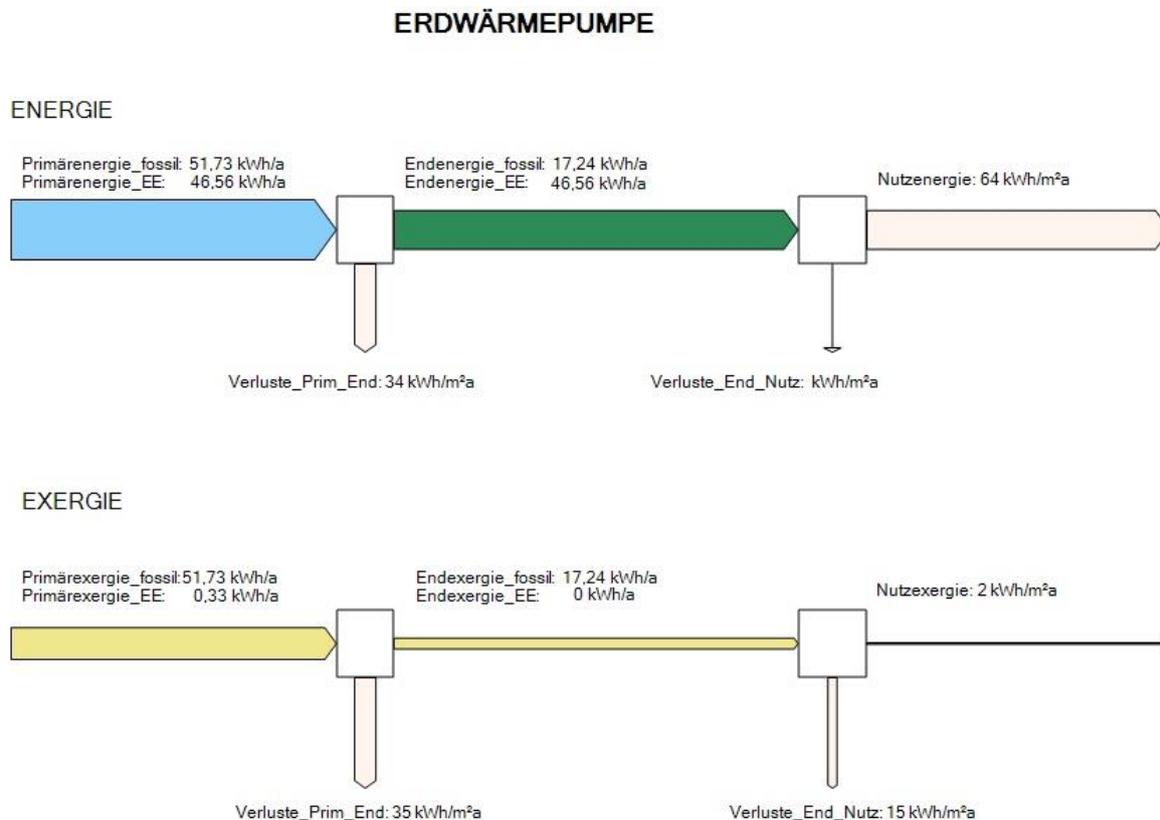
Größe	Wert	Einheit
COP	3,7	
Primärenergiefaktor Verdrängungsstrom	3,0	
Primärenergiefaktor Umweltwärme	1	
Raumtemperatur	20	°C
Referenztemperatur	9	°C

Exergetisch wird somit die Erd-Wärmepumpe durch die Nutzung von Erdwärme aufgrund ihres relativ hohen COPs positiv bewertet. Während beim Erdgas-Brennwertkessel 74 kWh/m²a an Exergie verloren gehen sind es bei der Erdwärmepumpe nur 50 kWh/m²a. Energetisch sind die Verluste mit 34 kWh/m²a dabei jedoch relativ hoch, was sich durch die verlustreiche Stromerzeugung im Grenzkraftwerk erklären lässt.

Die von der Erd-Wärmepumpe aufgenommene Erdwärme wurde hier vereinfachend mit Umgebungstemperatur angenommen. Damit ist die Energiequalität der hier genutzten Erdwärme gleich 0%. Für eine genauere Analyse oder bei anderen Referenztemperaturen kann die Erdwärme jedoch auch eine geringe positive Energiequalität haben.

¹⁷ Es erscheint sinnvoll für den Wärmepumpenstrom den Verdrängungsstrommix für den Primärenergiefaktor zugrunde zu legen, da jede Wärmepumpe zusätzlichen Stromverbrauch zum ohnehin bestehenden erzeugt. Insbesondere in der kalten Jahreszeit. Dieser zusätzliche Bedarf wird aus dem Grenzkraftwerk gedeckt. Dieses ist aktuell ein Steinkohlekraftwerk. Dies führt effektiv zu einem Primärenergiefaktor von 3.

Abbildung 11: Sankey-Diagramm einer monovalent elektrisch betriebenen Erd-Wärmepumpe



5.7.6 Erdgas-betriebene Absorptionswärmepumpe

Die mit Erdgas betriebene Absorptionswärmepumpe ist eine gasbetriebene Luft-Wasser-Wärmepumpe, die im Freien aufgestellt wird. Im Vergleich zu einer konventionellen Wärmepumpe, die mit Strom betrieben wird, wird bei der Gas-Absorptionswärmepumpe der elektrische Kompressor durch eine mit Erdgas angetriebene thermische Einheit ersetzt. Diese setzt mittels Wärmezufuhr einen Wärmeaustauschprozess in Gang, womit die Wärmepumpe der Außenluft Wärme entziehen kann. Die gewonnene Wärme aus der Außenluft sowie die vom Gasbrenner erzeugte Wärme stehen der Wärmepumpe an der warmen Seite zur Verfügung, wodurch der Wirkungsgrad des Wärmeprozesses nachhaltig gesteigert werden kann. Damit kann die Gas-Absorptionswärmepumpe ca. ein Drittel der Wärmeleistung aus der Umgebung entziehen.

Die Leistung der Gas-Absorptionswärmepumpe wird im Vergleich zur Erd-Wärmepumpe (COP) als Heizzahl (PER - Primary Energy Ratio) angegeben. Die Primary Energy Ratio gibt an, wie viel Primärenergie eingesetzt werden muss, um einen bestimmten Betrag an Nutzenergie zu erzielen. Diese PER beträgt bei diesem Beispiel 1,35 und ist vergleichbar mit der Leistungszahl der elektrisch betriebenen Wärmepumpe $COP = 3,7$.

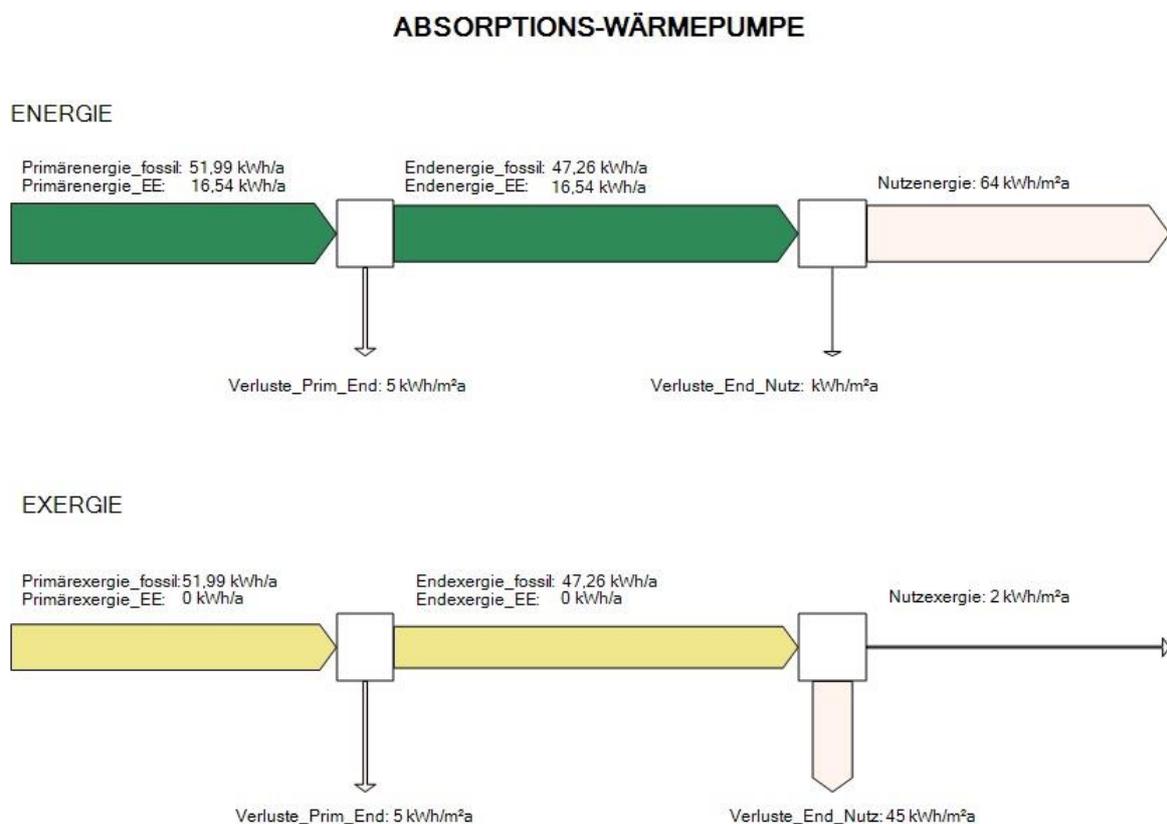
Alle notwendigen Annahmen für die Bewertung sind Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: Annahmen für die energetische und exergetische Bewertung einer Erdgasbetriebenen Absorptionswärmepumpe zur Bereitstellung von Raumwärme

Größe	Wert	Einheit
PER	1,35	
Primärenergiefaktor Erdgas	1,1	
Primärenergiefaktor Umweltwärme	1	
Raumtemperatur	20	°C
Referenztemperatur	9	°C

Interessanterweise ergeben sich für gegenüber der in 5.7.5 analysierten Erd-Wärmepumpe annähernd gleiche Exergie-Verluste von 50 kWh/m²a auf. Allerdings geht bei der Erd-Wärmepumpe ein Großteil der Exergie im Kraftwerk durch die Abwärme verloren, während bei der Erdgas-Absorptionswärmepumpe die Verluste durch die Umwandlung hochwertigen Erdgases in Mitteltemperatur-Abwärme zur Versorgung des Desorbers (teil der Absorptionsanlage) fließen. Die Energieverluste bei der Absorptionswärmepumpe sind jedoch wesentlich geringer als bei der Erd-Wärmepumpe. Dies ist ein schönes Beispiel für die umfassendere Bewertung durch eine Exergie-Analyse. Während es gemäß der Energieanalyse so erscheint als sei eine erdgasbetriebene Absorptionswärmepumpe gegenüber einer stromgetriebenen Erdwärmepumpe klar im Vorteil, zeigt die Exergieanalyse, dass dieses Ergebnis nur der Effekt einer unzureichend umfassenden Betrachtung ist. Denn exergetisch gesehen sind beide gleich effizient.

Abbildung 12: Sankey-Diagramm einer monovalent mit Erdgas betriebenen Absorptionswärmepumpe



5.7.7 Luft-Wärmepumpe

In diesem Beispiel wird eine elektrische Luft -Wärmepumpe mit einem COP von 2,5 bewertet.

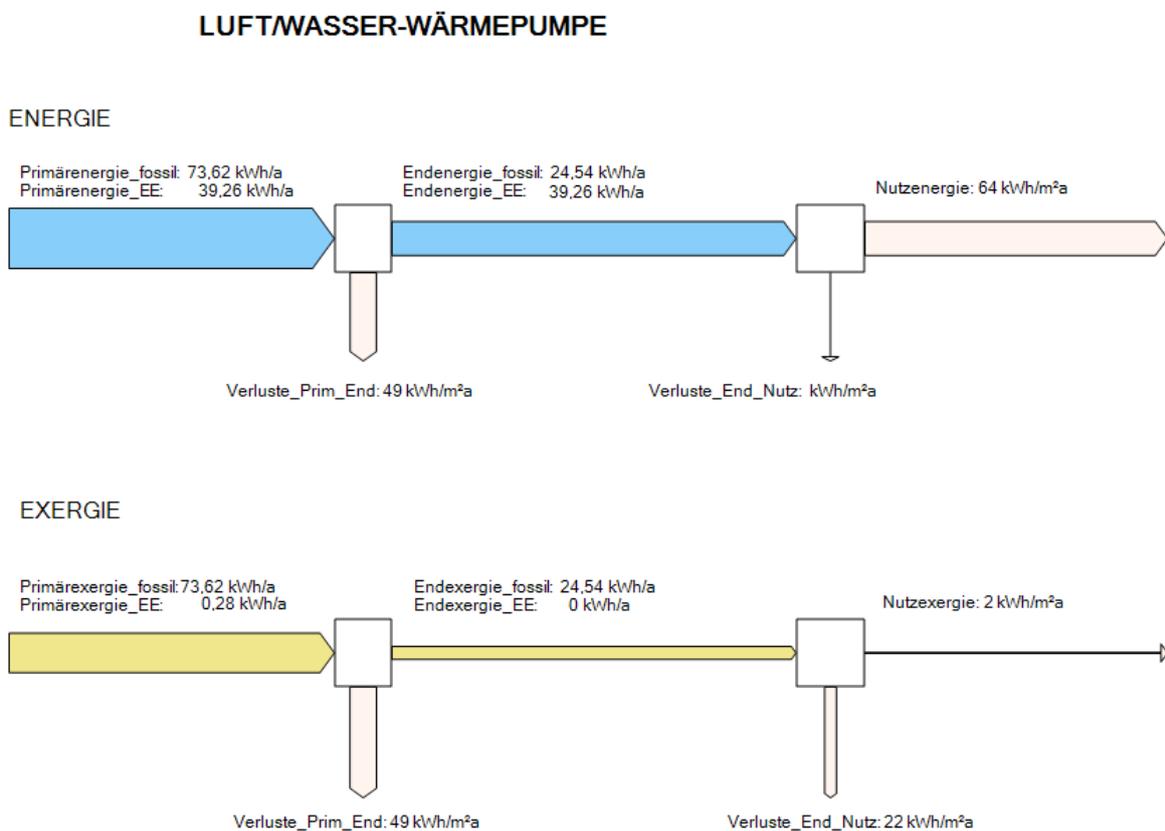
Alle notwendigen Annahmen für die Bewertung sind Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7: Annahmen für die energetische und exergetische Bewertung einer Luft/Wasser Wärmepumpe zur Bereitstellung von Raumwärme

Größe	Wert	Einheit
COP	2,5	
Primärenergiefaktor Verdrängungsstrom	3,0	
Primärenergiefaktor Umweltwärme	1	
Raumtemperatur	20	°C
Referenztemperatur	9	°C

Anhand der Ergebnisse (siehe Abbildung 13) ist festzustellen, dass die Luft-Wärmepumpe wesentlich mehr Primärenergie (113 kWh/m²a) für die Versorgungsaufgabe benötigt als bei der Erzeugung mit einem Gas-Brennwertkessel (76 kWh/m²a) erforderlich ist. Die Primärenergie ist jedoch nahezu gleich. Dies beruht darauf, dass die Außenluft eine Energiequalität von 0% da sie bei Referenztemperatur vorliegt.

Abbildung 13: Sankey-Diagramm einer bivalent elektrisch betriebenen Luft/Wasser-Wärmepumpe.



Es zeigt sich, dass in Summe eine Luft-Wärmepumpe einen energetischen Nachteil im Vergleich zum Erdgas-Brennwertkessel bietet. Exergetisch sind beide Systeme in etwa gleich zu bewerten auch wenn sich die Orte der Exergieverluste (Kessel – Verbrennung intern / Wärmepumpe – Verbrennung im Kraftwerk) unterscheiden. In Anbetracht der Tatsache, dass eine Luft-Wärmepumpe komplexer ist als ein Erdgas-Brennwertkessel und nur geringere Vorlauftemperaturen bereitstellen kann, erscheint diese Technologie vor dem Hintergrund des heutigen Stromnetzes wenig vorteilhaft. Zukünftig, d.h. bei einem hohen Anteil von Windkraft im Bundesmix, können die Vorteile der Wärmepumpe überwiegen.

5.7.8 Fernwärme aus Kraft-Wärme-Kopplung (Vorlauftemp. max. 130°C)

Wird ein Gebäude mit Fernwärme beheizt, verlagert sich die Wärmeerzeugung aus dem Gebäude heraus in ein Heizkraftwerk, in dem Wärme und Strom in einem gekoppelten Prozess erzeugt werden. Die Ergebnisse für die energetische und exergetische Bewertung für ein altes KWK-Fernwärmesystem zeigt die Abbildung 14.

Da neben der Berechnung der Energieverluste zusätzlich eine Brennstoff-Zuordnung zu Strom und Wärme vorzunehmen ist, ist die Bewertung der Kraft-Wärme-Kopplung wesentlich komplexer als die Bewertung anderer Technologien. Als Allokationsmethode wird die Carnot-Methode verwendet (siehe Kapitel 7.4).

Alle notwendigen Annahmen für die Bewertung sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

Tabelle 8: Annahmen für die energetische und exergetische Bewertung von Fernwärme aus Kraft-Wärme-Kopplung zur Bereitstellung von Raumwärme

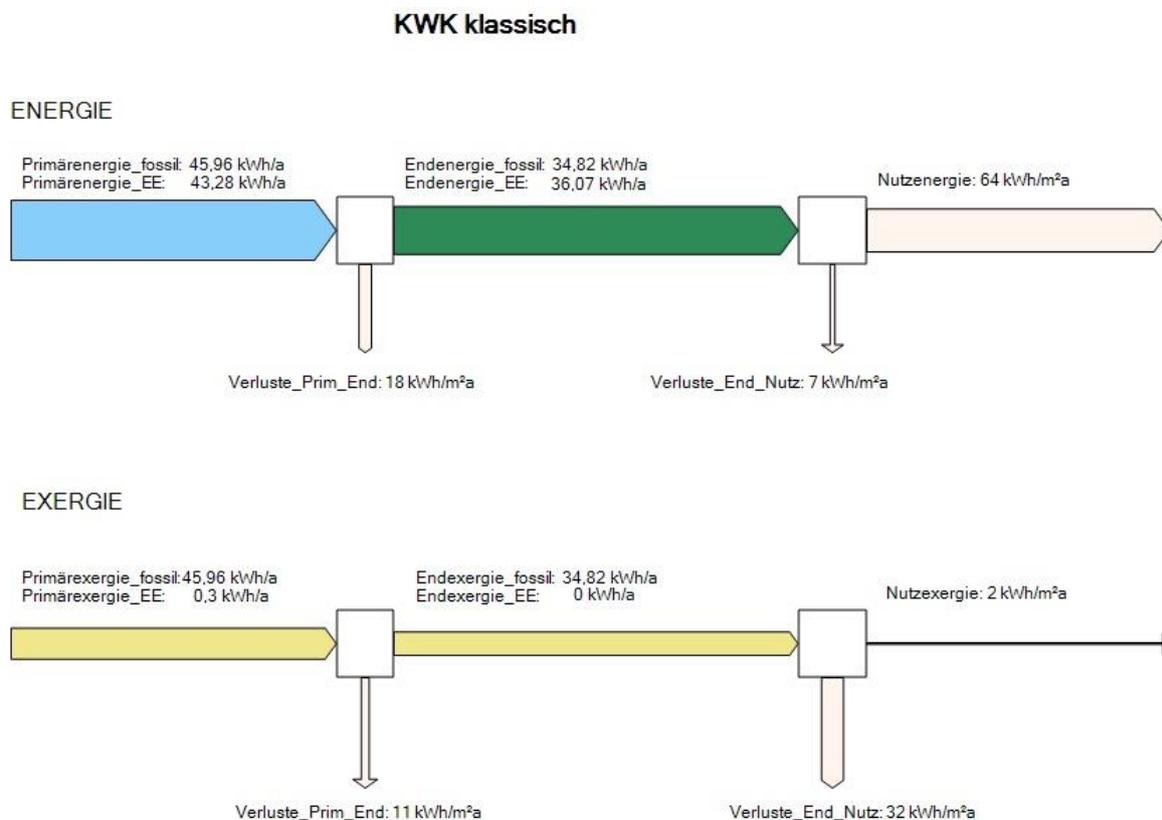
Größe	Wert	Einheit
Elektrischer Nutzungsgrad des Heizkraftwerks	37%	
Thermischer Nutzungsgrad des Heizkraftwerks	55%	
Primärenergiefaktor fossiler Brennstoffe	1,1	
Raumtemperatur	20	°C
Referenztemperatur	9	°C
Vorlauftemperatur im Fernwärmenetz	130	°C
Rücklauftemperatur im Fernwärmenetz	90	°C
Wärmeverluste bis zur Endenergie	20%	
Effizienz der Übergabestation	98%	

Bei der Fernwärme ist der gesamte Primärenergieeinsatz höher (89 kWh/m²a) als beim Erdgas-Brennwertkessel (76 kWh/m²a). Allerdings wird ein Teil dieser Energie aus Abwärme bei Umwelttemperatur gestellt. Damit ist der gesamte Exergieeinsatz für die Wärmeversorgung mit 46 kWh/m²a wesentlich geringer als beim Gaskessel (76 kWh/m²a) und bei allen anderen in diesem Abschnitt untersuchten Technologien. D.h. es werden nur 46 kWh/m²a Brennstoff der Wärme zugeordnet. Der dem Strom zugeordnete Brennstoff entspricht einem „Primärenergiefaktor“ des KWK-Stromes von 2,17. Was wesentlich geringer ist als der Primärenergiefaktor für den Strommix (2,7).

Diese Werte kommen trotz relativ hoher Wärmeverluste durch Netze und Speicher von 20% zustande und zeigen, dass Fernwärme aus Kraft-Wärme-Kopplung bereits in ihrer alten, konventionellen Form einen wichtigen Beitrag zur Senkung des Primärenergieeinsatzes leisten kann. Wird Kraft-Wärme-Kopplung mit niedrigeren Temperaturen betrieben oder höheren elektrischen Wirkungsgraden, lässt sich der Primärenergie-Einsatz für die Wärmeerzeugung weiter absenken.

Es ist jedoch zu beachten, dass diese Ergebnisse ohne Berücksichtigung von Hilfsstrom und Einsatz von Spitzenlastkesseln erzielt wurden. Beide Elemente können den Vorteil, der sich durch die Fernwärme ergibt, wesentlich reduzieren.

Abbildung 14: Sankey-Diagramm eines alten KWK-Fernwärmesystems ohne Hilfsstrom und Spitzenlastkessel.



5.8 Exergie-Ausnutzung als Bewertungskriterium für Wärmeversorgungssysteme

In einem nächsten Schritt sollen die oben beschriebenen Einzelanlagen¹⁸ hinsichtlich Ihrer Exergie-Effizienz miteinander verglichen werden. Eine besondere Herausforderung stellt dabei die Einbeziehung der erneuerbaren Energien dar. Für die Beschreibung der Exergie-Effizienz, hier im Text weiter beschrieben unter dem Begriff Exergie-Ausnutzung, werden der Gas-Brennwertkessel und der Gas-Brennwertkessel mit 40% solarer Unterstützung mittels Vakuumröhrenkollektoren beispielhaft miteinander verglichen, um die Zusammenhänge zu verdeutlichen.

Die Exergie-Ausnutzung ist ein Maß für die Exergie-Effizienz eines gesamten Prozesses, von der Primärenergie-Bereitstellung bis hin zur Nutzexergie, und wird wie folgt berechnet:

$$\text{Exergie – Ausnutzung} = \frac{EX_{in,Nutzenergie}}{EX_{in,Primärenergie}}$$

$EX_{in,Nutzenergie}$ ist die erforderliche Exergie, die benötigt wird, um den Raum auf eine Temperatur von 20 °C zu erwärmen und $EX_{in,Primärenergie}$ ist die Primärenergie¹⁹, die aufgewendet werden muss, um das Gebäude zu versorgen. Die Exergie-Ausnutzung beinhaltet somit alle Verluste in den Einzelkomponenten von der Primärenergie-Umwandlung bis hin zur Nutzexergie. Dabei spielt insbesondere die Effizienz der Einzelkomponenten sowie die Art der Wärmeerzeugung und ggf. deren Temperaturniveau eine Rolle.

Die Annahmen für das Gebäude und dessen Anlagentechnik (siehe Kap. 3.3) sind für die folgende energetische und exergetische Bewertung des Gas-Brennwertkessels gleich. Nur die Darstellung der Ergebnisse wurde verändert.

Abbildung 15 zeigt die Energie- und Exergieflüsse durch die einzelnen Versorgungskomponenten von der Primärenergieumwandlung über die Erzeugung, Speicherung, Verteilung, Übergabe bis hin zur Nutzenergie bzw. –exergie im Raum. Diese Diagramme können mit Hilfe des „LowEx“-Berechnungswerkzeugs und einiger Modifikationen²⁰ erzeugt werden. Der Vorteil dieser Art der Darstellung gegenüber dem Sankey-Diagramm ist, dass die einzelnen Verluste in den einzelnen Komponenten abgebildet und damit bewertet werden können. Der Nachteil ist jedoch die hohe Komplexität und damit die schlechtere Zugänglichkeit der Darstellung.

Die dargestellten Energie (blaue durchgezogene Linie)- und Exergieflüsse (rote durchgezogene Linie) beinhalten sowohl die solaren / internen Gewinne (blaue und orange Strichlinie) und die erforderliche Hilfsenergie (hellblaue gestrichelte Linie) für den Betrieb einzelnen Komponenten. Die größten Exergie-Verluste bei der Bewertung des Gas-Brennwertkessels ergeben sich in der Erzeugung. Wie schon in Beispiel 1 in Kap. 5.7.2 beschrieben, entstehen diese hohen Verluste in Folge der Verbrennung von Gas. Gas als Brennstoff hat eine Energiequalität von 100%,

¹⁸ Für die die Berechnungen in diesem Kapitel wurde neben zusätzlich notwendigen Annahmen auch der jeweils benötigte Hilfsstrom mitberücksichtigt. Darüber hinaus wurde der Nutzenergiebedarf mit 60 kWh/m²*a statt 64 kWh/m²*a angesetzt. Daher weichen die Ergebnisse leicht von den im vorherigen Kapitel dargestellten ab. Eine Übersicht der Annahmen für die Berechnungen in diesem Kapitel findet sich in Kapitel 13.

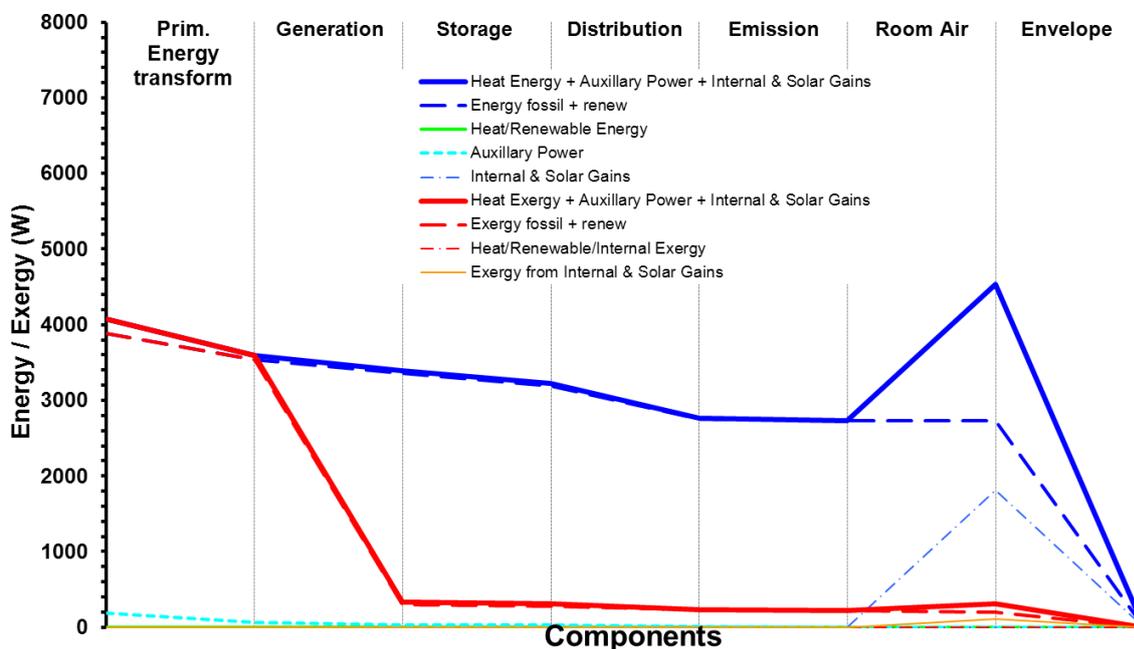
¹⁹ Als Primärenergie wird die mit der Primärenergie verbundene Exergie bezeichnet.

²⁰ Der dort verwendete Qualitätsfaktor wurde durch die Energiequalität ersetzt.

deshalb sind die Werte für die Primärenergie und –exergie in Abbildung 15 gleich. Ebenso wird aus dem Diagramm ersichtlich, dass nur ein sehr geringer Anteil an Exergie für die Temperierung des Raumes erforderlich ist. Daraus ist zu schlussfolgern, dass die Quellen sowie auch die Art der Erzeugung an den Bedarf angepasst werden müssen, um zukünftig hohe Exergie-Verluste zu vermeiden.

Die Verluste in der energetischen Bewertung sind im Vergleich zur exergetischen Bewertung sehr viel geringer, da hier nur die erforderliche Energiemenge bewertet wird und nicht die Qualität der Energie. Damit ist die energetische Bewertung nur abhängig von der Energie-Effizienz der einzelnen Komponenten und erscheint damit günstiger (siehe dick gestrichelte blaue Linie).

Abbildung 15: Exergie- und Energiefluss durch die Komponenten ohne Trinkwassererwärmung am Beispiel des Gas-Brennwertkessels



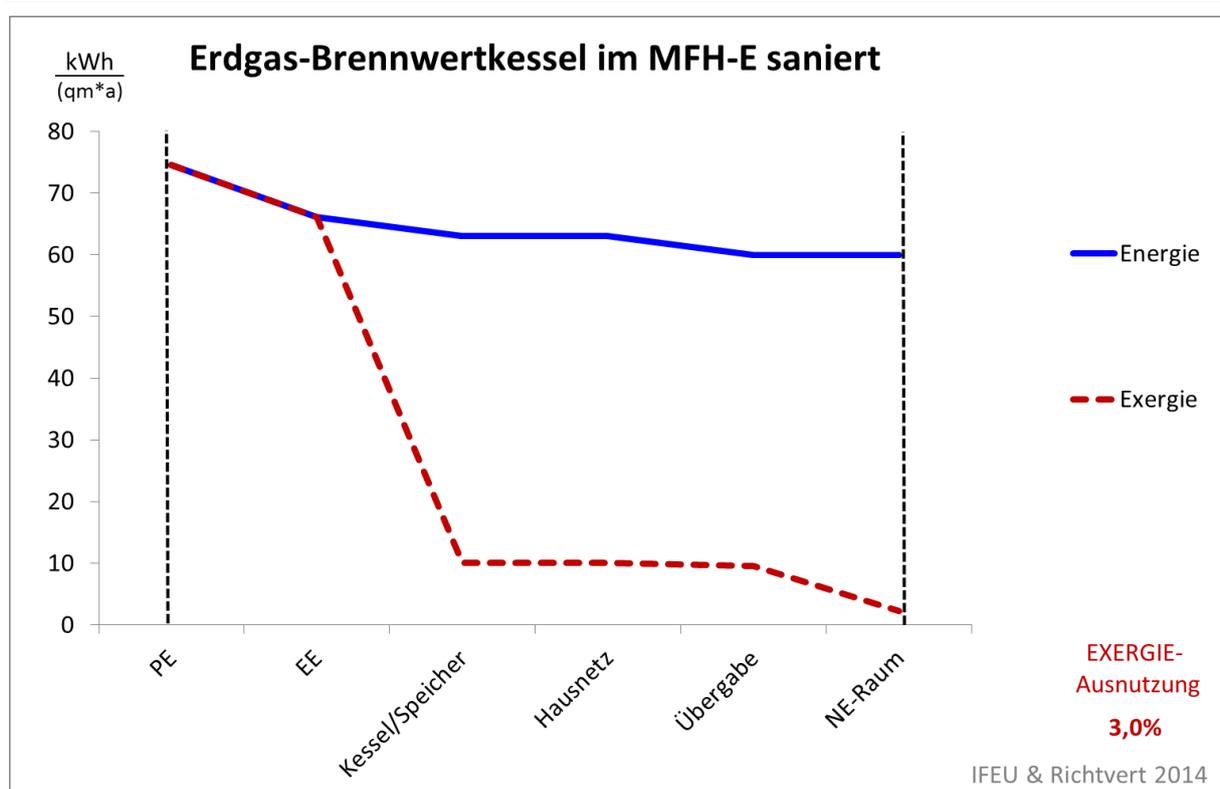
QUELLE: IBP

Für die Bewertung der Exergie-Ausnutzung des Gesamtprozesses wurde die Darstellung in Abbildung 15 zunächst so vereinfacht, dass nur noch die Energie- und Exergieflüsse ohne Trinkwarmwasserbereitung und interne/solare Gewinne abgebildet werden. Mit Hilfe dieser Vereinfachung kann nun der Exergie-Aufwand für die Gesamtanlage leicht und anschaulich ermittelt werden. Dafür wird die Nutzexergie durch die Primärenergie geteilt. Anhand der Ergebnisse ergibt sich damit eine Exergie-Ausnutzung für den Gas-Brennwertkessel von nur 3,0% im Vergleich zu einer Energie-Ausnutzung von 80,5%. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass eine gute energetische Anpassung an den Bedarf nicht gleichbedeutend mit einer guten exergetischen Anpassung ist. Daher sollten möglichst beide Bewertungen parallel durchgeführt werden, um sowohl eine gute quantitative (mengenmäßige) als auch ganzheitliche Anpassung (Menge und Qualität) des Systems zu gewährleisten.

Die Berechnungsmethodik und Art der Darstellung mit dem „LowEx“-Berechnungs-Werkzeug ist für eine übersichtliche Betrachtung weniger geeignet und wurde deshalb im Rahmen des

Projekts überarbeitet und teils vereinfacht. Ziel war es, zu einer übersichtlichen, intuitiven Darstellungsform zu finden, die geeignet ist, im kommunalen Kontext angenommen zu werden. In einem ersten Schritt wurden deshalb die verschiedenen Verläufe der Energie und Exergie zu jeweils einer Verlaufslinie zusammengefasst. Als nächstes wurde auf die Betrachtung der Heizenergie fokussiert. Außerdem wurde die Darstellung so vereinfacht, dass die wichtigen Zusammenhänge auch solchen Akteuren rasch zu vermitteln sind, die nicht aus dem Exergie-Forschungsfeld entstammen, sondern zum Beispiel Entscheidungen auf kommunaler Ebene tragen sind. Der erste Vereinfachungsschritt ist in Abbildung 16 zu sehen. Hierbei ist die Trinkwassererwärmung nicht berücksichtigt. Die Exergie-Ausnutzung ist leicht zu erkennen. Die Übersicht zu Primärenergie und Primärenergie ist aber noch erläuterungsbedürftig und Hinweise auf CO₂-Emissionen fehlen gänzlich, wobei dieser Aspekt insbesondere bei der Nutzung erneuerbarer Energien wichtig ist.

Abbildung 16: Vereinfachte Darstellung der Exergie- und Energiefluss durch die Komponenten ohne Trinkwassererwärmung am Beispiel des Gas-Brennwertkessels mit Angabe der Exergie-Ausnutzung.



Dies wird an einem weiteren Beispiel deutlich: Um die Qualität der Quelle besser an den Bedarf des Gebäudes anzupassen, wurden in einem zweiten Beispiel 40% der Erzeugung durch Solarenergie ersetzt. Es wird angenommen, dass die Solarenergie mit Solarvakuumröhrenkollektoren erzeugt wird. In der komplexen Darstellung in Abbildung 17 ist anhand der Verläufe zu erkennen, dass der Primärenergie-Bedarf stark sinkt, wohingegen der Primärenergie-Bedarf nahezu gleich bleibt. Weiterhin weisen die blaue Linie (Energie) und die rote Strich-Punkt-Linie (Exergie) den solaren Anteil an der Gesamtversorgung aus. Die Verringerung der Primärenergie ist damit zu begründen, dass gemäß Kapitel 5.2 nicht die Solarenergie sondern die daraus erzeugte Wärme als speicherbare Primärenergie bilanziert wird. Diese hat eine Energiequalität von unter 20% je nach Temperaturniveau. Dadurch geht bei der Versorgung mit Raumwärme

(Energiequalität ca. 4%) wesentlich weniger Exergie verloren. Demzufolge sinken auch die exergetischen Verluste in der Erzeugung stark ab.

Energetisch hingegen macht es keinen Unterschied, ob das Gebäude mit Solarenergie versorgt wird, da die Solarenergie wie auch das Gas mit einem Primärenergiefaktor von ca. 1,0 (Gas = 1,10 und Solarenergie = 1,0) bewertet werden.

Abbildung 17: Exergie- und Energiefluss durch die Komponenten ohne Trinkwassererwärmung am Beispiel des Gas-Brennwertkessels + 40% solare Unterstützung.

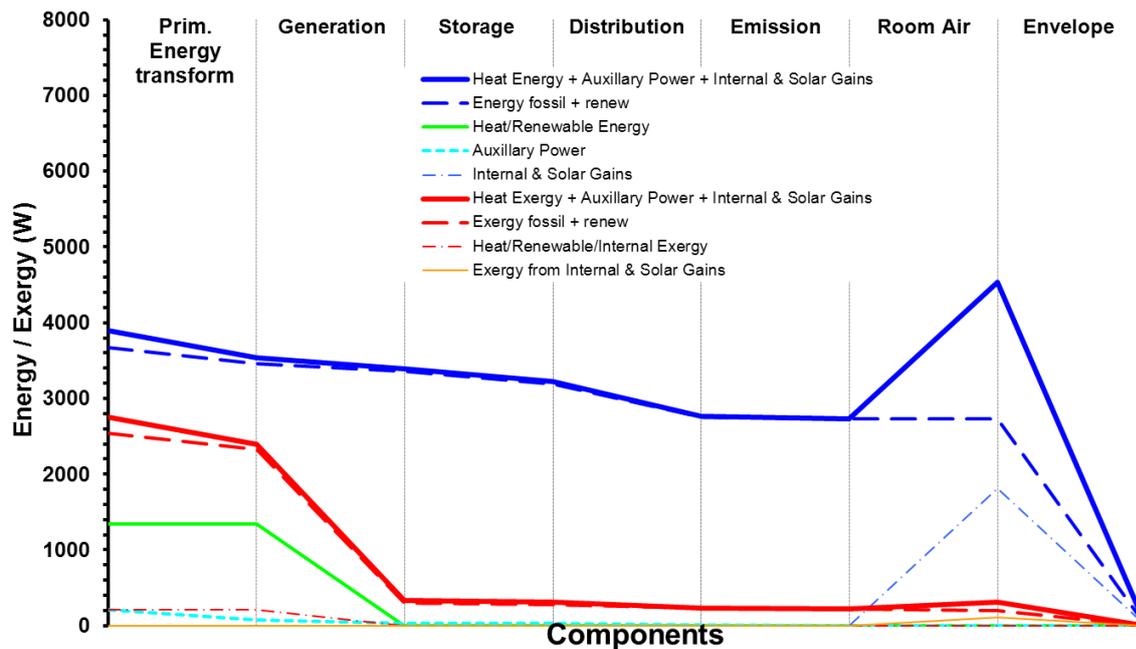
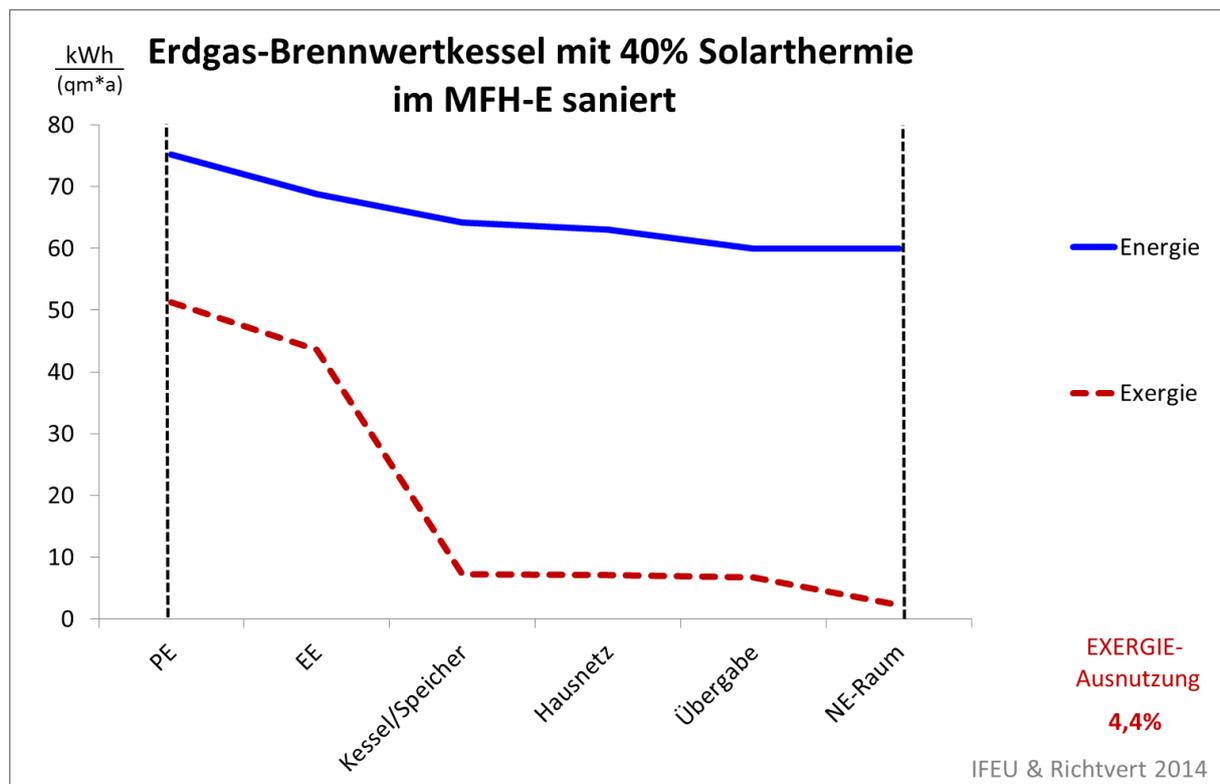


Abbildung 18: Vereinfachte Darstellung der Exergie- und Energiefluss durch die Komponenten ohne Trinkwassererwärmung am Beispiel des Gas-Brennwertkessels + 40% solare Unterstützung mit Angabe der Exergie-Ausnutzung.



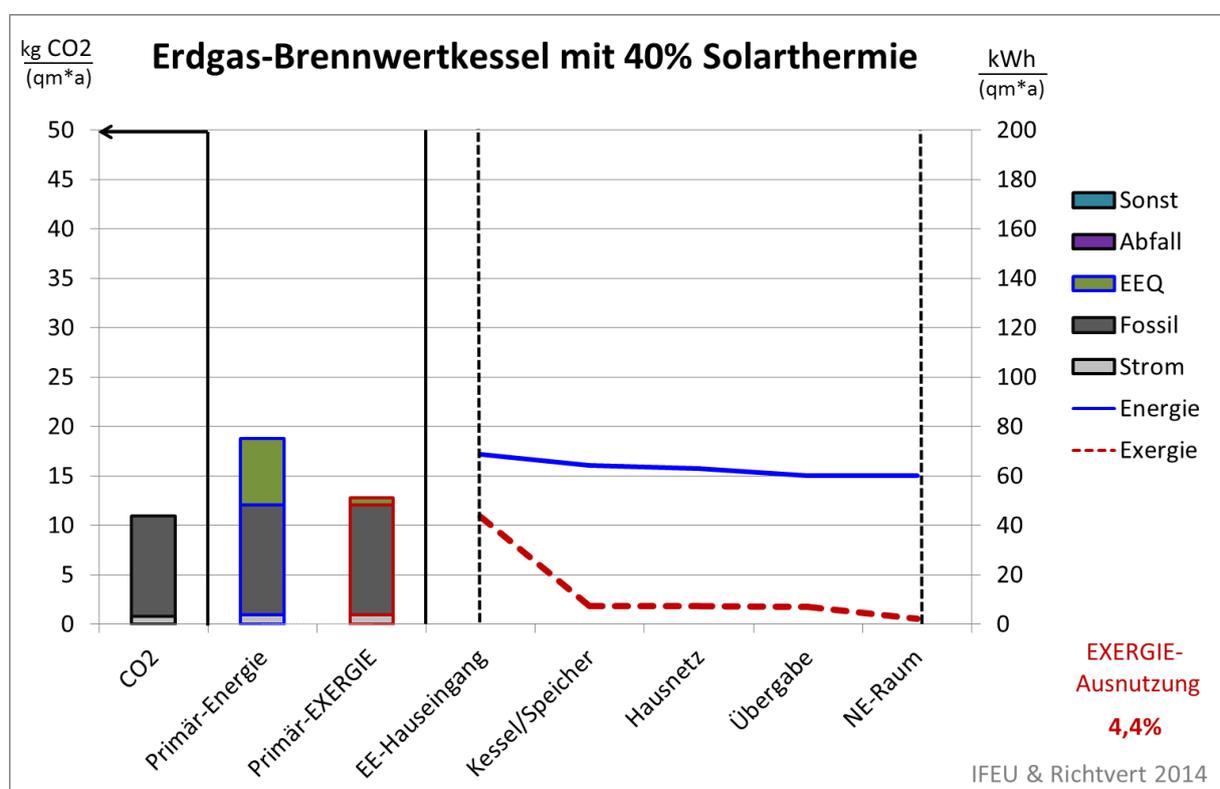
Die bessere Exergie-Bilanz spiegelt sich auch in der Exergie-Ausnutzung wieder, die sich auf 4,4% (d.h. um fast 50% gegenüber dem reinen Erdgas-Brennwertkessel) erhöht, wohingegen die Energie-Ausnutzung mit 79,8% nahezu gleich bleibt. Die erneuerbaren Energien werden bei der Exergie-Ausnutzung nicht separat bewertet.

Anhand der Ergebnisse wird ersichtlich, dass eine optimale Exergie-Ausnutzung nur erreicht werden kann, wenn die Quelle eine Temperatur nahe der erforderlichen Raumlufttemperatur aufweist. Dies kann beispielsweise durch die Nutzung von Abwärme bzw. den Rücklauf eines Fernwärmesystems (Temperatur zwischen 30-60 °C) erreicht werden, wo keine Verbrennungsprozesse oder hochwertige Exergiequellen, wie z.B. Strom oder Gas, für die Erzeugung der Wärme erforderlich sind. Kurz gefasst, umso höher die Exergie-Ausnutzung bei annähernd gleicher Energie-Ausnutzung, desto besser ist die Qualität der Quelle an den Bedarf angepasst.

Um den Unterschied zwischen Primärenergieeinsatz und Exergieinsatz stärker zu verdeutlichen, wurde im nächsten Erweiterungsschritt die Primärenergie und Primärenergie nach der Zusammensetzung an Energieträgern aufgeschlüsselt dargestellt. Außerdem wurde noch ein Balken mit den entstehenden CO₂-Emissionen hinzugefügt, ebenfalls aufgeteilt nach den verursachenden Energieträgern.

Diese Darstellung wurde auch für die Betrachtung der weiteren Versorgungssysteme verwendet.

Abbildung 19: Darstellung des Exergie-Ausnutzungsgrades der Einzelsysteme, wie sie im Verlauf des Projekts entwickelt wurde am Beispiel eines Gas-Brennwertkessels mit Solarkollektor



Insgesamt ist anzumerken, dass aufgrund der extrem geringen Energiequalität des Bedarfs von nur knapp 4% (Raumwärme) die Exergie-Ausnutzung stets sehr gering ist. Dies ist ein klarer Indikator, dass in der Wärmeversorgung im Allgemeinen besonders hohe Verluste auftreten, welche erst durch eine Exergiebetrachtung offensichtlich werden. Sollen jedoch die Systeme miteinander verglichen werden, ist es wichtig sich vor Augen zu führen, dass es um die Veränderung der eingesetzten Primärenergie geht. Diese lässt sich bei gleichem Exergiebedarf auch über die Veränderung der Exergie-Ausnutzung berechnen. So führt eine Exergieausnutzung von 4% zu einem halb so hohen Primärenergie-Verbrauch für die gleiche Wärmeversorgungsaufgabe wie eine Exergie-Ausnutzung von 2%. Dieses Prinzip macht sich der Exergieausweis (siehe Kapitel 6.3) zunutze, welcher als zentrales Bewertungskriterium die Verbesserung des Primärenergie-Verbrauchs gegenüber einer frei wählbaren Referenztechnologie in den Mittelpunkt stellt.

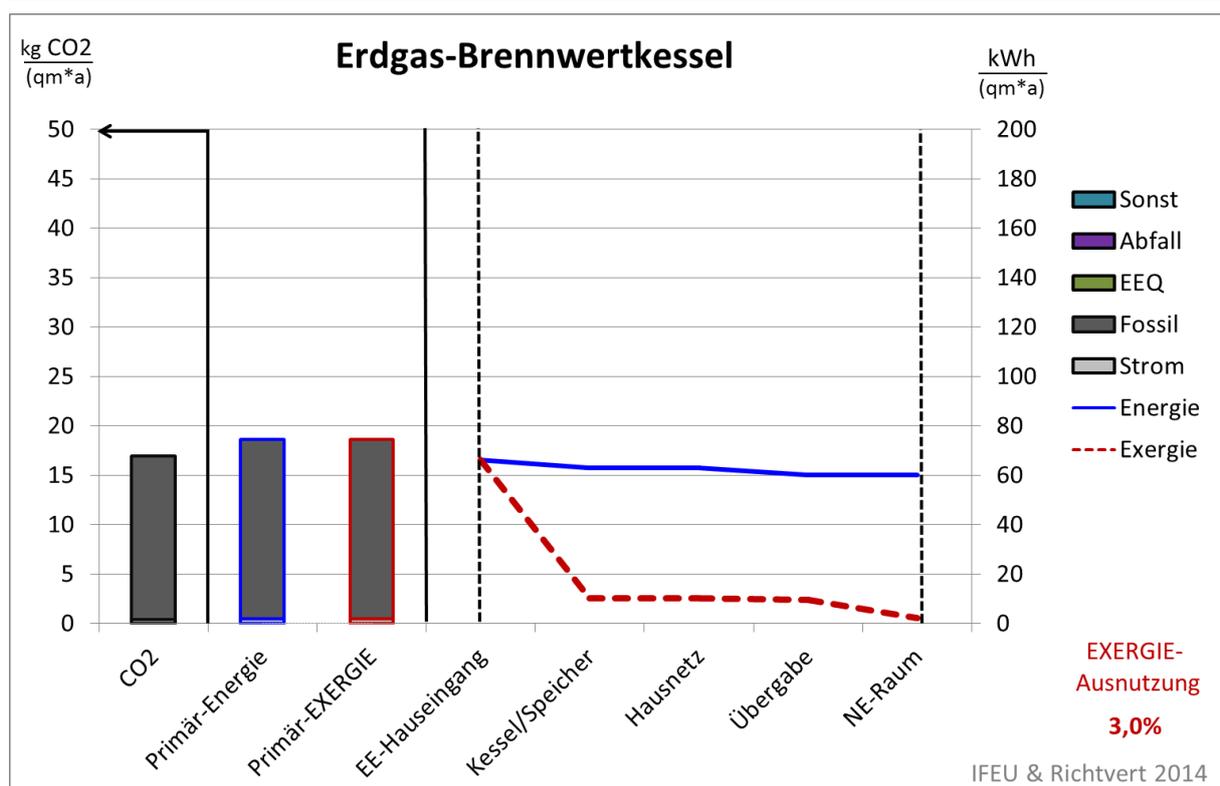
Für die folgenden Betrachtungen soll daher anhand des Untersuchungsfeldes eine Exergie-Ausnutzung von unter **3,0 (Erdgas-Brennwertkessel) als schlecht** und eine Exergie-Ausnutzung von **12,0 oder darüber als extrem gut** (75% Primärenergie-Einsparung) gelten.

5.8.1 Erdgas-Brennwertkessel

Mit einer Exergie-Ausnutzung von 3,0% setzt der Erdgas-Brennwertkessel den modernen Standard. Die spezifischen CO₂-Emissionen von ca. 17 kg/(m²a) liegen aber, trotz guten Wärmedämmstandard, noch über der Zielmarke von 10 kg/(m²a) (IFEU/IWU 2005)²¹.

Eine vollständige Übersicht über die hier verwendeten Annahmen findet sich im Anhang (Kapitel 13.1.1).

Abbildung 20: Vereinfachte Darstellung der Energie- und Exergieflüsse von Wärme aus einem Erdgas-Brennwertkessel mit Angabe der Exergie-Ausnutzung



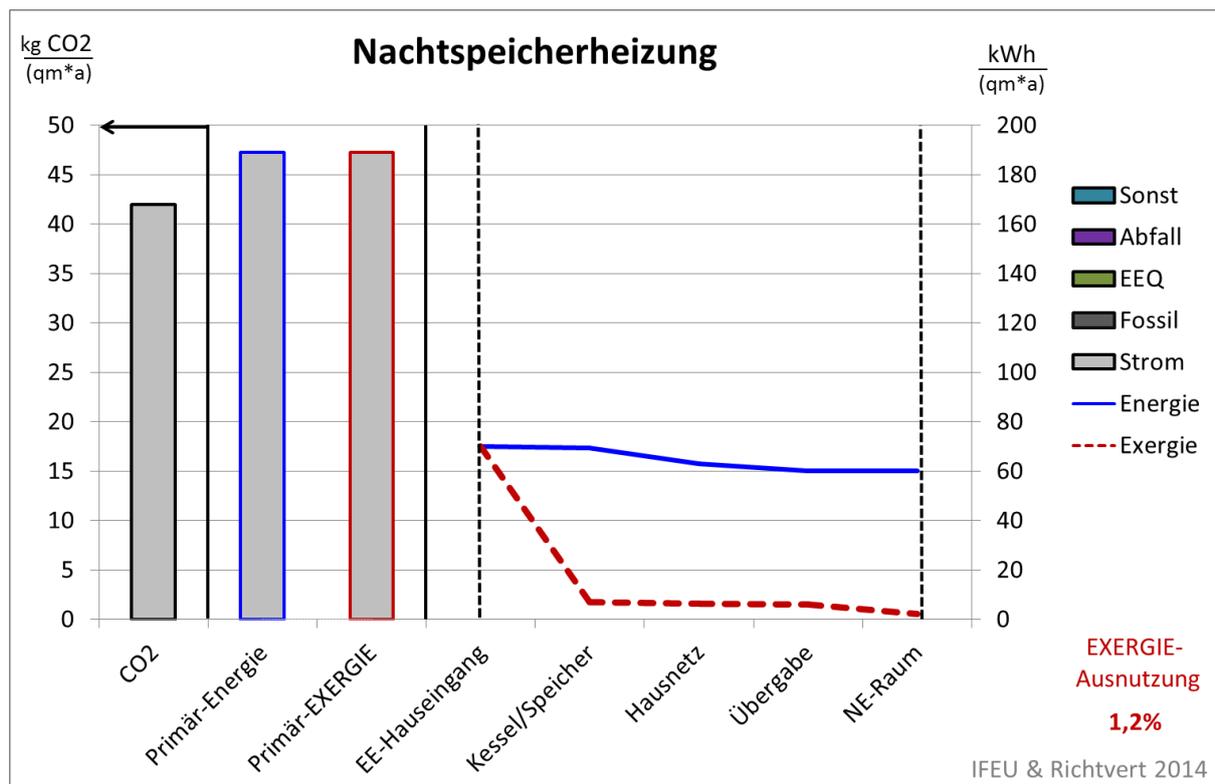
²¹ Dieser Wert ergibt sich bei einem langfristigen CO₂-Minderungsziel über den Gebäudebestand von 80% bis 2050. Da der Gebäudesektor aber andere Bereiche mit geringeren Minderungsmargen kompensieren muss, ist ein niedrigerer Wert zu empfehlen.

5.8.2 Strom-Nachtspeicherheizung

Die Exergie-Ausnutzung von elektrischen Nachtspeicherheizungen ist mit 1,2% denkbar schlecht. Das liegt insbesondere an den hohen Energieverlusten im Kraftwerk und der direkten Umsetzung hochwertigen und technisch leicht nutzbaren elektrischen Stroms in Wärme. Damit verbunden sind auch die höchsten CO₂-Emissionen aller betrachteten Systeme von knapp 42 kg/(m²a).

Eine vollständige Übersicht über die hier verwendeten Annahmen findet sich in Kapitel 13.1.2.

Abbildung 21: Vereinfachte Darstellung der Energie- und Exergieflüsse von Wärme aus einer Strom-Nachtspeicherheizung mit Angabe der Exergie-Ausnutzung

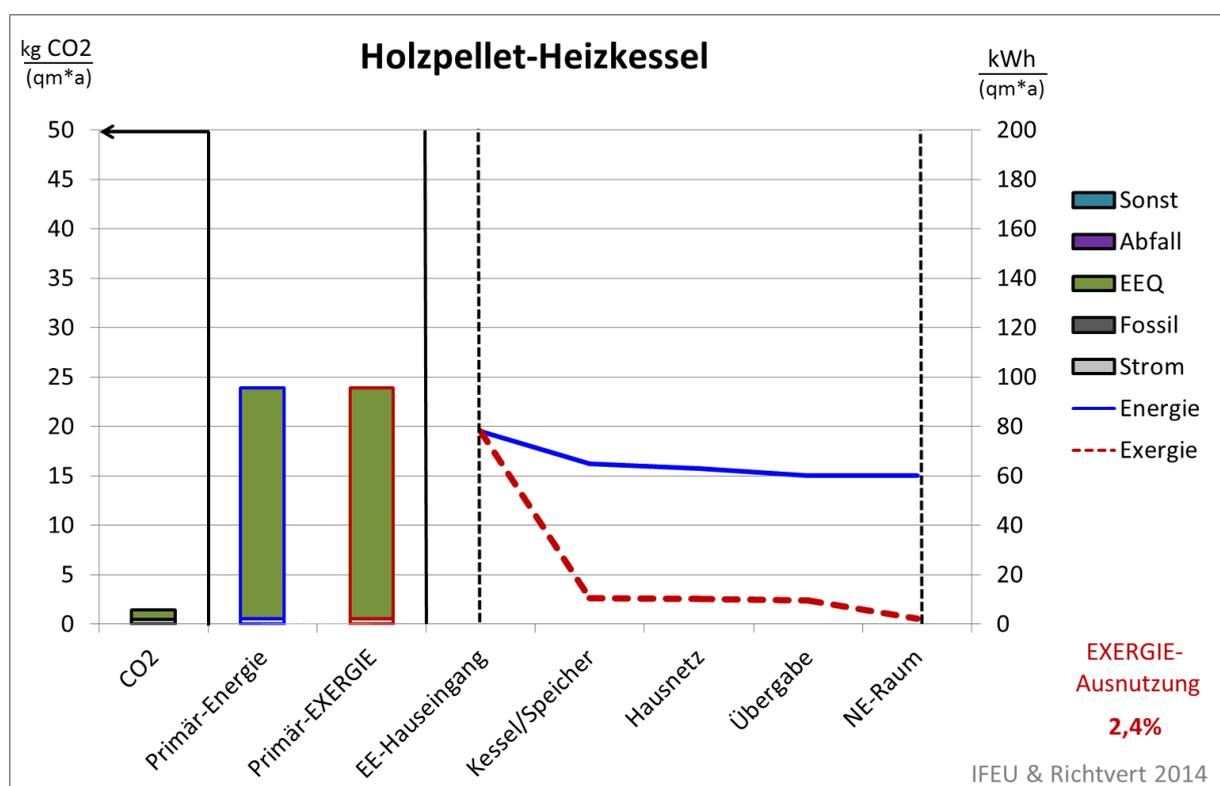


5.8.3 Holzpellet-Heizkessel

Auch der Holzpellet-Heizkessel hat mit 2,4% eine geringe Exergieausnutzung. Sie ist geringer als beim Erdgas-Brennwertkessel, da Holz einen etwas höheren Primärenergiefaktor hat als Erdgas und der Brennstoff nur mit einer geringeren Effizienz verbrannt werden kann. Wie oben erwähnt, enthält der Primärenergiebalken auch den regenerativen Anteil und unterscheidet sich daher erheblich von dem Ansatz in der EnEV mit einem PE-Faktor von 0,2 (EnEV 2009). Aufgrund des erneuerbaren Energieträgers Holz sind jedoch die CO₂-Emissionen mit ca. 2 kg/(m²*a) sehr gering.

Eine vollständige Übersicht über die hier verwendeten Annahmen findet sich im Anhang (Kapitel 13.1.3).

Abbildung 22: Vereinfachte Darstellung der Energie- und Exergieflüsse von Wärme aus einem Holzpellet-Heizkessel mit Angabe der Exergie-Ausnutzung



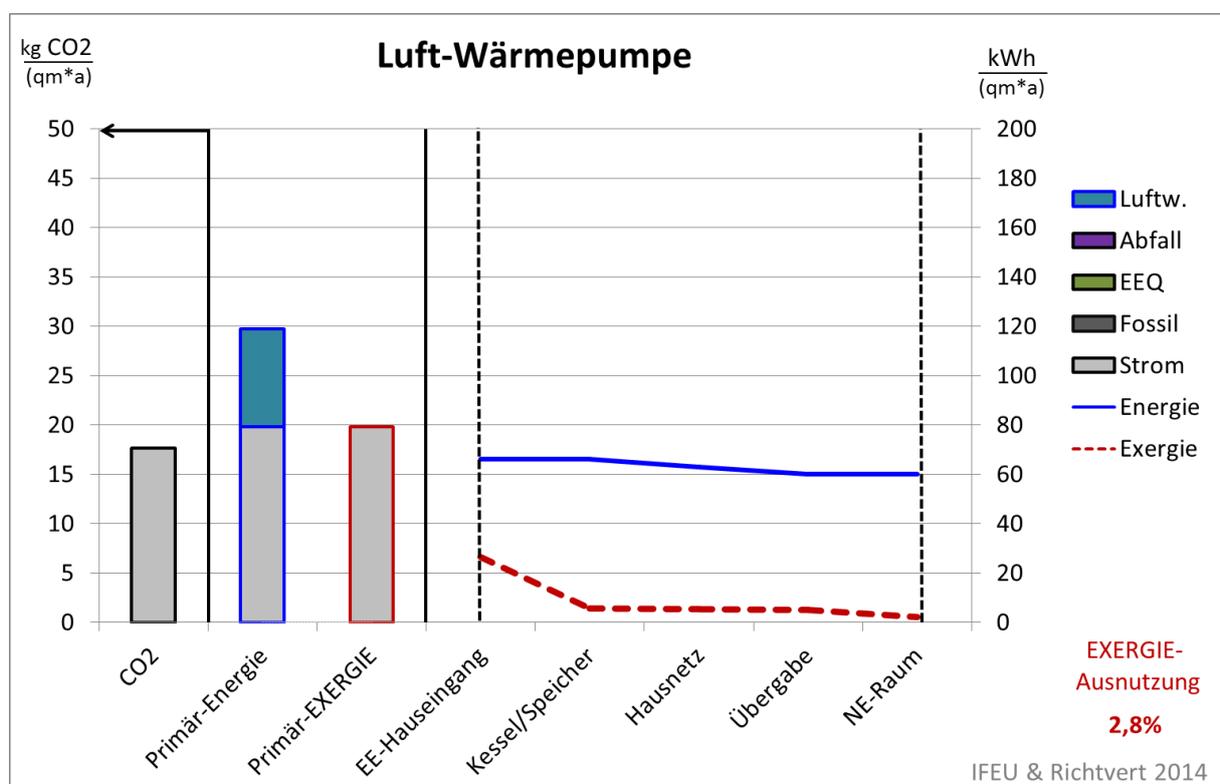
5.8.4 Luft-Wärmepumpe

Die Luft/Wasser-Wärmepumpe hat unter den gemachten Annahmen eine Exergie-Ausnutzung für die Raumwärmeversorgung von nur 2,8%. Der CO₂-Ausstoß liegt mit ca. 17 kg/(m²*a) in etwa so hoch wie beim Erdgas-Brennwertkessel.

Es wird offensichtlich, dass die Umweltwärme aus der Luft zwar energetisch berücksichtigt wird, exergetisch jedoch aufgrund der Energiequalität von 0% nicht ins Gewicht fällt.

Eine vollständige Übersicht über die hier verwendeten Annahmen findet sich in Kapitel 13.1.4.

Abbildung 23: Vereinfachte Darstellung der Energie- und Exergieflüsse von Wärme aus einer elektrischen Luft/Wasser-Wärmepumpe mit Angabe der Exergie-Ausnutzung

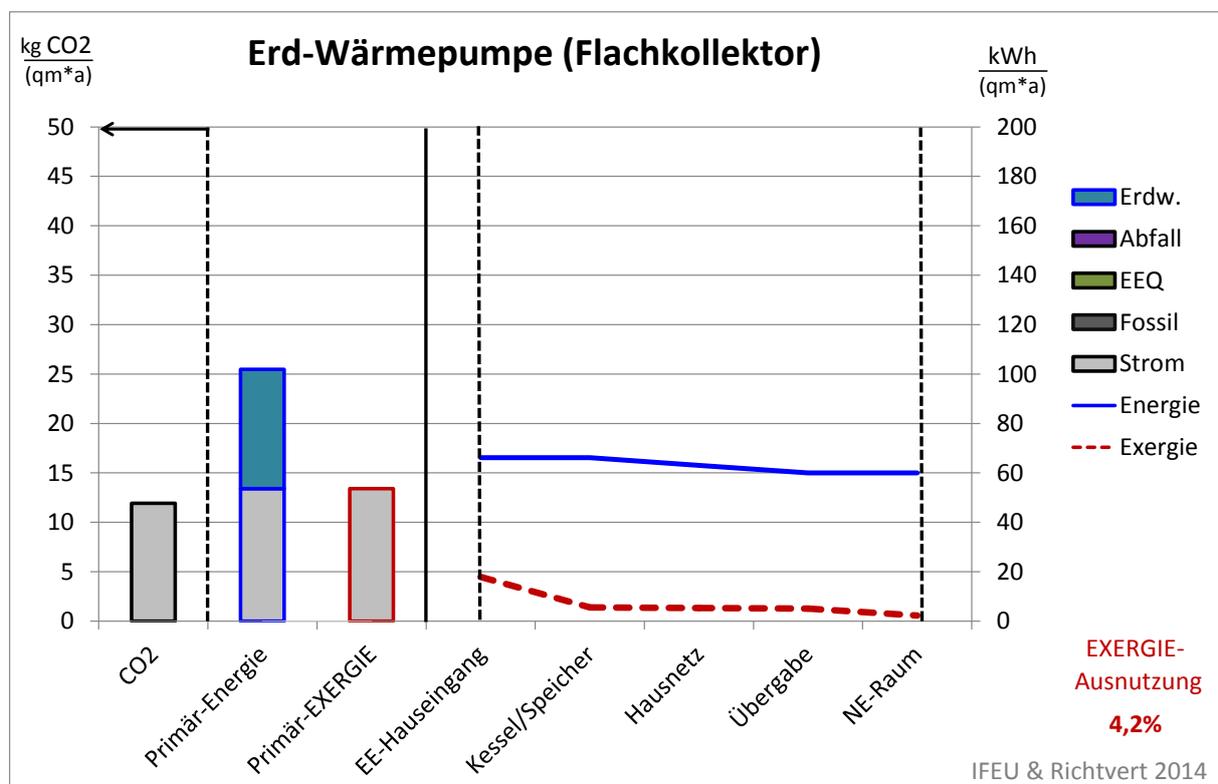


5.8.5 Erd-Wärmepumpe

Im Bereich der Wärmepumpen schneiden die Erdwärmepumpen in der exergetischen Ausnutzung mit 4,2% wesentlich besser ab als Luft/Wasser-Wärmepumpen mit 2,8%. Das liegt an der höheren Jahresarbeitszahl des erdgebundenen Systems, die zu einem geringeren Strombedarf und damit weniger eingesetzter fossiler Primärenergie führt. Auch bei den CO₂ –Emissionen wird für die Erd-Wärmepumpe mit ca. 12 kg/(qm*a) ein wesentlich besserer Wert als bei der Luft-Wärmepumpe erreicht.

Eine vollständige Übersicht über die hier verwendeten Annahmen findet sich in Kapitel 13.1.5.

Abbildung 24: Vereinfachte Darstellung der Energie- und Exergieflüsse von Wärme aus einer elektrischen Erd-Wärmepumpe mit Angabe der Exergie-Ausnutzung



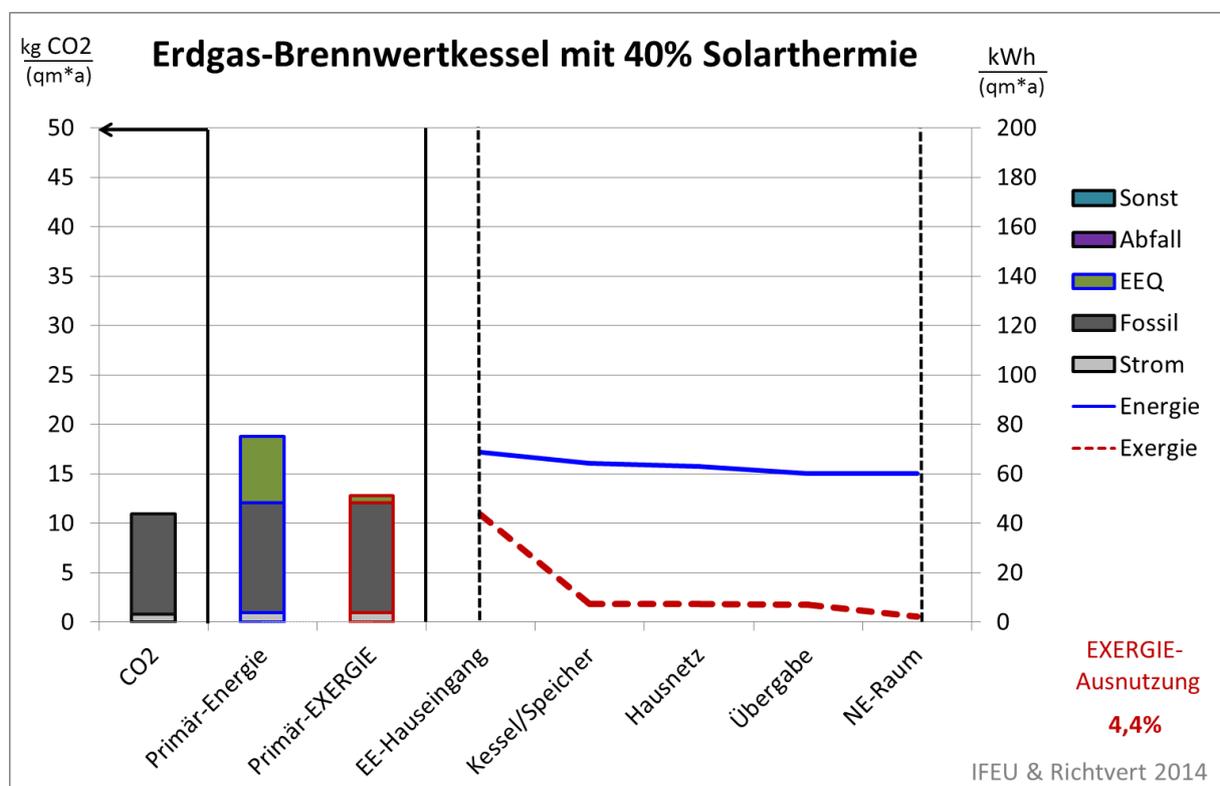
5.8.6 Erdgas-Brennwertkessel mit 40% Solarthermie

Wie bereits in der Einleitung dargestellt, bringt die Einbindung von Solarthermie wesentliche Einsparungen bei Primärenergie und CO₂-Minderungen mit sich. Mit einer Exergie-Ausnutzung von 4,4% zählt dieses System bereits zu den besseren und ist in Punkto Effizienz in etwa den untersuchten Erd-Wärmepumpen gleichgestellt. Mit einem CO₂-Ausstoß von ca. 12 kg/(m²*a) ist dieses System auch in etwa ebenso klimafreundlich wie die untersuchte Erd-Wärmepumpe.

Dieses System ist allerdings aus Vergleichszwecken nur für die Heizung bewertet worden. Würde Trinkwarmwassererzeugung mitbewertet würde sich die Exergie-Ausnutzung ändern.

Eine vollständige Übersicht über die hier verwendeten Annahmen findet sich in Kapitel 13.1.6.

Abbildung 25: Vereinfachte Darstellung der Energie- und Exergieflüsse von Wärme aus einem Erdgas-Brennwertkessel mit 40% solarer Unterstützung mit Angabe der Exergie-Ausnutzung



5.8.7 Fernwärme aus Steinkohle-KWK (Alt | Dampf)

Auch für Fernwärmesysteme kann der Exergie-Ausnutzungsgrad berechnet werden. Die bessere Ausnutzung des Brennstoffs durch die gleichzeitige Erzeugung von Strom und Wärme ergibt üblicherweise eine günstigere Exergieausnutzung als die klassische Zentralheizungsanlage im Gebäude. Allerdings gilt dies insbesondere für moderne Fernwärme in welcher Wärme mit Hilfe von flüssigem Wasser transportiert wird.

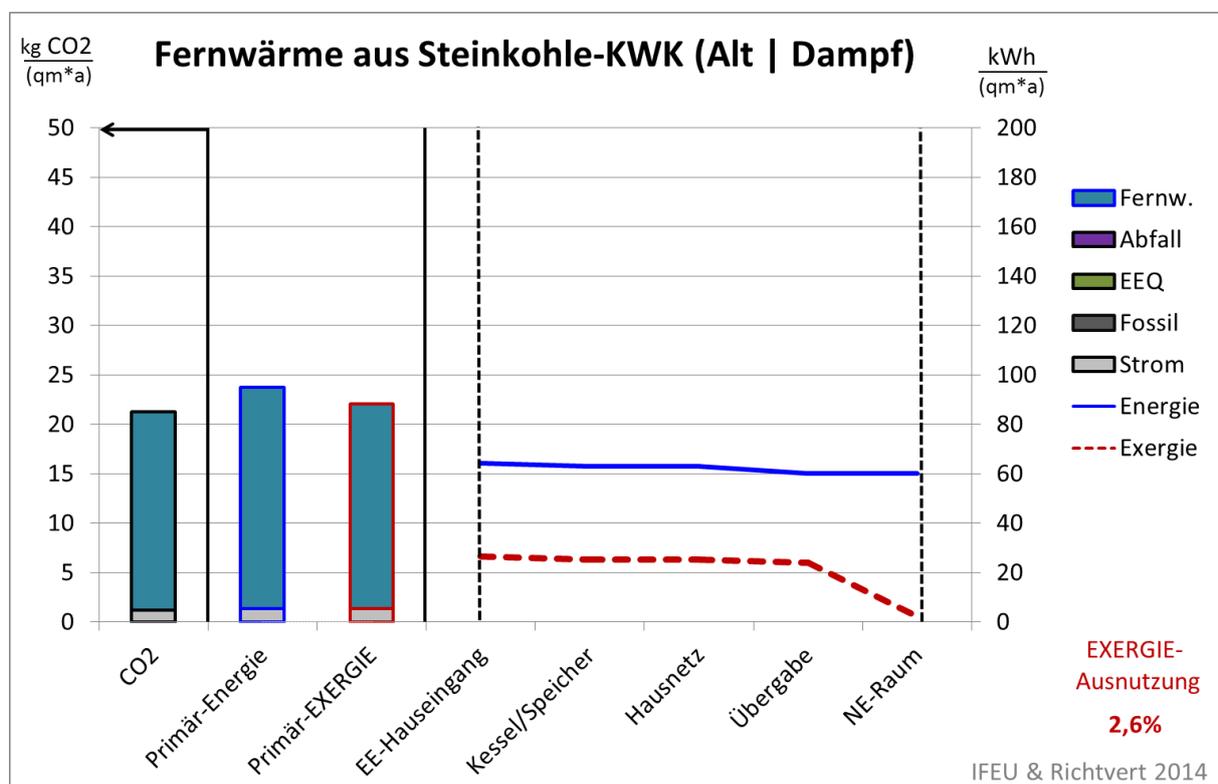
Im Fall von Fernwärme aus einem mit Steinkohle befeuerten Heizkraftwerk ergibt sich jedoch nur eine Exergie-Ausnutzung von 2,6%, wie Abbildung 26 zeigt. Aufgrund des hohen Temperaturniveaus ($T=130^{\circ}\text{C}$) liegt die Primärenergie, die als rechter der drei Balken angegeben ist, für KWK Fernwärme verhältnismäßig hoch. Die CO₂-Emissionen für Wärme in Kilogramm pro Quadratmeter und Jahr ($21,3 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$) sind bei diesem System höher als bei einer Versorgung mit Erdgas-Brennwertkessel ($16,5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$). Dies ist auf die Verwendung von Steinkohle und die geringe Exergie-Ausnutzung zurückzuführen.

Inzwischen sind solche Systeme kaum noch anzutreffen, höchstens im industriellen Bereich, wo dann auch eine höhere Nutzttemperatur erforderlich ist. Diese würde bei sonst gleichen Anlagenparametern allerdings zu einer höheren Exergie-Ausnutzung führen.

Eine vollständige Übersicht über die hier verwendeten Annahmen findet sich in Kapitel 13.1.7.

Bei allen Fernwärmesystemen ist zu beachten, dass die hier gezeigten Primärenergiebalken nicht kompatibel sind mit der PE-Berechnungsmethode der EnEV (BmVBS 2009), die noch auf der Gutschriftenmethode basiert (siehe Kapitel 7).

Abbildung 26: Vereinfachte Darstellung der Energie- und Exergieflüsse für Fernwärme per Dampf aus Steinkohle-KWK mit Angabe der Exergie-Ausnutzung



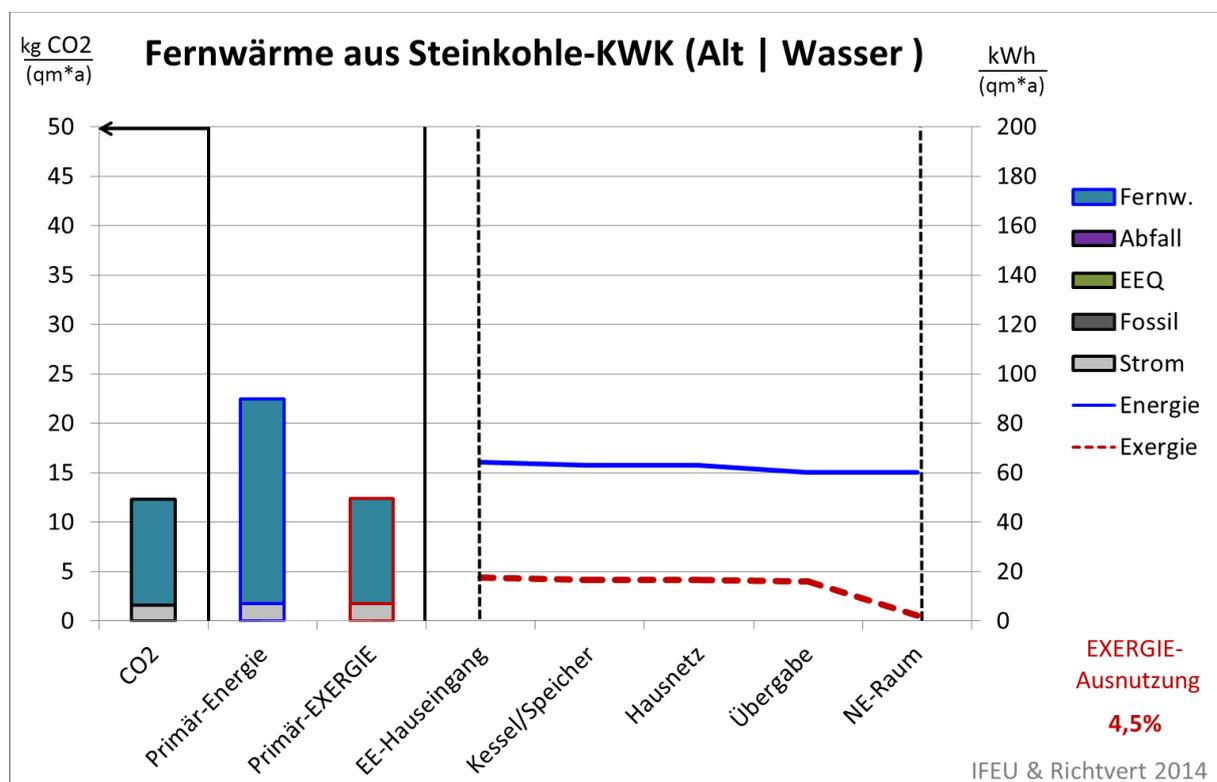
5.8.8 Fernwärme aus Steinkohle-KWK (Alt | Wasser)

Beim klassischen KWK-Fernwärmesystem ($>T=110^{\circ}\text{C}$ Vorlauf) mit Wasser statt Dampf ergibt sich eine gute Exergie-Ausnutzung für die Wärmeversorgung von 4,5%. Dieser Wert ist vergleichbar mit einer Versorgung der Heizung durch einen Brennwertkessel mit 40% Solarthermie-Unterstützung. Die CO₂-Emissionen sind mit knapp 12 kg/(m²*a) trotz Verwendung von Steinkohle niedriger als bei dem Erdgas-Brennwertkessel (16,5 kg/(m²*a)). Einen Überblick gibt Abbildung 27.

Wie bei allen Fernwärmesystemen fällt auf, dass sich die Primärenergie sehr stark von der End-Energie unterscheidet. Dies ist insbesondere auf Wärmeverluste im Fernwärmenetz zurückzuführen die mit 20% angenommen sind.

Bei der Betrachtung dieser Werte ist besonders darauf zu achten, dass diese Werte nur für dieses spezifische System gültig sind. Üblicherweise finden sich in einem Fernwärmenetz mehrere Erzeuger mit unterschiedlichen Brennstoffen und Effizienzen dadurch können sich die dargestellten Werte insbesondere für CO₂ stark verändern. Die Exergie-Ausnutzung, die Primärenergie und Primärenergie hängen vor allem von den Wirkungsgraden und Temperaturen der Erzeuger ab und kaum vom Brennstoff direkt. Insbesondere für Fernwärmesysteme sollte daher stets eine Einzelfallbetrachtung durchgeführt werden. Dabei zeigt das Beispiel der Erdgas-KWK dass Wärme aus Kraft-Wärme-Kopplung allgemein ein sehr hohes Potenzial hat Treibhausgasemissionen einzusparen. Bereits ein konventionelles KWK System könnte bei Vollversorgung etwa 30% Primärenergie Einsparungen und etwa 25% CO₂-Einsparungen im Vergleich zu einem konventionellen Erdgas-Brennwertkessel erzielen.

Abbildung 27: Vereinfachte Darstellung der Energie- und Exergieflüsse für Fernwärme per Wasser aus Steinkohle-KWK mit Angabe der Exergie-Ausnutzung



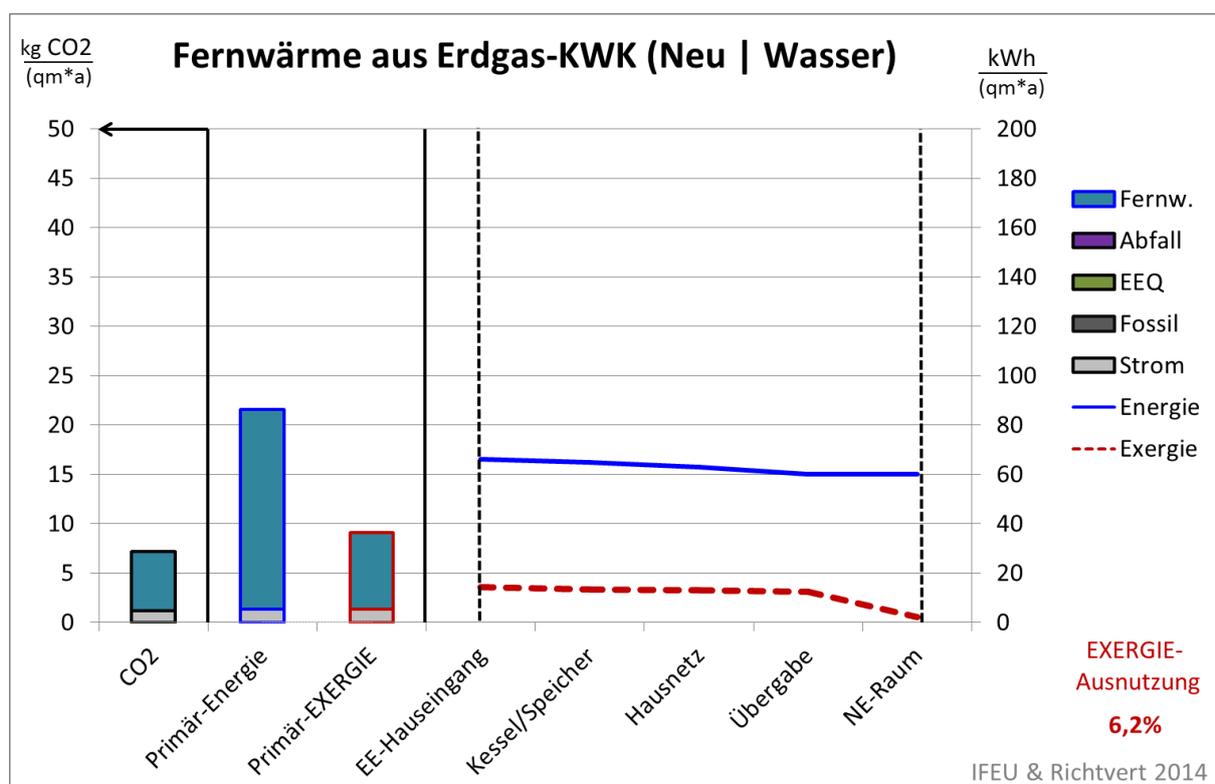
Eine vollständige Übersicht über die hier verwendeten Annahmen findet sich in Kapitel 13.1.8.

5.8.9 Fernwärme aus Erdgas-KWK (Neu | Wasser)

Mit 6,2% ergibt sich eine hohe Exergieausnutzung für Fernwärme aus moderner Erdgas-KWK (siehe Abbildung 28). Ausschlaggebend dafür sind das niedrigere Temperaturniveau von 110°C Vorlauf und 60°C Rücklauf und der hohe elektrische Nutzungsgrad von 50%. Die CO₂-Emissionen sind mit etwas über 7 kg/(m²*a) deutlich niedriger als bei den klassischen Systemen mit 21 bzw. 12 kg/(m²*a).

Eine vollständige Übersicht über die hier verwendeten Annahmen findet sich in Kapitel 13.1.9.

Abbildung 28: Vereinfachte Darstellung der Energie- und Exergieflüsse für Fernwärme aus einer modernen Erdgas-KWK (GUD-Anlage) mit Angabe der Exergie-Ausnutzung



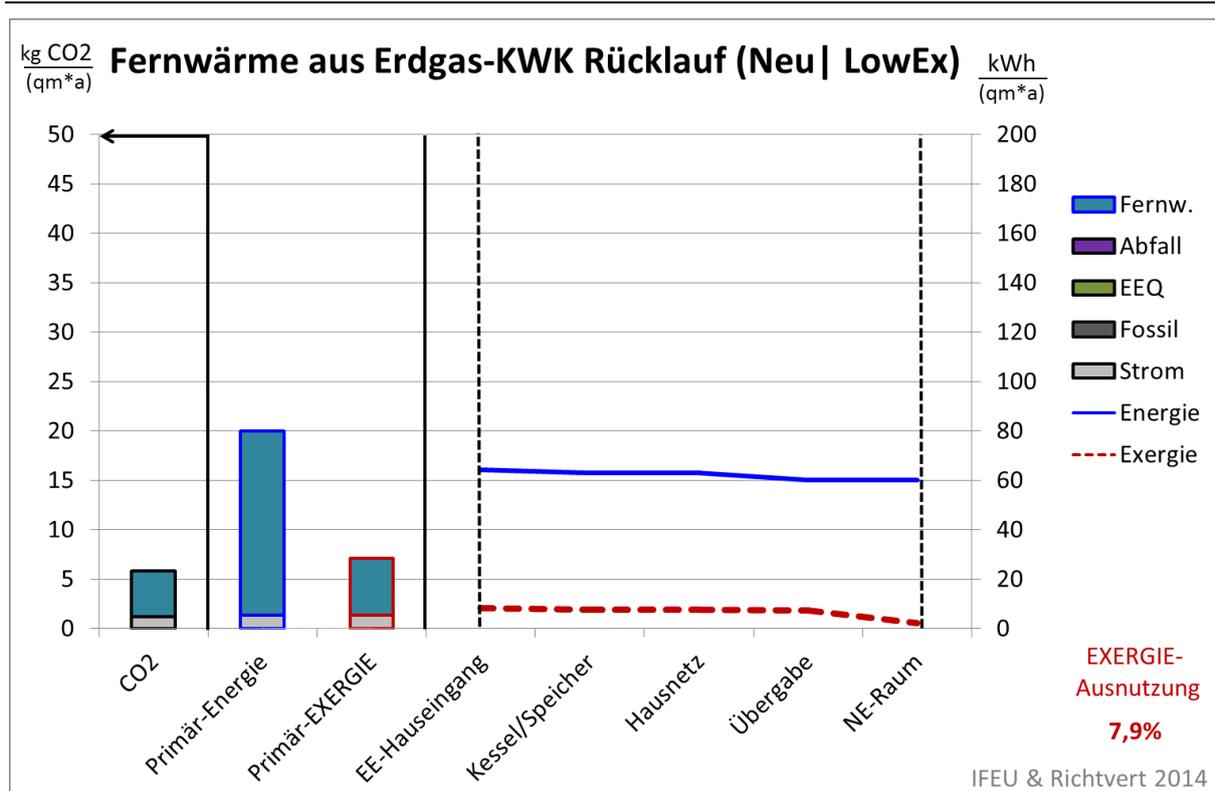
5.8.10 Fernwärme aus dem Rücklauf einer Erdgas-KWK (Neu | LowEx)

Eine Rücklauftemperatur von 60 °C kann noch zur Raumwärmeversorgung genutzt werden. Somit bietet es sich an Gebäude die mit Niedertemperatur-Heizsystemen ausgestattet sind, nach Möglichkeit an den Rücklauf des Fernwärmenetzes anzuschließen. Die Wärme wird dann mit 40°C an das Fernwärmenetz zurückgegeben. Durch die Absenkung der Rücklauftemperatur im Heizkraftwerk lässt sich der elektrische Nutzungsgrad der KWK Anlage weiter steigern. Hier wurde eine Steigerung von 50% auf 51% angenommen. Zusätzlich sinken die Wärmeverluste durch die geringeren Netztemperaturen, was es möglich macht, auch weniger Gebiete geringerer Wärmebedarfsdichte noch wirtschaftlich an das Fernwärmenetz anzuschließen.

Für den Fall der Nutzung von Fernwärme aus dem Rücklauf einer modernen Erdgas-KWK Anlage ergibt sich eine Exergie-Ausnutzung von 7,9%, wie aus Abbildung 29 ersichtlich ist. Die CO₂-Emissionen liegen bei nur noch circa 6 kg/(m²*a).

Eine vollständige Übersicht über die hier verwendeten Annahmen findet sich in Kapitel 13.1.10.

Abbildung 29: Vereinfachte Darstellung der Energie- und Exergieflüsse für Fernwärme aus dem Rücklauf einer modernen Erdgas-KWK (GUD-Anlage) mit Angabe der Exergie-Ausnutzung

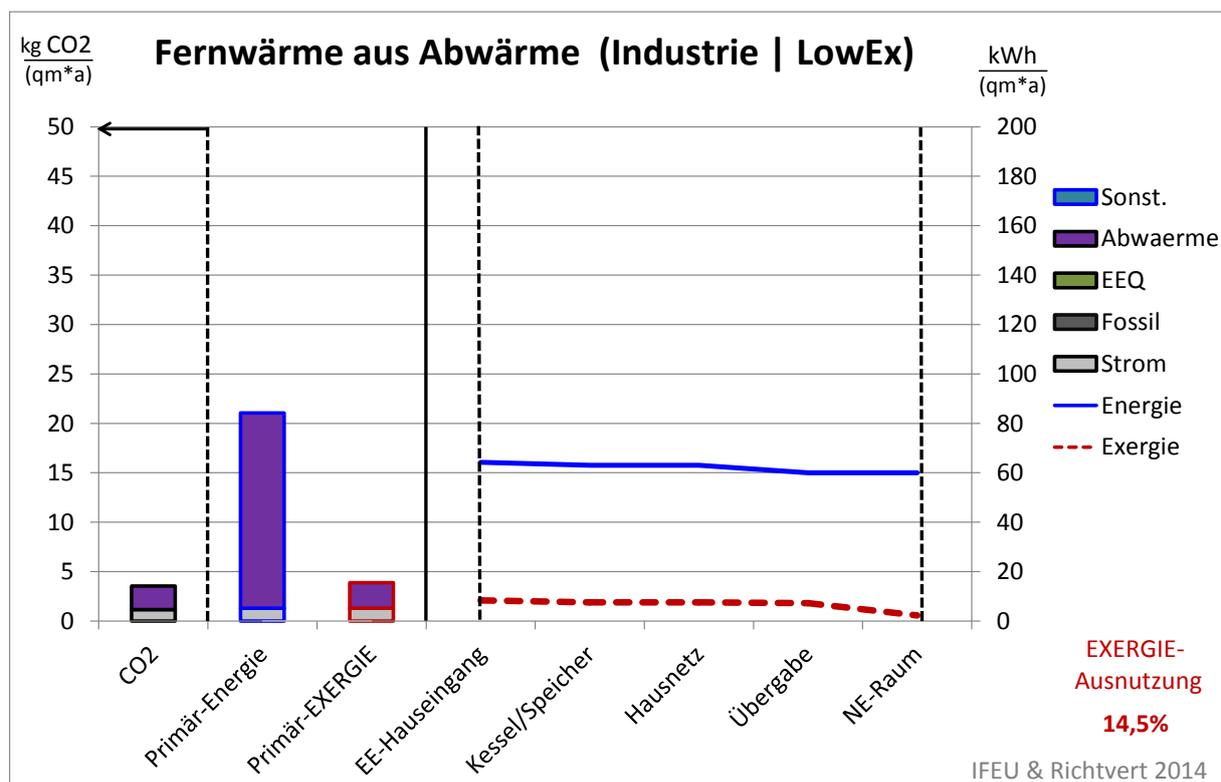


5.8.11 Fernwärme aus Abwärme (Industrie | LowEx)

Abwärme fällt in Industriebetrieben auf verschiedensten Temperaturniveaus an. Für diesen Fall wurde eine Vorlauftemperatur von 60°C angenommen und ein Rücklauf von 40°C. Bei Fernwärmepumpen unter 65°C in Kombination mit exergieeffizienten Erzeugern kann von LowEx-Systemen gesprochen werden.

Für die Nutzung industrieller Abwärme ergibt sich eine Exergie-Ausnutzung von 14,5%, was den besten Wert aller hier untersuchten Wärmeversorgungssysteme darstellt. Das liegt vorrangig an der geringen Energiequalität der Abwärme von nur 12% und zum anderen daran, dass dieser Wärme im Gegensatz zur KWK keine zusätzlichen Verluste aus dem Prozess zugeordnet werden müssen. Denn als Abwärme lässt sich strenggenommen ausschließlich Wärme bezeichnen, welche auf dem vorliegenden Temperaturniveau zum Betrachtungszeitpunkt nicht vermieden werden kann. Daher schneidet Abwärme noch günstiger als Wärme aus KWK-Prozessen ab²².

Abbildung 30: Vereinfachte Darstellung der Energie- und Exergieflüsse für Fernwärme aus Abwärme von Industriebetrieben (LowEx) mit Exergie-Ausnutzung.



Im Rahmen der schematischen Darstellung in Abbildung 30 wurde die Berechnung der CO₂-Emissionen analog zur Primärenergieberechnung durchgeführt. Neben den Emissionen durch den Hilfsstrom werden auch Emissionen für den Abwärmestrom angerechnet.

Eine wesentliche Problematik der Abwärmennutzung ist die unsichere Verfügbarkeit und somit die Notwendigkeit einen Noterzeuger zu installieren, der ggf. die Wärme komplett allein bereit-

²² Es sollte aber sichergestellt sein, dass die Abwärme nicht aus einem KWK-Prozess des Betriebes ausgekoppelt wird, da der Ansatz ansonsten zu optimistisch ist.

stellen kann. Die extrem hohe Exergie-Ausnutzung lässt einen solchen Aufwand jedoch mehr als gerechtfertigt erscheinen. Die Bewertungsergebnisse für ein solches Gesamtsystem unterscheiden sich jedoch je nach Art und Anteil der anderen Wärmeerzeuger mehr oder weniger stark von den hier vorgestellten.

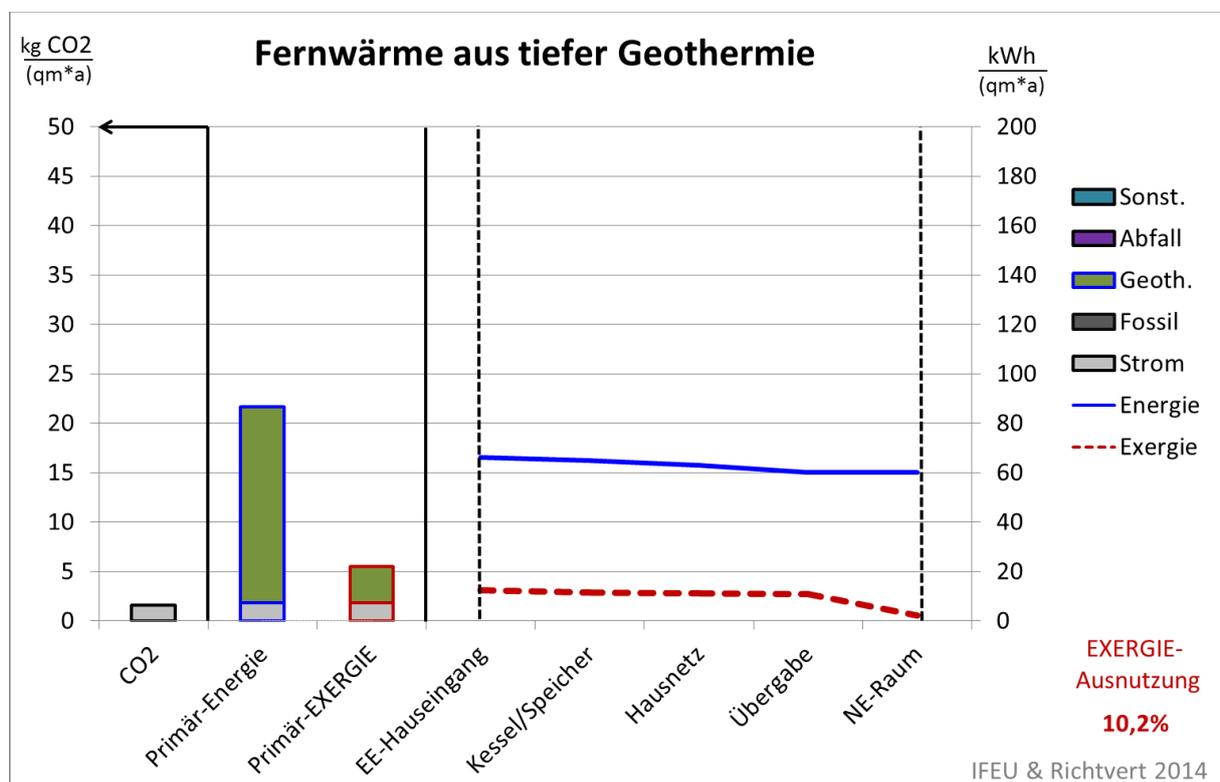
Im Gegensatz zur Betrachtung in diesem Kapitel ist Abwärme aus Sicht der EnEV bzw. der DIN-Normen ein unvermeidbares Abfallprodukt, für das lediglich der zusätzlich benötigte Hilfsstrom angerechnet werden muss. Der Wärmestrom wird „umsonst“ geliefert. Das würde aber bedeuten, dass die Industrieprozesse durch einen Abwärmennutzung nicht entlastet würden. Es wäre es aber sinnvoll, jedem Abwärmestrom auch Emissionslasten zuordnen zu können, da es damit auch zur Entlastung des Betriebes kommt. Insbesondere bei Abwärme mit hohen Temperaturen (z.B. aus Hochofenprozessen) würde die Befreiung der Abwärme von CO₂-Emissionen auch dem exergetischen Prinzip erheblich widersprechen. Hier müssen in Zukunft allerdings noch Konventionen zur widerspruchsfreien und praxisnahen Bewertung von Abwärmeströmen entwickelt werden. Eine vollständige Übersicht über die hier verwendeten Annahmen findet sich in Kapitel 13.1.11.

5.8.12 Fernwärme aus tiefer Geothermie

Fernwärme die durch Wärme aus tiefen Erdschichten (tiefe Geothermie) gespeist wird ($T = 90^{\circ}\text{C}$), hat eine sehr hohe Exergie-Ausnutzung von 10,2%. Da sie zuverlässig verfügbar ist, hat sie trotz der geringeren Exergie-Ausnutzung Vorteile gegenüber der Abwärmennutzung.

Die CO₂-Emissionen entstehen hier ausschließlich durch den verwendeten Hilfsstrom. Eine vollständige Übersicht über die hier verwendeten Annahmen findet sich in Kapitel 13.1.12.

Abbildung 31: Vereinfachte Darstellung der Energie- und Exergieflüsse von Fernwärme aus tiefer Geothermie mit Angabe der Exergie-Ausnutzung



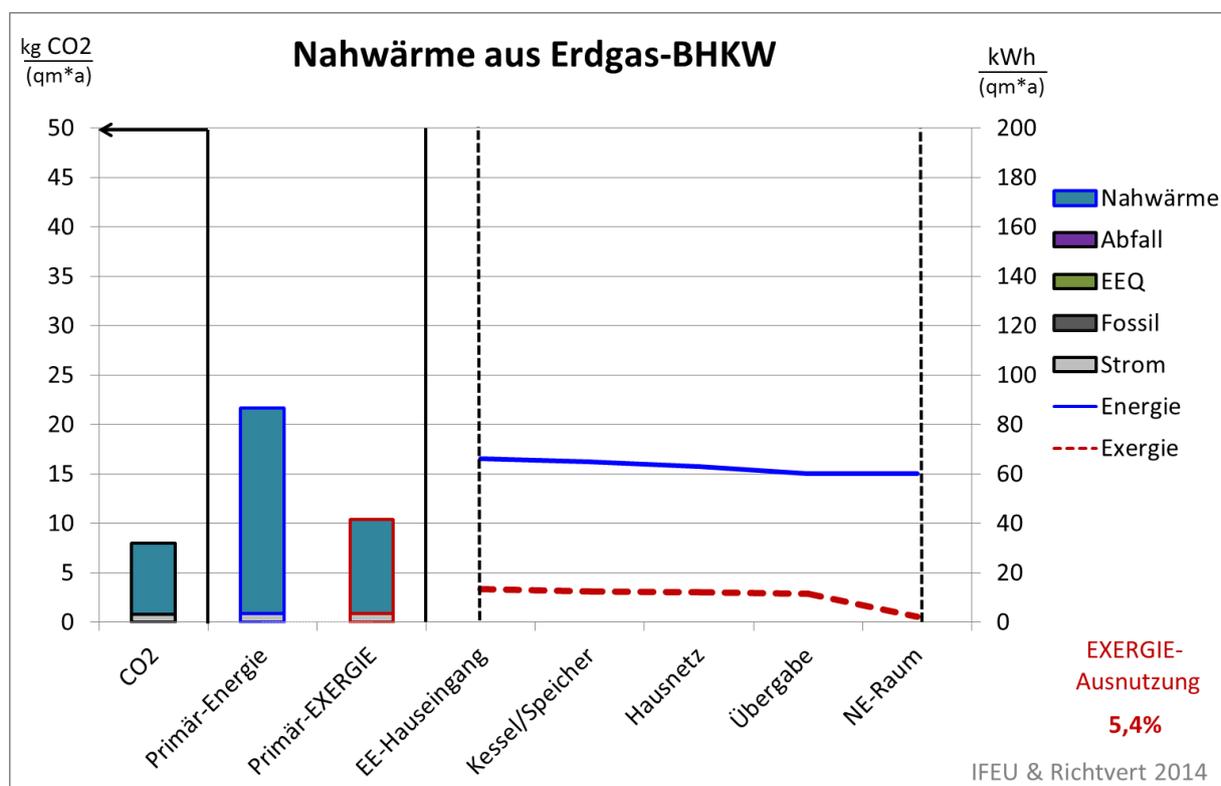
5.8.13 Nahwärme aus Erdgas-BHKW

In diesem Fall wird ein Nahwärmenetz betrachtet, das über ein Erdgas-Blockheizkraftwerk (BHKW) gespeist wird. Die resultierende Exergieausnutzung von 5,4% liegt zwischen dem Wert für Fernwärme auf Steinkohle-KWK und dem für Fernwärme aus moderner Erdgas-KWK. Damit ist Nahwärme aus einem Erdgas-BHKW wesentlich effizienter als die Versorgung mit Hilfe eines Erdgas-Brennwertkessels.

Mit ca. 8 kg/(m²*a) CO₂-Emissionen wird ein vergleichsweise guter Wert erreicht.

Eine vollständige Übersicht über die hier verwendeten Annahmen findet sich in Kapitel 13.1.13).

Abbildung 32: Vereinfachte Darstellung der Energie- und Exergieflüsse für Nahwärme aus einem Erdgas-Blockheizkraftwerk mit Darstellung der Exergie-Ausnutzung



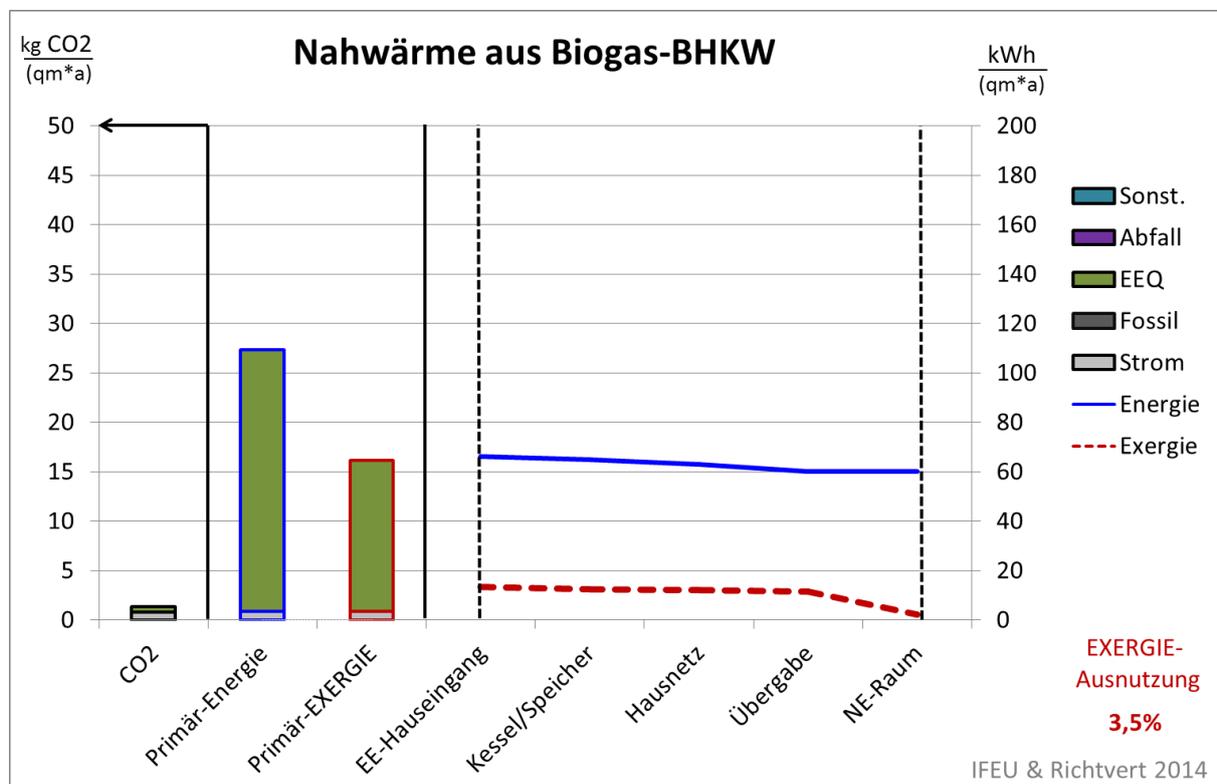
5.8.14 Nahwärme aus Biogas-BHKW

Biogas wird unter Inkaufnahme von Verlusten aus Biomasse erzeugt und kann anschließend in einem Blockheizkraftwerk verbrannt werden. Dabei kann dieses BHKW von den Parametern her einem Erdgas-BHKW entsprechen. Der einzige Unterschied wäre dann der andere Brennstoff, welcher zu geringeren spezifischen CO₂-Emissionen und einem höheren Primärenergiefaktor führt. Das Biogas-BHKW erreicht mit 3,5% nur eine geringfügig höhere Exergieausnutzung als der Gas-Brennwertkessel. Dies liegt vor allem im hohen Primär-Energiefaktor des Brennstoffes Biogas begründet, welcher sich aus den Annahmen in Kapitel 5.2 ergibt. In Hinblick auf die CO₂-Emissionen zählt es unter den gemachten Annahmen mit etwas über 1 kg/(m²*a) CO₂-Emissionen zu den besten Technologien.

Allerdings ist dabei anzumerken, dass die spezifischen CO₂-Emissionen von Biomasse und Biogas wesentlich stärker diskutiert werden, als die von Abwärme und tiefer Geothermie.

Eine vollständige Übersicht über die hier verwendeten Annahmen findet sich im Anhang (Kapitel 13.1.14).

Abbildung 33: Vereinfachte Darstellung der Energie- und Exergieflüsse einer KWK-Nahwärmanlage, die mit Biogas betrieben wird.

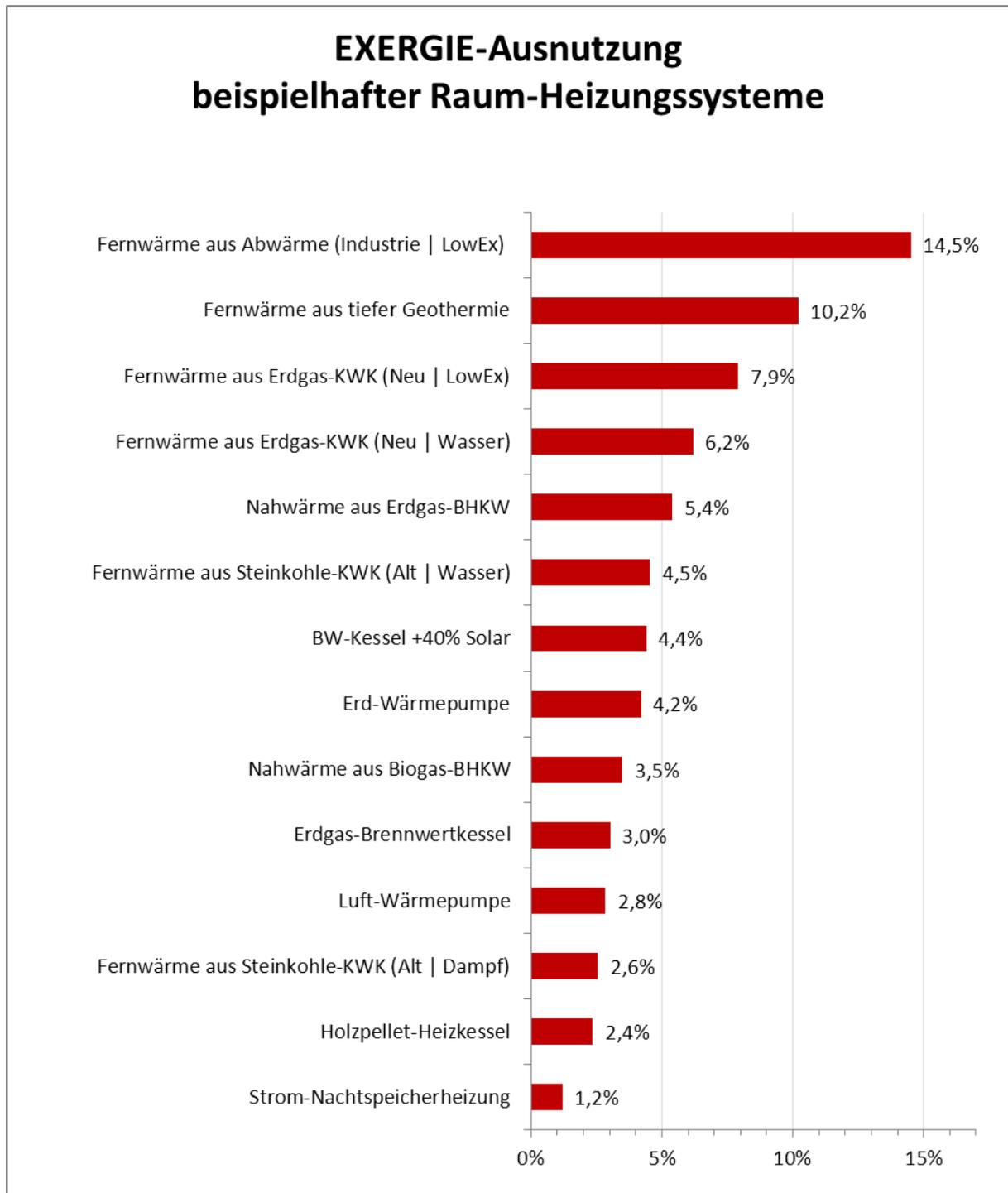


5.8.15 Vergleich von exemplarischen Einzelsystemen gemäß der Exergieausnutzung und den CO₂-Emissionen

Als Hinweis vorweg, soll an dieser Stelle nochmals klar gestellt werden, dass die hier zusammengefassten Werte so ausschließlich für Versorgung mit Raumwärme und auch nur mit den in Kapitel 13 dargestellten Annahmen gültig sind. Die Ergebnisse stellen grobe Richtwerte dar und sind nur auf solche Systeme in etwa übertragbar, welche den dargestellten Annahmen zumindest annähernd entsprechen. Bei komplexen Fernwärmenetzen oder für Vergleich ganz bestimmter Technologien müssen diese im Einzelnen genau betrachtet werden. Die vorgestellten Einzelsystembetrachtungen lassen sich auch auf spezifische Einzelsysteme übertragen. Sollen komplexe Systeme aus mehreren Bedarfen und Erzeugern verglichen werden kann dazu z.B. der in Kapitel 6 vorgestellte Exergieausweis verwendet werden.

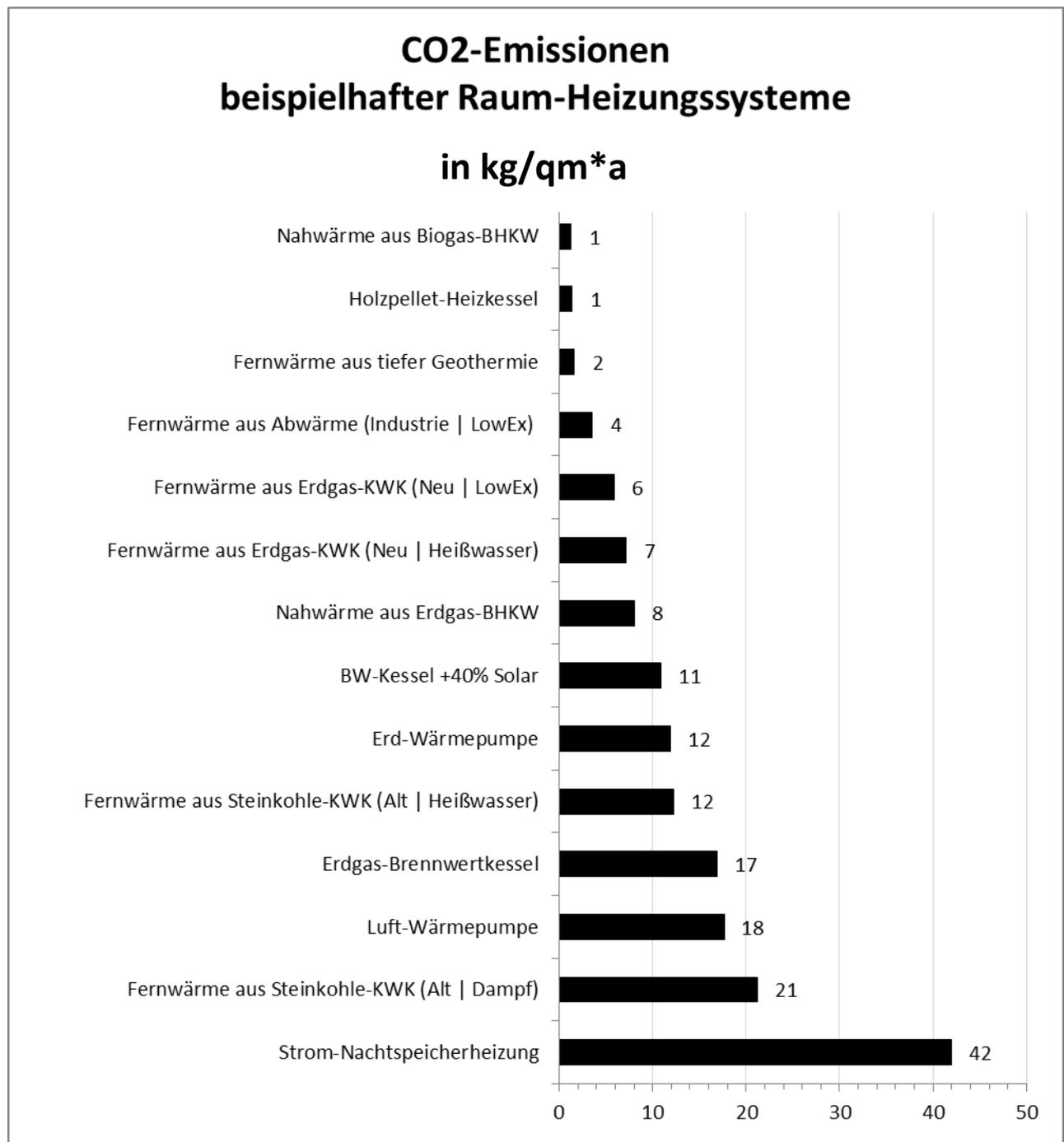
Im Vergleich der unterschiedlichen Versorgungssysteme fällt auf, dass die Hausanlagen bei der Exergieausnutzung generell schlechter abschneiden als Wärmesysteme mit einem Wärmenetz. Liegen erstere im Schnitt bei 3-4% Exergie-Ausnutzung, schaffen es die meisten netzgebundenen Systeme auf Werte größer 6%. Dies gilt auch für Systeme mit erneuerbaren Energieträgern wie Holzpellet-Heizkesseln und Systemen mit Solarthermie. In diesen Fällen sind jedoch die verbundenen CO₂-Emissionen geringer.

Abbildung 34: Vergleich der exergetische Ausnutzung verschiedener Wärmesysteme (Nutzenergie Raumwärme = 60 kWh/(qm*a))



In der folgenden Übersicht nach CO₂-Emissionen wird ersichtlich, dass einige exergetisch wenig effiziente Systeme wie Nahwärme aus Biogas-BHKW und Holzpellet-Heizkessel aufgrund ihres erneuerbaren Brennstoffes gut abschneiden. Für alle auf fossilen Energieträgern basierenden Technologien führt eine Erhöhung der Exergie-Ausnutzung gleichzeitig zu einer Verringerung der CO₂-Emissionen. Zusätzlich ist die Wahl des Brennstoffes ausschlaggebend für den letztendlichen Wert.

Abbildung 35: Vergleich der CO₂-Emissionen verschiedener Wärmesysteme in kg/qm*a (Nutzenergie Raumwärme = 60 kWh/(qm*a)).



6 Analyse kommunaler Bauprojekte mit dem Exergieausweis

6.1 Einleitung

Die in den vorangegangenen Kapiteln dargestellten Herangehensweisen stellen eine Möglichkeit Einzeltechnologien auf Basis der Exergie zu bewerten. Die in Kapitel 5.2 dargestellten Bewertungsgrundlagen wurden dabei im Wesentlichen von der Bewertungsmethodik des Exergieausweises übernommen. Der einzige Unterschied besteht darin, dass die Berechnung des Exergieausweises auf Basis weniger pauschalisierter Daten erfolgt. So wird beispielsweise statt eines Primärenergiefaktors (PEF) der Kumulierte Energie Aufwand (KEA) verwendet. Dadurch werden zusätzliche Verluste berücksichtigt.

Nach der Analyse der Einzelsysteme, stellt sich die Frage wie komplexe Energieversorgungslösungen exergetisch bewertet werden können. Hier bietet der Exergieausweis aus Sicht des Projektkonsortiums eine gute Möglichkeit zur Einführung einer konsistenten Form der Exergie-Analyse in die kommunale Bewertungspraxis. Er kann kommunale Übersichts-Bilanzen dort ergänzen, wo es um die Bewertung von einzelnen Bauprojekten, d.h. Gebäuden oder Gebäudekomplexen inklusive der verwendeten Technologien für Strom, Wärme und Kälte geht.

Der Exergieausweis ist ein Analysewerkzeug zum Vergleich von Technologiealternativen im Hinblick auf die Energieeffizienz, Primärenergie-Ausnutzung und den Primärenergie-Verbrauch auf Basis einer umfassenden Exergie-Gesamtsystemanalyse (Jentsch 2010). Seine Berechnungs- und Darstellungsmethodik wurde 2009 am Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT entwickelt (Jentsch et al. 2009). Seit 2010 wird er durch Richtvert | Energiesystemberatung in der Praxis eingesetzt.

Analysen mit dem Exergieausweis können solide Grundlagen für die Planung und Durchführung von Maßnahmen zum Klimaschutz und zur Erhöhung der Nachhaltigkeit bieten. Im Folgenden wird die Anwendung des Exergieausweises für den kommunalen Klimaschutz exemplarisch vorgestellt.

6.2 Beschreibung des Vorgehens bei der Berechnung

Die Bewertungsgrundlagen für die Berechnung des Exergieausweises sind die Basis für die Bewertung von Einzelsystemen. Sie wurden bereits in Kapitel 5.2 vollständig dargestellt. An dieser Stelle soll daher detailliert nur erläutert werden, wie die einzelnen Größen im Exergieausweis berechnet werden. Diese Berechnungsvorschrift ist im Wesentlichen konsistent mit den Berechnungsvorschriften für einzelne Wärmeversorgungssysteme und kommunale Energiesysteme. Allerdings werden teilweise leicht abweichende Annahmen für die Berechnung verwendet.

In einem ersten Schritt wird der Exergiebedarf des Versorgungsziels berechnet. Dieser ergibt sich aus dem notwendigen Heizenergiebedarf des Gebäudes, der benötigten Wärme für die Trinkwarmwassererwärmung, sowie dem im Gebäude für die Wärmeverteilung benötigten Hilfsstrom multipliziert mit der jeweilig benötigten Energiequalität. Die Energiequalität der Wärme entspricht dem Carnot-Faktor der Wärme: $1 - T_{\text{Referenz}}/T_{\text{Mittel}}$, wobei es sich bei T_{Mittel} bei Trinkwarmwasser um die logarithmische Mitteltemperatur zwischen Kaltwassertemperatur und der maximal benötigten Warmwassertemperatur handelt. Für die Raumwärme entspricht T_{Mittel} der benötigten Raumtemperatur, da die Versorgungsaufgabe in diesem Fall die Erhaltung der Innentemperatur trotz Verlusten über die Gebäudehülle und nicht die Erwärmung eines Stoffstromes ist. Die Energiequalität elektrischer Energie liegt gemäß (Jentsch 2010) bei 100%.

Bei Wärmepumpensystemen muss die Umweltwärme berücksichtigt werden, welche sich als Differenz aus abgegebener Wärme und eingesetzter elektrischer Energie ergibt. Die Energiequalität der Wärme, welche der Umwelt entzogen wird, ergibt sich wiederum als Carnot Faktor, wobei T_{Mittel} der mittleren Erdreichtemperatur entspricht.

Bei Anlagen zur Kraft-Wärme-Kopplung werden die Referenztemperatur sowie die Vor- und Rücklauftemperaturen der Heiznetze zugrunde gelegt. Mit Hilfe dieser Temperaturen können wiederum Carnot-Faktoren für die ausgekoppelten Wärmeströme berechnet werden, welche, multipliziert mit den entsprechenden ausgekoppelten Wärmemengen, die mit den Wärmeströmen verknüpften Exergiestrome ergeben. Der Wärme wird anschließend der Brennstoffanteil zugeordnet, der dem Anteil des mit der ausgekoppelten Wärme verbundenen Exergiestroms am gesamten erzeugten Exergiestrom (d. h. Strom und Wärme) entspricht.

Wird Fernwärme mit Hilfe thermischer Quellen erzeugt, wie z. B. Geothermie oder Abwärme, so entspricht die speicherbare Primärenergie der diesen Quellen entzogenen Wärmemenge, während sich die Energiequalität des mit der Wärme verbundenen Exergiestroms wiederum aus dem Carnotfaktor mit T_{Mittel} als der logarithmischen Mitteltemperatur von Vor- und Rücklauf der thermischen Quelle berechnen lässt.

Der Primärenergie-Einsatz für ein Versorgungsszenario ergibt sich aus der Summe der einzelnen, für den jeweiligen Fall eingesetzten Exergiestrome, welche mit Brennstoffen und Wärme aus thermischen Quellen verbunden sind. Diese wiederum sind jeweils das Produkt der entsprechenden Primärenergie und der entsprechenden Energiequalität, welche gemäß (Jentsch 2010) für Brennstoffe stets 100% beträgt und für Wärmeströme oberhalb der Umgebungstemperatur dem mit Hilfe der Referenz- und dem, mit der entsprechenden Mitteltemperatur berechneten, Carnotfaktor entspricht.

Durch die Festlegung des gleichen Versorgungsziels für alle verglichenen Optionen, in diesem Fall der thermische Komfort im Gebäude, wird sichergestellt, dass die sich ergebenden Exergieverbräuche für die verschiedenen Versorgungsszenarien uneingeschränkt untereinander vergleichbar sind.

Für die Berechnung der Größen in den Exergieausweisen, werden die jeweiligen Energiemengen auf die benötigte Nutzenergie bezogen, um die Verhältnisse der unterschiedlichen Bedarfe und Versorgungsströme einfacher einschätzen zu können. Die mittlere Energiequalität des Bedarfs ergibt sich auf Basis der den Carnotfaktoren der benötigten Wärmeströme, der Nutzungsgrade von KWK Anlagen sowie von 100% für nicht thermische Energieformen.

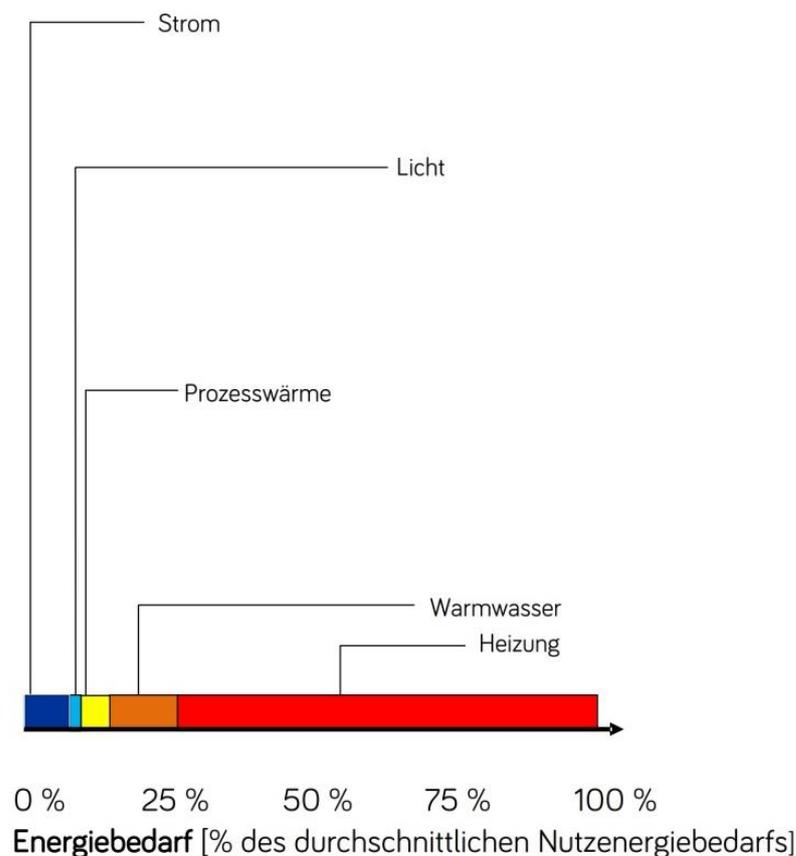
Die mittlere Energiequalität der Versorgung ergibt sich aus der Division der Summe der Primärenergie, durch die Summe der eingesetzten Primärenergie. Dabei müssen gemäß (Jentsch 2010) im Falle von Kraft-Wärme-Kopplung auch Wärmeströme bei Referenztemperatur berücksichtigt werden, für welche T_{Mittel} der Referenztemperatur entspricht und somit der Carnotfaktor bzw. die mit diesen Strömen verbundenen Energiequalität Null ist. Das gleiche gilt für Wärmepumpen, bei welchen die Temperatur der Wärmequelle der Referenztemperatur entspricht. So kann sichergestellt werden, dass die Energiebilanzen trotz Brennstoffaufteilung erfüllt sind und die eingesetzte Primärenergie stets größer oder gleich als die Nutzenergie ist.

6.3 Aufbau des Exergieausweises

Im Folgenden soll Schritt-für-Schritt erläutert werden, wie der Exergieausweis aufgebaut ist, um anschließend anhand von Beispielen, dessen Anwendung darzustellen.

Für die Erstellung eines Exergieausweises muss der Energiebedarf des zu bewertenden Objektes bekannt ist. Dieser kann je nach gewünschter Genauigkeit aus Berechnungen für das vorliegende Objekt stammen oder mit Hilfe von üblichen Mittelwerten festgelegt werden. Ausgehend davon wird in dem vorliegenden Beispiel, welches in Abbildung 36 dargestellt ist, der Strombedarf sowie der Energiebedarf für Licht, Heizung, Warmwasserbereitung und für Prozesswärme wie Kochen, Backen und Waschen auf einer X-Achse aufgetragen. Die unterschiedlichen Bedarfe werden durch gut unterscheidbare Farben gekennzeichnet und bilden die insgesamt benötigte Nutzenergie.

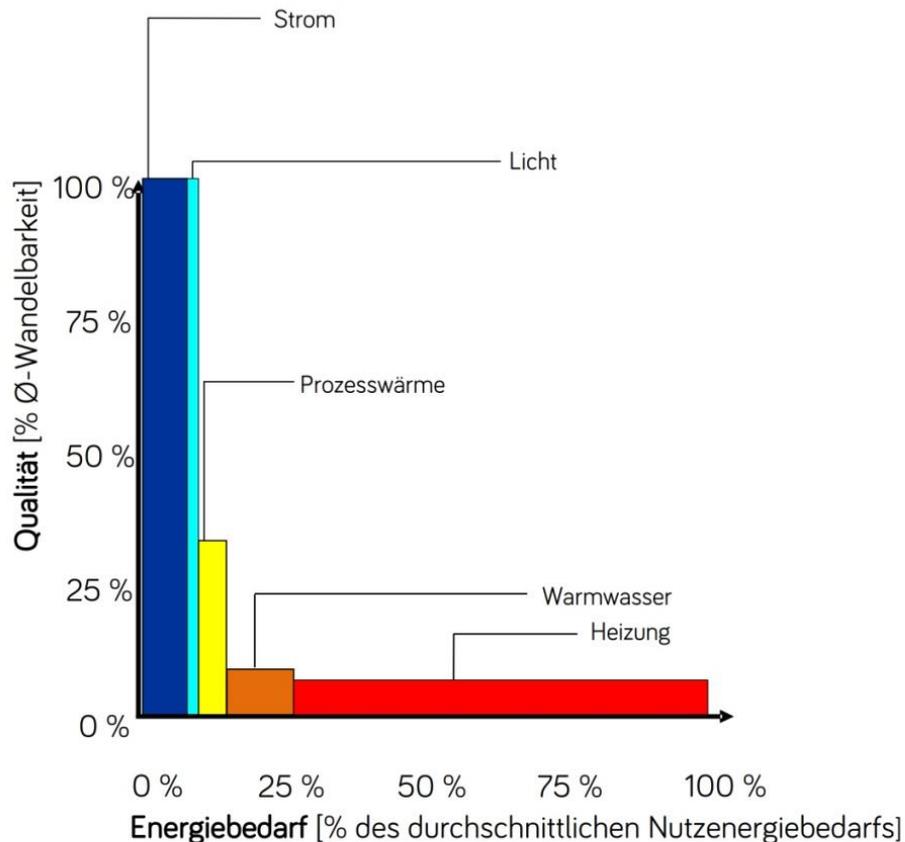
Abbildung 36: Darstellung eines Beispiel-Energiebedarfs für Wohnzwecke und dessen grafische Aufschlüsselung nach Energiebedarfsarten



Quelle: Richtvert

Exergie lässt sich vereinfacht als Energie multipliziert mit Energiequalität verstehen. D.h. die Energiequalität spielt eine ebenso große Rolle wie die Energie in der exergetischen Bewertung. Für jeden Energiebedarf lässt sich eine exakte Energiequalität angeben, welche der betrachteten Anwendung entspricht (Jentsch et al. 2009). Diese Energiequalität wird nun auf der Y-Achse aufgetragen, so dass sich Abbildung 37 ergibt.

Abbildung 37: Darstellung eines Beispiel-Exergiebedarfs für Wohnzwecke und dessen grafische Aufschlüsselung nach Exergiebedarfsarten



Quelle: Richtvert

Die durch Energiequalität und Energie entstehende Fläche stellt die Exergie dar. Es wird ersichtlich, dass der Exergiebedarf für Heizung und Strom in dem gewählten Beispiel annähernd gleich ist, trotz dem wesentlich mehr Energie für die Heizung benötigt wird. Die Qualität der für die Heizung benötigten Energie ist jedoch klein. Das lässt sich leicht nachvollziehen, da sich mit Strom jede technische Anwendung leicht betreiben lässt, während Wärme auf Raumtemperatur-Niveau vollständig nur zur Raumheizung eingesetzt werden kann.

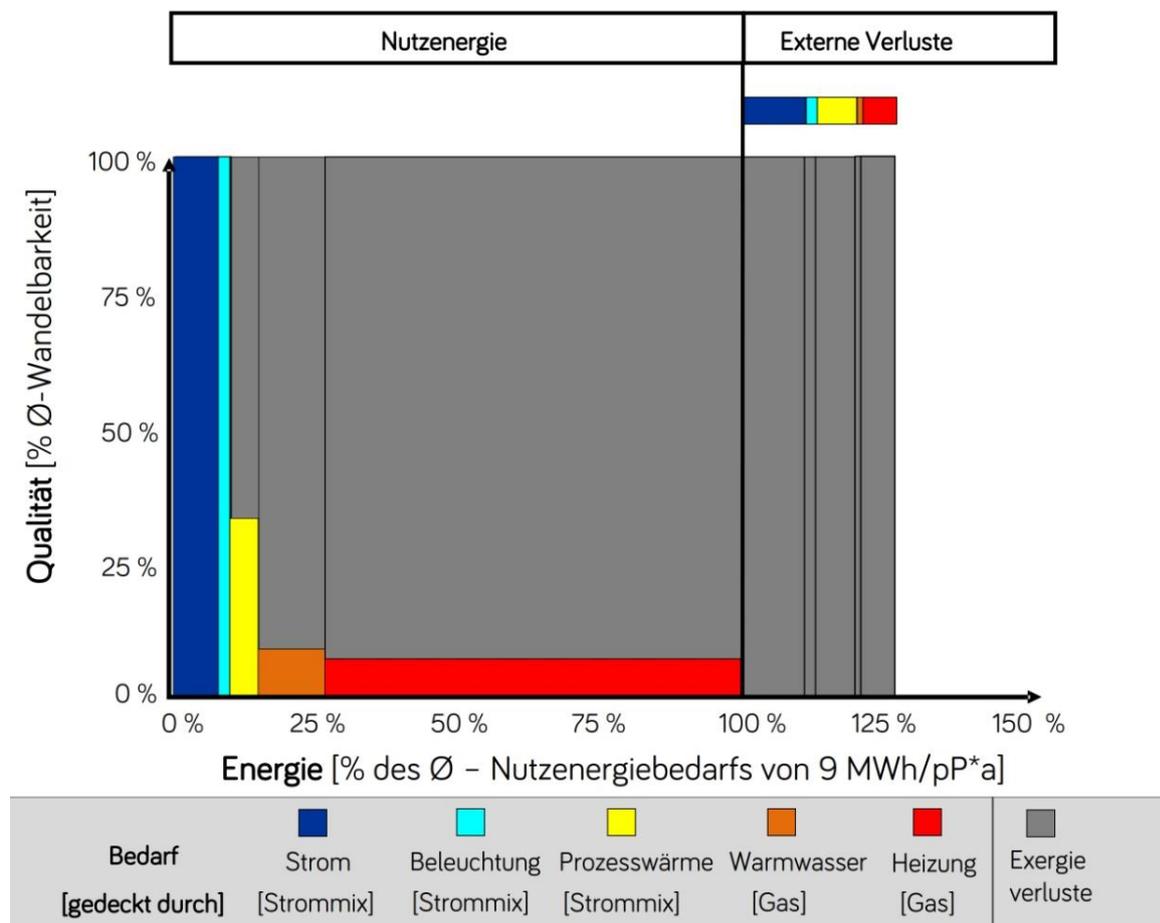
Abbildung 37 stellt den Exergiebedarf dar, welcher durch den Nutzenergiebedarf eines Gebäudes entsteht, das die Aufgabe hat einem Menschen Wohnkomfort zu bieten. Es ist physikalisch nicht möglich in diesem Gebäude dieses Ziel mit weniger Einsatz an Exergie zu erreichen.

In technischen Systemen existieren zwei grundsätzlich verschiedene Arten von Verlusten. Externe Verluste führen z.B. dazu, dass nur ein Teil der Energie, welche ursprünglich bereitgestellt wurde auch bei der Zielanwendung ankommt. So kann in einem konventionellen Gaskessel meist nur 90% der Brennstoffenergie (bezogen auf den unteren Heizwert) in Wärme umgewandelt werden. Die 10% dabei entstehenden Verluste sind als „Externe Verluste“ gekennzeichnet.

Interne Verluste hingegen können energetisch nicht bewertet werden, lassen sich jedoch auf Basis der Exergie genau so exakt bestimmen wie energetische Verluste. Sie treten auf, wenn Energiequalität ohne die Erzeugung von Nutzen oder externen Verlusten vernichtet wird. Prozesse in denen stets interne Verluste auftreten sind die Umwandlung von Brennstoffen in Nutzwärme, sowie die Übertragung von Wärme von einer Flüssigkeit hoher Temperatur auf eine Flüssigkeit niedrigerer Temperatur.

In der folgenden Abbildung ist zusätzlich zum Exergiebedarf der Primärenergie-Verbrauch dargestellt.

Abbildung 38: Das zentrale Diagramm eines Exergieausweises - Darstellung eines Beispiel-Exergiebedarfs für Wohnzwecke und dessen grafische Aufschlüsselung nach Exergiebedarfsarten hinterlegt mit einer Darstellung des daraus entstehenden Exergieverbrauchs (Bedarf plus Verluste). Dieser entspricht dem Primärenergie-Verbrauch und ist nach Nutzenergie und Externen Verlusten aufgeteilt.



Quelle: Richtvert

Im Exergieausweis werden äußere Verluste im Bereich „Externe Verluste“ zusammengefasst. Hier sieht man auf einen Blick wie viel Energie bei der Bereitstellung der Nutzenergie aus der Primärenergie verloren geht. Wie auch beim Energiebedarf bestimmt sich die Höhe der Ener-

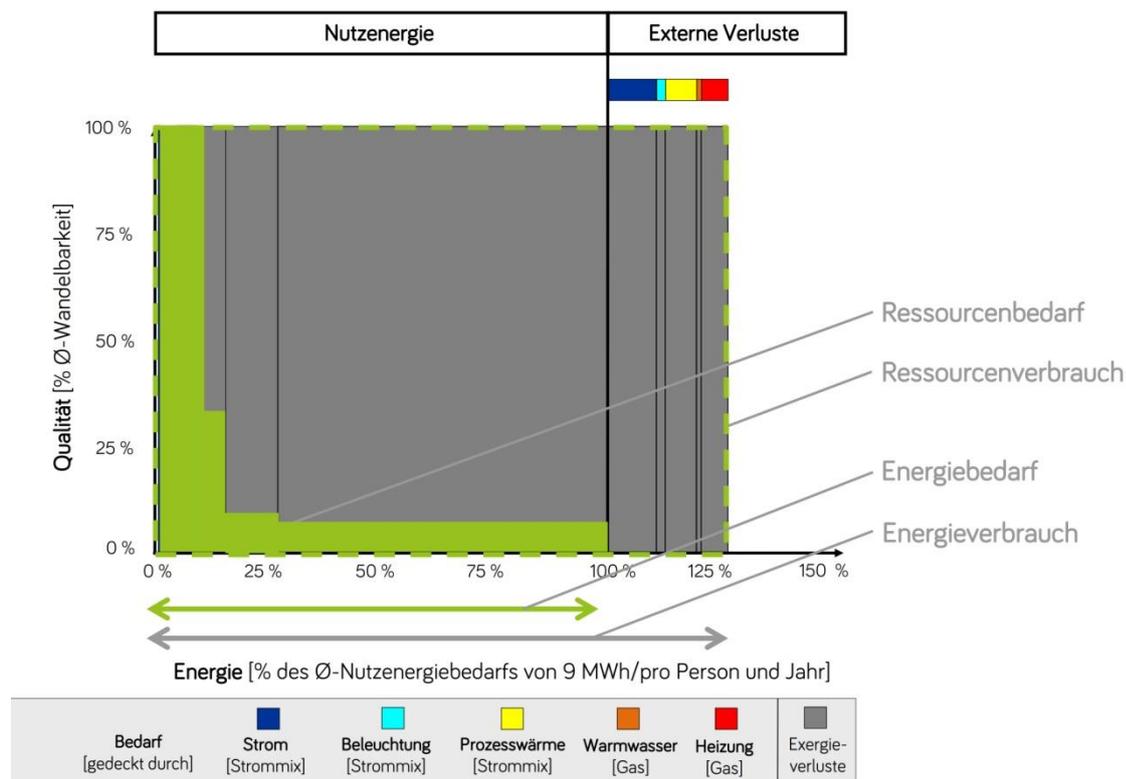
gieblöcke aus der durchschnittlichen Energiequalität der eingesetzten Primärenergie. Mit Hilfe des Indikatorbalkens über dem Bereich „Externe Verluste“ können die Verluste den einzelnen Bedarfen zugeordnet werden.

Interne Verluste werden im Bereich Nutzenergie offensichtlich. So stellt beispielsweise der gesamte graue Bereich oberhalb des Bedarfs für die Heizung interne Verluste dar. Im Bereich Strom treten keine internen Verluste bei der Anwendung der Nutzenergie auf. Strom ist wie auch Brennstoff im Idealfall zu 100% verlustfrei in jede andere Energieform umwandelbar (Jentsch 2010). Beide sind damit Energieformen mit dem Potenzial verlustfrei in jede andere Energieform umgewandelt zu werden, somit treten bei der Wandlung von Brennstoffen zu Strom keine inneren Verluste auf. Allerdings sind die externen Verluste bei der Stromerzeugung erheblich.

Die Summe der internen und externen Verluste kann im Exergieausweis auf einen Blick erfasst werden. Die graue Fläche stellt die Exergieverluste dar. In

Abbildung 39 ist dargestellt, wie vier wichtige Bewertungsgrößen im Exergieausweis abgelesen werden können.

Abbildung 39: Darstellung die zeigt, wo die Größen: Energiebedarf, (Primär)Energieverbrauch, Exergiebedarf und Primärenergie-Verbrauch im zentralen Diagramm des Exergieausweises abgelesen werden können.



Quelle: Richtvert

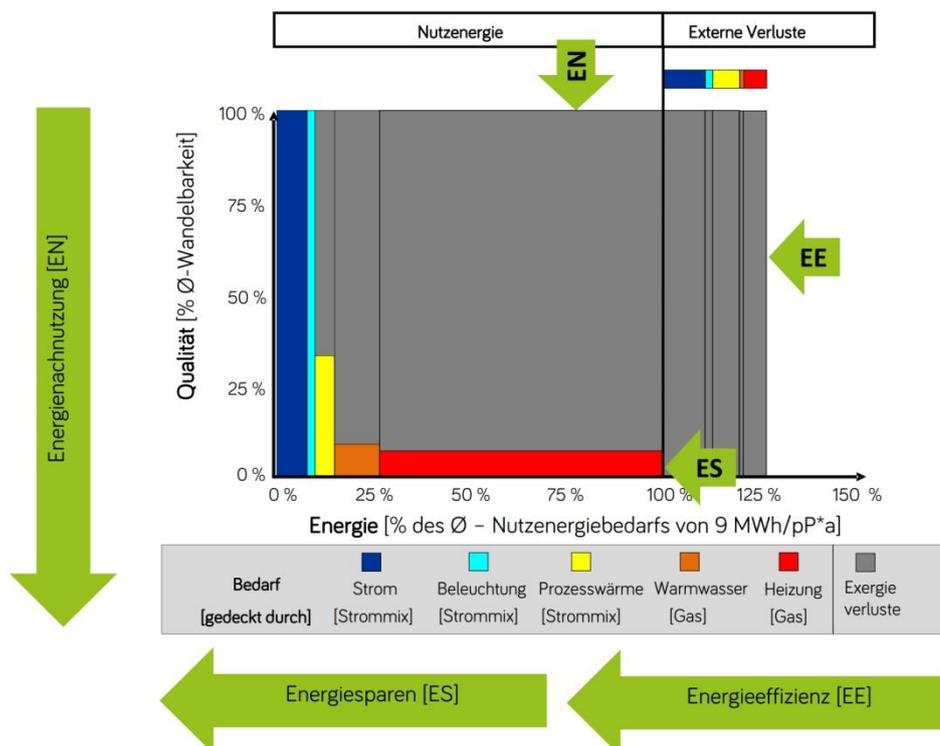
Um eine einfache Erfassbarkeit zu gewährleisten, ist auch die Energieachse nur mit Prozentzahlen beschriftet. Der absolute Wert für den Energiebedarf ergibt sich jeweils aus der Multiplikation des Prozentwertes mit dem 100% Wert, welcher in Klammern hinter der Zeilenunter-

schrift „Energie“ angegeben ist. In diesem Beispiel 9 MWh pro Person und Jahr. Auch der (Primär)energieverbrauch kann in ähnlicher Weise ermittelt werden. Für das vorliegende Beispiel ergeben sich aus ca. 130% und 9 MWh pro Person und Jahr ca. 11,7 MWh pro Person und Jahr. Das Verhältnis von Energiebedarf zu Energieverbrauch ist die Energieeffizienz, welche in diesem Fall für das Gesamte System ca. 77% beträgt.

Der Exergiebedarf ergibt sich in ähnlicher Weise, wenn man nun die Werte für den Energiebedarf mit der benötigten Qualität multipliziert und die einzelnen Teilbedarfe aufaddiert. Er wird durch die grüne Fläche repräsentiert. Ähnlich ergibt sich der Primärenergie-Verbrauch, welcher durch die gesamte ausgefüllte Fläche, also „farbiger“ Bedarf plus „graue“ Verluste, repräsentiert wird. Die für die einzelnen Energiearten mitunter unterschiedliche Energiequalität macht es jedoch etwas aufwändiger zu genauen Zahlen zu kommen. Diese sollten dann bei Bedarf zusätzlich zu dem Exergieausweis-Diagramm angegeben werden. Dennoch lässt sich leicht das Verhältnis von Exergiebedarf zu Primärenergie-Verbrauch abschätzen. Dieses Verhältnis kann als Exergieausnutzung bezeichnet werden und beträgt für das dargestellte Beispiel ca. 10%. In

Abbildung 40 wird aufgezeigt, wie sich Optimierungsmaßnahmen im Exergieausweis auswirken.

Abbildung 40: Darstellung der drei prinzipiellen Optimierungsrichtungen Energiesparen [ES], Energieeffizienz [EE] und Energienachnutzung [EN] und deren Einfluss auf das zentrale Diagramm des Exergieausweises



Quelle: Richtvert

Wird durch Energieeinsparmaßnahmen, wie z.B. die Gebäudedämmung der Energiebedarf abgesenkt, wird der entsprechende Energiebedarf z.B. für die Heizung „kürzer“ und somit auch die Gesamtfläche, welche den Primärenergie-Verbrauch repräsentiert.

Durch Energieeffizienzmaßnahmen werden externe Verluste verringert, was im Diagramm dazu führt, dass der Bereich „Externe Verluste“ und mit ihm auch der Energie- und Exergiebedarf „kürzer“ wird.

Die Verringerung interner Verluste lässt sich durch den Einsatz geeigneterer Technologien oder Energienachnutzung erreichen. D.h. beispielsweise dadurch, dass vorhandene thermische Quellen wie tiefe Geothermie für die Wärmeversorgung genutzt werden. Alternativ kann die Energiequalität hochwertiger Primärenergien mehrfach genutzt werden, so dass für die Wärmeversorgung letztlich nur noch Abwärme auf einem niedrigen Temperaturniveau eingesetzt wird. Eine Verbesserung der Passung zwischen Energiequalität des Bedarfs und der Energiequalität der Versorgung macht die Diagrammfläche „niedriger“.

Mit diesen Erläuterungen sollte das zentrale Diagramm des Exergieausweises nachvollziehbar sein. Für den Exergieausweis wird es um zusätzliche Elemente wie Überschriften und Zahlenangaben ergänzt. Darauf wird in den späteren Kapiteln eingegangen.

6.4 Vergleich Energieausweis und Exergieausweis

Der Exergieausweis ist eine sinnvolle Ergänzung zum von gesetzlicher Seite vorgeschriebenen Energieausweis (BMVBS 2009). Der Energieausweis wurde eingeführt, um den Gebäudeenergieverbrauch zu charakterisieren und die energetische Güte des Gebäudesystems schnell erkennbar zu machen. Da die dem Energieausweis zugrunde liegende Bewertungsmethodik die Energiequalität nicht oder nicht vollständig berücksichtigt, besteht jedoch die Gefahr, dass die Angaben des Energieausweises letztlich nicht die tatsächliche Gesamtsystemgüte erkennen lassen. Um Fehleinschätzungen und Fehlentscheidungen zu vermeiden erscheint es daher sinnvoll den Exergieausweis einzusetzen, mit welchem Gebäude nicht nur charakterisiert sondern auch fundiert, umfassend und gerecht verglichen werden können.

Tabelle 9: Unterschiede zum Energieausweis (Eigene Angaben und DIN 2007)

	Energieausweis	Exergieausweis
Aussagekraft	Erlaubt keine Rückschlüsse auf den tatsächlichen Energieverbrauch. (Hinweis unter den Energieausweisen)	Aufgrund transparenter Annahmen wird klar, für welche Fälle die Ergebnisse gelten. Die Aussagen gelten genau für die gemachten Annahmen ²³ .
Berechnung	Mit Software oder gemäß DIN 18599.	Mit Internet-Software oder nach Einarbeitung (Jentsch 2010) oder Schulung
Berücksichtigte Energiebedarfe	Heizung, Kühlung, Lüftung, Beleuchtung & Hilfsenergiebedarf	Heizung, Kühlung, Lüftung, Beleuchtung & Hilfsenergiebedarf – zusätzlich können alle weiteren Energiebedarfe (Strom, Energie für Kochen und Backen usw.) in die Bewertung mit einbezogen werden

²³ Alle Annahmen für die in diesem Abschnitt dargestellten Exergieausweise, sind im Anhang an diesen Bericht zu finden.

Detailliertheit	Nur einige Informationen sind visualisiert - Wesentliche Details nur im Text	Alle zentralen Informationen sind visualisiert – der Text ist nur zur Präzisierung notwendig.
Energieeffizienz	Verhältnis vom Energiebedarf des Gebäudes zum Energiebedarf des Referenzgebäudes (relative Größe ohne direkte physikalische Definition)	Verhältnis von Energiebedarf zum Primärenergieverbrauch (physikalische Definition)
End- und Nutzenergiebedarf	Wird als Text angegeben	Visuell abschätzbar
Endenergiebedarf	Detaillierte Berechnungsvorschrift nach DIN 18599 (DIN 2007)	Nach Datenverfügbarkeit oder auch nach DIN 18599 (DIN 2007) ermittelbar. Es können ggf. übliche Mittelwerte verwendet werden.
Erneuerbare Energie	Reduziert immer den Primärenergieverbrauch. Kann dazu führen, dass der Primärenergieverbrauch kleiner als der Endenergiebedarf ist (physikalischer Widerspruch).	Wird voll berücksichtigt, wenn sie direkt speicherbar ist (Biomasse). Für nicht-direkt speicherbare Erneuerbare Energien wird die erste Energie nach der Wandlung als Quasi-Primärenergie angesehen. Führt nie dazu, dass die Nutzenergie größer als die Primärenergie ist. Der Energieerhaltungssatz bleibt berücksichtigt.
Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)	Stromgutschriftverfahren, welches alle Vorteile der KWK der Wärme zuschreibt und aufgrund der Verwendung von Referenzwerten keine dauerhafte Gültigkeit hat. Zusätzlich ist es nicht geeignet für die Bewertung von Wärme aus Biomasse und anderer erneuerbarer KWK.	Exergiebasierte Brennstoffaufteilung erlaubt eine physikalisch faire Aufteilung des Brennstoffes auf Strom und Wärme. Die Bewertung ist für eine gegebene Anlage dauerhaft gültig und Unabhängig von externen Referenzwerten.
Primärenergie	Fossil auf Basis pauschalierter Primärenergiefaktoren ermittelt – regenerative Primärenergie wird nicht im Energieausweis berücksichtigt	Fossil und regenerativ auf Basis des Kumulierten Energieverbrauchs ermittelt. Es wird nur direkt speicherbare Primärenergie bzw. die erste direkt speicherbare Sekundärenergie (z.B. für Wind und Sonne) berücksichtigt
Primärenergieverbrauch	Wird als Text angegeben	Visuell abschätzbar – wird ab der nächsten Version des Exergieausweises auch als Text angegeben
Exergieausnutzung	Keine Angabe	Visuell abschätzbar - wird ab der nächsten Version des Exergieausweises auch als Text angegeben
Primärenergie-Verbrauch (Verbrauch an Primärenergie)	Keine Angabe	Visuell abschätzbar - Wird ab der nächsten Version des Exergieausweises auch als Text angegeben
Relative Verbesserung zur Referenz	Kann visuell abgeschätzt werden – keine exakte Angabe	Angabe als Zahlenwert - Referenz frei wählbar

	Energieausweis	Exergieausweis
Transparenz	Die Annahmen für die Berechnung sind nicht vollständig aufgeführt, Quellenangaben fehlen.	Alle Annahmen mit Quellenangabe für die Berechnung liegen dem Exergieausweis bei.
Treibhausgasemissionen	Können extra angegeben werden – Angabe problematisch bei Fernwärme und Kraftwärmekopplung aufgrund problematischer Allokationsmethode	Werden ab der nächsten Version des Exergieausweises auch als Text angegeben - Angabe auf fundierter wissenschaftlicher Basis auch für Fernwärme und Kraft-Wärme-Kopplung möglich
Wärmepumpen	Keine exakten Berechnungsvorschriften in der DIN V 18599 (DIN 2007)	Konsistente exergetische Bewertung erlaubt den fairen Vergleich mit allen anderen Wärmeerzeugern ohne zu physikalischen Widersprüchen zu führen.

In Tabelle 9 wird offensichtlich, dass sich der Energieausweis in vielen Punkten vom Exergieausweis unterscheidet. Die Unterschiede sollen im Folgenden anhand von zwei Beispielen diskutiert werden. In

Abbildung 41 ist ein Energieausweis für ein Mehrfamilienhaus (Wohngebäude) dargestellt.

Abbildung 41: Energieausweis für ein Wohngebäude welches mit Erdgas und Holzpellets beheizt wird.

ENERGIEAUSWEIS für Wohngebäude

gemäß den §§ 16 ff. Energieeinsparverordnung (EnEV)

Gültig bis: 25.04.2017 1

Gebäude

Gebäudetyp	Mehrfamilienhaus
Adresse	Musterstr. 123, 12345 Musterstadt
Gebäudeteil	Vorderhaus
Baujahr Gebäude	1928
Baujahr Anlagentechnik	1982
Anzahl Wohnungen	9
Gebäudenutzfläche (A _G)	575 m ²



Anlass der Ausstellung des Energieausweises: Neubau Modernisierung (Änderung/Erweiterung) Sonstiges (Zweck)

Hinweise zu den Angaben über die energetische Qualität des Gebäudes

Die energetische Qualität eines Gebäudes kann durch die Berechnung des **Energiebedarfs** unter standardisierten Randbedingungen oder durch die Auswertung des **Energieverbrauchs** ermittelt werden. Als Bezugsfläche dient die energetische Gebäudenutzfläche nach der EnEV, die sich in der Regel von den allgemeinen Nutzflächenangaben unterscheidet. Die angegebenen Vergleichswerte sollen überschlägige Vergleiche ermöglichen (**Erläuterungen - siehe Seite 4**).

- Der Energieausweis wurde auf der Grundlage von Berechnungen des **Energiebedarfs** erstellt. Die Ergebnisse sind auf **Seite 2** dargestellt. Zusätzliche Informationen zum Verbrauch sind freiwillig.
- Der Energieausweis wurde auf der Grundlage von Auswertungen des **Energieverbrauchs** erstellt. Die Ergebnisse sind auf **Seite 3** dargestellt. Datenerhebung Bedarf/Verbrauch durch: Eigentümer Aussteller
- Dem Energieausweis sind zusätzliche Informationen zur energetischen Qualität beigefügt (freiwillige Angabe).

Hinweise zur Verwendung des Energieausweises

Der Energieausweis dient lediglich der Information. Die Angaben im Energieausweis beziehen sich auf das gesamte Wohngebäude oder den oben bezeichneten Gebäudeteil. Der Energieausweis ist lediglich dafür gedacht, einen überschlägigen Vergleich von Gebäuden zu ermöglichen.

Aussteller:
Paul Mustermann
 Ingenieurbüro Mustermann
 Musterstraße 45
 12345 Musterstadt

Datum: _____ Unterschrift des Ausstellers: _____

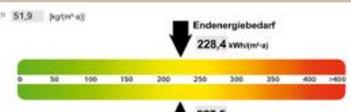
ENERGIEAUSWEIS für Wohngebäude

gemäß den §§ 16 ff. Energieeinsparverordnung (EnEV)

Berechneter Energiebedarf des Gebäudes 2

Energiebedarf

CO₂-Emissionen¹⁾ 51,9 (kg/m²a)



Endenergiebedarf: 228,4 kWh/(m²a)

Primärenergiebedarf "Gesamtenergieeffizienz": 227,5 kWh/(m²a)

Nachweis der Einhaltung des § 3 oder § 9 Abs. 1 EnEV²⁾

Primärenergiebedarf Gebäude Ist-Wert	227,5 kWh/(m ² a)	Energetische Qualität der Gebäudehülle Gebäude Ist-Wert H'	1,30 W/(m ² K)
EnEV-Anforderungswert	113,4 kWh/(m ² a)	EnEV-Anforderungswert H'	0,65 W/(m ² K)

Endenergiebedarf

Energetischer Träger	Heizung	Wärmewasser	Hißgeräte ³⁾	Gesamt in kWh/(m ² a)
Erdgas H	151,2	16,6		167,8
Strom	0,0	0,0	12,3	12,3
Holz-Pellets	40,1	8,2		48,3

Sonstige Angaben

Eurobarometer alternativer Energieversorgungssysteme

nach § 5 EnEV vor Baubeginn geprüft

Alternative Energieversorgungssysteme werden genutzt für:

Heizung Warmwasser Lüftung Kühlung

Lüftungskonzept

Die Lüftung erfolgt durch:

- Einsatzlüftung Schallstille Lüftung
- Lüftungsanlage ohne Wärmerückgewinnung
- Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung

Vergleichswerte Endenergiebedarf



Erläuterungen zum Berechnungsverfahren

Das verwendete Berechnungsverfahren ist durch die Energieeinsparverordnung vorgegeben. Insbesondere wegen standardisierter Randbedingungen erlauben die angegebenen Werte keine Rückschlüsse auf den tatsächlichen Energieverbrauch. Die ausgewiesenen Bedarfswerte sind spezifische Werte nach der EnEV pro Quadratmeter Gebäudenutzfläche (A_G).

1) Einjährige Angabe 2) Zwei in den Fällen des Neubaus und der Modernisierung auszuführen 3) ggf. einschließl. Kühlung 4) EN - Betriebskosten, MW - Mehrfamilienhäuser

Quelle: Grobe 2013

Auf dem ersten Blatt des Energieausweises finden sich ausschließlich Textinformationen und ein Bild des Objekts. Das zentrale Diagramm des Energieausweises auf der zweiten Seite ist die Farbskala für den Energiebedarf. An dieser sind auch die Kennwerte für CO₂-Emissionen, Endenergiebedarf und Primärenergiebedarf vermerkt. Zusätzlich finden sich auf dem Energieausweis diverse Textangaben, wie zum Beispiel zur Qualität der Gebäudehülle oder den Standards der Energieeinsparverordnung. Im unteren Teil des Energieausweises befindet sich nochmals eine Farbskala, welche Endenergiebedarfe verschiedener Gebäudetypen als Referenz aufführt. In Tabelle 10 und Tabelle 11 sind die wesentlichen Angaben aus dem Energieausweis in

Abbildung 41 nochmals zusammengefasst.

Tabelle 10: Zusammenfassung der Angaben an der Farbskala aus Abbildung 41

	Endenergiebedarf [kWh/m ² ·a]	Primärenergiebedarf [kWh/m ² ·a]	CO ₂ -Emissionen [kg/m ² ·a]
Heizung	228,4	227,5	51,9

Tabelle 11: Zusammenfassung der Angaben zur Endenergie aus Abbildung 41 (teilweise korrigiert)

	Heizung	Warmwasser	Hilfsgeräte	Gesamt
Erdgas	151,2	16,6		167,8
Strom	0	0	12,3	12,3
Holzpellets	40,1	8,2		48,2

Auf Basis der Angaben in Tabelle 10 und Tabelle 11 wurde der Exergieausweis in Abbildung 42 berechnet.

Abbildung 42: Exergieausweis für das Wohngebäude aus Abbildung 41

Quelle: Richtvert

Abkürzungen in Abbildung 42:

EG	Erdgas
HK	Heizkessel
HKF	Heizkessel für Festbrennstoffe
T	Temperatur

Der Exergieausweis setzt ganz auf die visuelle Darstellung des Gebäudeenergiesystems. Alle Textangaben welche im Energieausweis angeführt sind, können bei Bedarf in einer Effizienzanalyse mit dem Exergieausweis ergänzt werden. Im Vergleich zum Energieausweis wird sofort deutlich, dass bei dem vorliegenden Gebäudesystem mehr als 90% der eingesetzten Primärenergie verloren geht. Insbesondere interne Verluste führen zu einer sehr geringen Exergieausnutzung.

Während der Energieausweis zu vermitteln versucht, dass der Primärenergieeinsatz sogar etwas geringer ist als der Endenergiebedarf, wird im Exergieausweis deutlich, dass die Primärenergie um etwa 60% höher ist als die Endenergie. Diese unterschiedlichen Resultate begründen sich durch die unterschiedliche Bilanzierung erneuerbarer Energien. Beim Energieausweis wird für Holz ein Primärenergiefaktor von 0,2 (DIN 2007) zum Ansatz gebracht. D.h. dass hier davon ausgegangen wird, dass nur 0,2 Energieeinheiten benötigt werden um eine Einheit

Energie aus Holz bereitzustellen. Physikalisch ist das aufgrund des Energieerhaltungssatzes, welcher besagt, dass Energie weder erzeugt noch vernichtet werden kann, unmöglich. Bei genauerer Betrachtung wird erkennbar, dass im Energieausweis nur die fossile Primärenergie bewertet wird. Primärenergie aus erneuerbaren Quellen wird bei der Bewertung vernachlässigt. Im Resultat führt das dazu, dass die Effizienz von Anlagen zur Erzeugung von Nutzenergie aus erneuerbaren Energien beliebig ineffizient sein kann ohne das Bewertungsergebnis negativ zu beeinflussen. Insbesondere vor dem Hintergrund der „Teller gegen Tank“ Problematik bei Biomasse erscheint diese Festlegung bedenklich. Denn sie führt dazu, dass die ineffiziente Nutzung von Biomasse vorteilhafter ist als die hocheffiziente Nutzung fossiler Rohstoffe. Doch auch die Biomasse ist durch ihre Wachstumsgeschwindigkeit sowie durch Ihren Landverbrauch und die damit verbundenen Konkurrenzeffekte nur begrenzt verfügbar. Insbesondere der hohe Landverbrauch von Biomasse, welcher bis zu 100 mal höher ist als der von Windenergieanlagen für die „Ernte“ der gleichen Energiemenge (Dijkman & Benders 2010) lässt es vernünftiger erscheinen auch bei der Biomassenutzung eine hohe Effizienz anzustreben.

Abbildung 43: Erster Teil eines Energieausweises für ein Nicht-Wohngebäude, welches mit Fernwärme und Holzpellets beheizt wird.

ENERGIEAUSWEIS

für Nichtwohngebäude
gemäß den §§ 16 ff. Energieeinsparverordnung (EnEV)

Gültig bis: 25.04.2017 1

Gebäude	
Hauptnutzung/ Gebäudekategorie	Fachhochschule
Adresse	Musterstraße 99, 12345 Musterstadt
Gebäudeteil	Hauptgebäude
Baujahr Gebäude	1965
Baujahr Wärmeerzeuger	1996/97
Baujahr Klimaanlage	1996
Nettogrundfläche	11.940 m ²

Anlass der Ausstellung des Energieausweises: Neubau Vermietung/Verkauf Modernisierung (Änderung)/Erweiterung Ausfall bei öffentl. Gebäuden Sonstiges (Freiwillig)

Hinweise zu den Angaben über die energetische Qualität des Gebäudes

Die energetische Qualität eines Gebäudes kann durch die Berechnung des **Energiebedarfs** unter standardisierten Randbedingungen oder durch die Auswertung des **Energieverbrauchs** ermittelt werden. **Als Bezugsfläche dient die Nettogrundfläche.**

■ Der Energieausweis wurde auf der Grundlage von Berechnungen des **Energiebedarfs** erstellt. Die Ergebnisse sind auf **Seite 2** dargestellt. Zusätzliche Informationen zum Verbrauch sind freiwillig. Diese Art der Ausstellung ist **PSiCH** bei Neubauten und bestimmten Modernisierungen. Die angegebenen Vergleichswerte sind die Anforderungen der EnEV zum Zeitpunkt der Erstellung des Energieausweises (**Vergleichswerte** - siehe **Seite 4**).

■ Der Energieausweis wurde auf der Grundlage von Auswertungen des **Energieverbrauchs** erstellt. Die Ergebnisse sind auf **Seite 3** dargestellt. Die Vergleichswerte beruhen auf statistischen Auswertungen.

Datenerhebung Bedarf/Verbrauch durch: Eigentümer Aussteller

Dem Energieausweis sind zusätzliche Informationen zur energetischen Qualität beigefügt (freiwillige Angaben).

Hinweise zur Verwendung des Energieausweises

Der Energieausweis dient lediglich der Information. Die Angaben im Energieausweis beziehen sich auf das gesamte Gebäude oder den oben bezeichneten Gebäudeteil. Der Energieausweis ist lediglich dafür gedacht, einen überschläglichen Vergleich von Gebäuden zu ermöglichen.

Aussteller:
Paul Mustermann
Ingenieurbüro Mustermann
Musterstraße 123
12345 Musterstadt

Datum: _____ Unterschrift des Ausstellers: _____

ENERGIEAUSWEIS

für Nichtwohngebäude
gemäß den §§ 16 ff. Energieeinsparverordnung (EnEV)

Berechneter Energiebedarf des Gebäudes 2

Primärenergiebedarf „Gesamtennergieeffizienz“

Dieses Gebäude: **154,0 kWh/(m²·a)** CO₂-Emissionen¹⁾ **46,5 g/(m²·a)**

Nachweis der Einhaltung des § 4 oder § 9 Abs. 1 EnEV²⁾

Primärenergiebedarf	Energetische Qualität der Gebäudehülle
Gebäude Ist-Wert: 154,0 kWh/(m²·a)	Gebäude Ist-Wert ¹⁾ : 0,8 W/(m²·K)
EnEV-Anforderungswert: 170,8 kWh/(m²·a)	EnEV-Anforderungswert ¹⁾ : 0,6 W/(m²·K)

Energiebedarf

Energieträger	Jährlicher Endenergiebedarf in kWh/(m ² ·a) für					Gebäude insgesamt
	Heizung	Warmwasser	Eingebaute Beheizung	Lüftung	Kühlung einsch. Beheizung	
Fernwärme	120,3	10,1	12,7	2,4	1,3	136,8
Strommix	2,0	0,1	12,7	2,4	1,3	14,5
Holz-Pellets	49,5	8,1				57,6

Aufteilung Energiebedarf

[kWh/(m ² ·a)]	Heizung	Warmwasser	Eingebaute Beheizung	Lüftung	Kühlung einsch. Beheizung	Gebäude insgesamt
Nettoenergie	125,5	13,5	12,7	2,4	2,6	156,7
Endenergie	171,8	18,3	12,7	2,4	1,3	206,5
Primärenergie	100,2	9,8	34,2	6,4	3,4	154,0

Sonstige Angaben

Ersatzbarkeit alternativer Energieversorgungssysteme

■ nach § 5 EnEV vor Baubeginn geprüft

Alternative Energieversorgungssysteme werden genutzt für:

Heizung Warmwasser Eingebaute Beheizung

Lüftung Kühlung

Lüftungskonzept

Die Lüftung erfolgt durch:

Einzel Lüftung Lüftungsanlage ohne Wärmerückgewinnung

Schächterlüftung Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung

weitere Zonen in Anlage

Gebäudezonen

Nr.	Zone	Fläche [m ²]	Anteil [%]
1	Büro	2.900	24
2	Serviertraum	55	1
3	Labor	1.431	12
4	Verkehr/Lager	4.790	40
5	sonst. Aufenthalts	522	4
6	Tafelgarage	1.984	16

Erläuterungen zum Berechnungsverfahren

Das verwendete Berechnungsverfahren ist durch die Energieeinsparverordnung vorgegeben. Insbesondere wegen standardisierter Randbedingungen erlauben die angegebenen Werte keine Rückschlüsse auf den tatsächlichen Energieverbrauch. Die ausgewiesenen Bedarfs- und spezifische Werte nach der EnEV pro Quadratmeter Nettogrundfläche, die oben als EnEV-Anforderungswert bezeichneten Anforderungen der EnEV sind nur im Falle des Neubaus und der Modernisierung nach § 9 Abs. 1 EnEV bindend.

¹⁾ Spezifische Angabe ²⁾ nur in den Fällen des Neubaus und der Modernisierung aufgeführt

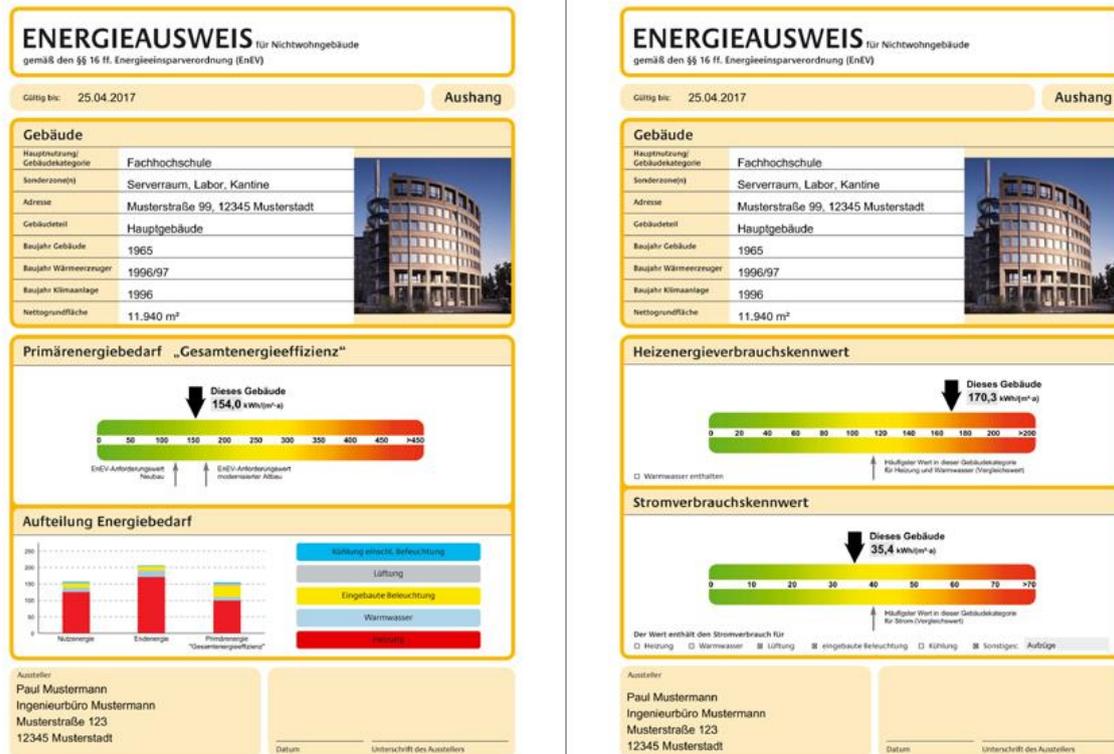
Quelle: Grobe 2013

Dieser wichtige Aspekt findet in der Bewertungsmethodik des Exergieausweises Berücksichtigung. Hier wird Holz wie jeder andere Brennstoff betrachtet, da der letztliche Ursprung aller fossilen Brennstoffe auch Biomasse ist. Die Klima-neutrale Verbrennung von Holz wird somit ausschließlich über die CO₂-Emissionen ersichtlich. Dadurch erhält dieses Kriterium ein eigenständiges Gewicht. Im Energieausweis geht die Emissionsbewertung jedoch sowohl in die CO₂ Bewertung als auch indirekt über den Ausschluss der erneuerbaren Primärenergie in die Primärenergiebewertung ein. Somit wird die Bewertung intransparenter und schlechter nachvoll-

ziehbar. Die umfassende Primärenergie-Betrachtung im Exergieausweis, welche erneuerbare und fossile Brennstoffe gleichartig berücksichtigt, macht hingegen deutlich, dass für eine hohe Gesamteffizienz auch eine hohe Effizienz der Biomassenutzung erforderlich ist.

Als weiteres Beispiel ist in Abbildung 43 der Energieausweis für ein mit Fernwärme und Holzpellets versorgtes Gebäude dargestellt. Die wesentlichen darauf dargestellten Textangaben sind in den Tabelle 12 bis Tabelle 14 zusammengefasst.

Abbildung 44: Zweiter Teil eines Energieausweises für ein Nicht-Wohngebäude, welches mit Fernwärme und Holzpellets beheizt wird.



Quelle: Grobe 2013

Tabelle 12: Zusammenfassung der Angaben an der Farbskala aus Abbildung 43

	Nutzenergiebedarf [kWh/m ² ·a]	Endenergiebedarf [kWh/m ² ·a]	Primärenergiebedarf [kWh/m ² ·a]	CO ₂ -Emissionen [kg/m ² ·a]
Heizung	156,7	206,5	154,0	46,5

Tabelle 13: Zusammenfassung der Angaben zur Endenergie aus Abbildung 43 (alle Angaben in kWh/(m²a))

	Heizung	Warmwasser	Beleuchtung	Lüftung	Kühlung inkl. Be- feuchtung	Gesamt
Fernwärme	120,3	10,1				130,4
Strom	0,2	0,1	12,7	2,4	1,3	18,5
Holzpellets	49,5	8,2				57,6

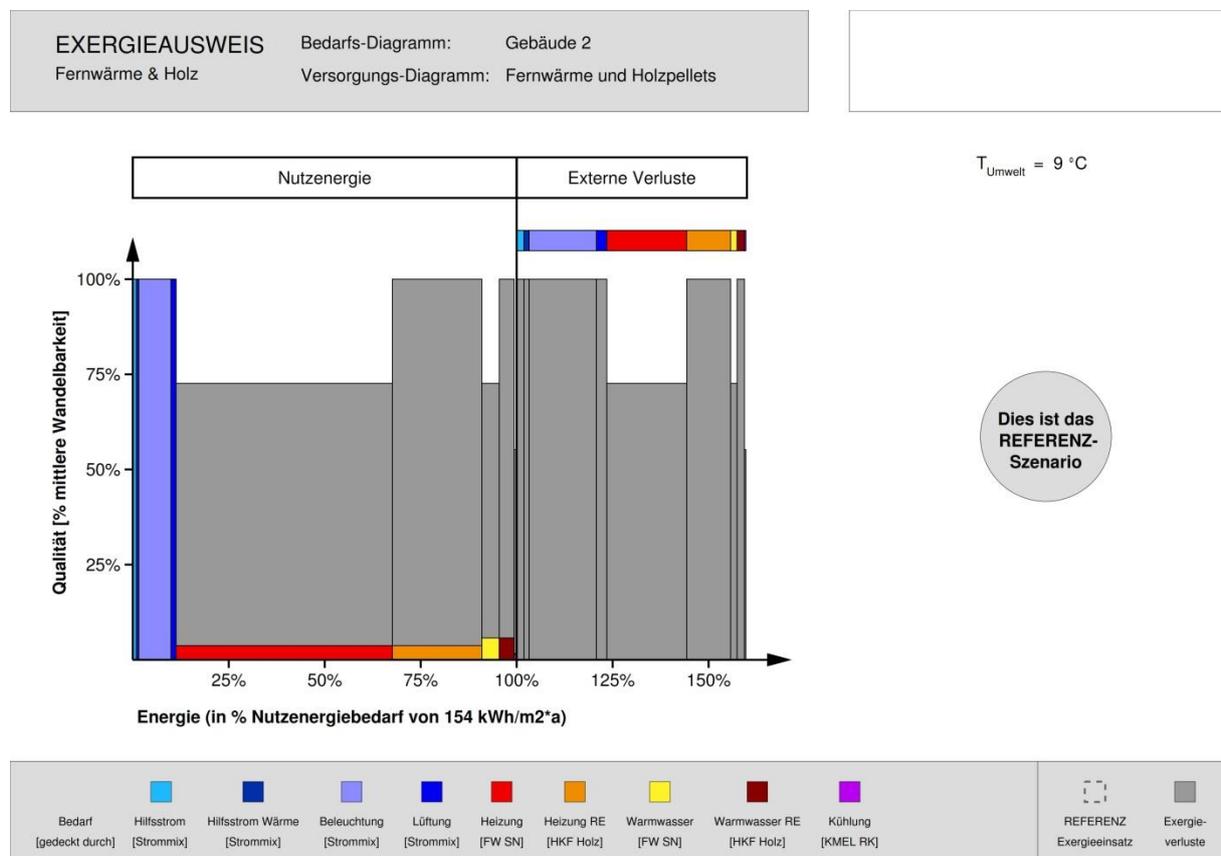
Tabelle 14: Zusammenfassung der Angaben zur Aufteilung des Energiebedarfs aus Abbildung 43 (tlw. korrigiert); (alle Angaben in kWh/(m²a))

	Heizung	Warmwasser	Beleuchtung	Lüftung	Kühlung inkl. Be- feuchtung	Gesamt
Nutzenergie	125,5	13,5	12,7	2,4	1,3	156,7
Endenergie	171,1	18,3	12,7	2,4	1,3	206,5
Primärenergie	100,2	9,8	34,2	6,4	3,4	154,0

Es wird deutlich, dass in diesem Energieausweis teilweise andere Informationen enthalten sind als in dem Energieausweis, welcher in dargestellt ist. So ist zum einen neben der Nutzenergie auch die Endenergie nach Verbrauchsarten aufgeführt. Zusätzlich sind alle Endenergiearten aufgeführt, welche diese Bedarfe decken. Dieses Gebäude hat weiterhin neben dem Heiz-, Warmwasser und Strombedarf auch noch je einen Beleuchtungs-, Lüftungs- und Kühlbedarf. Da es sich um ein Nicht-Wohngebäude handelt wird die Aufteilung des Energiebedarfs auch grafisch vorgenommen. Ebenso sind auf den vier dargestellten Farbskalen die Anforderungswerte aus der Energieeinsparverordnung eingetragen.

Der Exergieausweis für dasselbe Gebäude ist in Abbildung 45 aufgetragen.

Abbildung 45: Exergieausweis für ein Nicht-Wohngebäude entsprechend Abbildung 43 und 44, welches mit Fernwärme und Holzpellets beheizt wird.



Quelle: Exergieausweis Online 2013

Abkürzungen in Abbildung 45:

FW	Fernwärme
HKF	Heizkessel für Festbrennstoffe
KM	Kältemaschine
RK	Raumkühlung
SN	Stadtnetz
T	Temperatur

Wie beim Energieausweis kann auch hier bei Bedarf auf der rechten Seite eine Ergänzung um wichtige Zahlen in Textform vorgenommen werden. Auch hier fällt wieder die Diskrepanz in der Bewertung auf. Während im Energieausweis der Primärenergiebedarf sogar noch geringer ist als der Nutzenergiebedarf zeigt der Exergieausweis deutlich, dass ca. 70% mehr Primärenergie verbraucht wird als an Nutzenergie bezogen wurde. Durch die Vernachlässigung der

regenerativen Energien in der Bewertung wird die umfassende Einschätzung beim Energieausweis schwierig. Dieser Effekt tritt auch bei Fernwärme auf, die meist einen Primärenergiefaktor von deutlich unter 1 hat und somit, trotz Verlusten im Leitungsnetz, rechnerisch einen geringeren Primärenergieeinsatz im Vergleich zur Nutzenergie aufweist. Dies stellt wie bei der Bewertung erneuerbarer Energien einen Widerspruch zum Energieerhaltungssatz dar.

Der Exergieausweis kann als exergiebasiertes Bewertungswerkzeug die Vorteile welche aus der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) resultieren darstellen ohne physikalische Widersprüche zu erzeugen. Im Bereich Heizung ist die Energiequalität der Versorgung mit unter 75% wesentlich geringer als die 100% bei direkter Brennstoffnutzung. Die KWK bringt somit den Vorteil mit sich, dass sie eine Energienachnutzung erlaubt. Die Abwärme, welche aus physikalischen Gründen in Verbrennungskraftwerken unvermeidbar ist, wird dabei als Grundlage für die Wärmeversorgung genutzt. Diese Form der Energienachnutzung verbessert die Exergie-Effizienz der Gesamtanlage, der Stromerzeugung und der Wärmeversorgung. Und das trotz dem der Energieverbrauch gegenüber einem Gaskessel meist aufgrund von Leitungsverlusten erhöht ist. Auch die Aufteilung des Brennstoffes auf Wärme und Strom wird im Exergieausweis anders vorgenommen als im Energieausweis.

Der Energieausweis verwendet die bisher gesetzlich verordnete Stromgutschriftmethode zu diesem Zweck, welche alle Vorteile der Kraft-Wärme-Kopplung der Wärme zuschreibt (siehe auch Kapitel 7). Dies ist nicht nur kontrovers im Hinblick auf eine Bevorzugung der Wärme bei der Bewertung sondern auch langfristig problematisch, da sich die Primärenergiefaktoren mit der Veränderung des Deutschen Strommix regelmäßig ändern und somit auch die Energieausweise für Objekte mit Fernwärmeversorgung eine Gültigkeit von zum Teil weniger als fünf Jahren haben.

Der Exergieausweis verwendet eine exergiebasierte Methode der Brennstoffaufteilung, welche auf dem Prinzip beruht die Verluste des KWK Prozesses entsprechend der Produktexergie aufzuteilen. Dieses Verfahren liefert Ergebnisse, welche sich für die betrachtete Anlage nicht verändern, da keine frei wählbaren Referenzsysteme in die Bewertung eingehen.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass der Energieausweis ein sinnvoller erster Schritt in Richtung einer Gebäudekennzeichnung ist. Gleichzeitig weist er jedoch eine Reihe von problematischen Charakteristiken auf, welche zu Fehleinschätzungen führen können und ist entweder sehr Text-lastig oder auch visuell relativ kompliziert zu überblicken.

Hier kann die Verwendung des Exergieausweises sicherstellen, dass Gebäudesysteme besser verstanden werden. Durch seine umfassende Bewertungsmethodik sowie eine einheitliche, detailreiche und doch schnell zugängliche Darstellung kann er dazu beitragen auch bei komplexen Gebäudeenergiesystemen gut und fundiert zu entscheiden.

Neben der Charakterisierung einzelner Gebäude erlaubt es der Exergieausweis nahezu alle vorstellbaren Gebäudetechnikkombinationen wissenschaftlich mit einander im Hinblick auf den Primärenergie-Verbrauch und die Exergieausnutzung zu vergleichen. Dies soll im folgenden Kapitel exemplarisch demonstriert werden.

6.5 Technologievergleiche mit dem Exergieausweis: Wohngebäude

Das zentrale Anwendungsgebiet des Exergieausweises ist er Vergleich komplexer Gesamtsystemalternativen. Bevor ein Bauprojekt begonnen wird existieren üblicherweise verschiedenste Möglichkeiten wie dieses realisieren werden kann. So können Gebäude unterschiedlichsten Dämmstandards entsprechen und es stellt sich die Frage ob eine aktive Lüftung notwendig ist

und welche Technologie dafür genutzt werden soll. Zusätzlich stellt insbesondere die Auswahl eines geeigneten Wärmeerzeugers häufig ein Problem dar und letztlich sollte auch Kühlung und ggf. sogar die Haustechnik mitbetrachtet werden. Für all diese Technikbereiche existiert inzwischen eine Vielzahl technologischer Lösungen auf dem Markt. Bauherren haben daher oft die Qual der Wahl, in welche Richtung sie die Planungen vorantreiben sollen. Da es zu zeitaufwändig wäre alle Möglichkeiten detailliert zu planen bietet sich eine Vorabuntersuchung der zur Verfügung stehenden Optionen an. Hier können Studien mit dem Exergieausweis fundierte Entscheidungshilfe bieten. Um eine schnelle Erfassung der Veränderungen gegenüber der Referenz zu ermöglichen wird das zentrale Diagramm des Exergieausweises um eine Ampel ergänzt. Sie gibt die Primärenergie-Einsparung im Vergleich zur Referenz an. Dabei bedeutet „Rot“ eine Erhöhung des Primärenergie-Verbrauchs, Gelb eine Einsparung von bis zu 50% und Grün steht für 50% oder mehr Einsparungen. Die exakten Zahlenwerte sind jeweils in dem entsprechenden Ampellicht angegeben.

Im Folgenden sollen anhand eines Beispiels für ein einfaches Wohngebäude verschiedene Möglichkeiten der Wärmeversorgung und Dämmung untersucht werden. Die Abbildungen wurden mit Hilfe der Beta-Version von Exergieausweis Online erstellt (Exergieausweis Online 2013). In Abbildung 46 ist das Referenzszenario aufgetragen. Dieses ist prinzipiell frei wählbar. Hier wurden die Annahmen so gewählt, dass sie in etwa den Erfordernissen für ein Referenzgebäude gemäß der Energieeinsparverordnung 2009 (EnEV 2009) entsprechen.

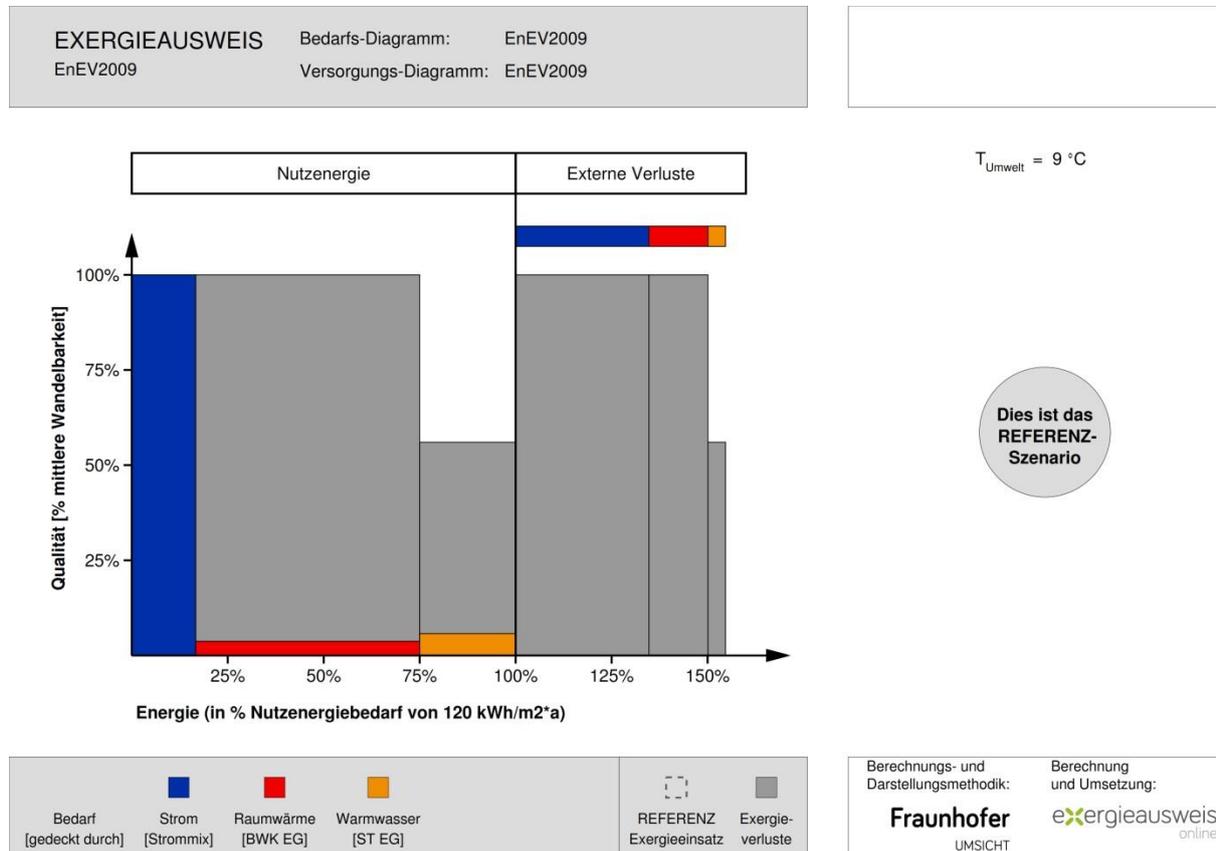
Der Nutzenergiebedarf des Gebäudes setzt sich gemäß Tabelle 15 zusammen.

Tabelle 15: Zusammenfassung der Angaben Nutzenergie für die folgenden Beispiele

	Raumwärme	Warmwasser	Strombedarf für Beleuchtung, Lüftung und Hausgeräte ²⁴	Gesamt
	kWh/m ² ·a	kWh/m ² ·a	kWh/m ² ·a	kWh/m ² ·a
EnEV2009	70	30	20	120
Passivhaus	15	30	20	65

²⁴ Der Strombedarf wurde hier als Gesamtpaket angesetzt, da an diesem für die vorgestellten Beispiele nichts geändert wird. Bei Bedarf können alle Strombedarfe jedoch einzeln ausgewiesen werden.

Abbildung 46: Exergieausweis für ein nach Energieeinsparverordnung 2009 gedämmtes Gebäude, welches mit einem Erdgas-Brennwertkessel beheizt wird. Das Brauchwarmwasser wird zu 60% mit Solarthermie erzeugt. Dies ist das Referenz-Szenario, mit welchem die folgenden Beispiele verglichen werden



Quelle: Exergieausweis Online 2013

Abkürzungen in Abbildung 46:

BWK Brennwertkessel

EnEV2009 gemäß Energieeinsparverordnung 2009

EG Erdgas

ST Solarthermie zur Deckung von 60% des Jahresbedarfes mit Gaskessel als Backup

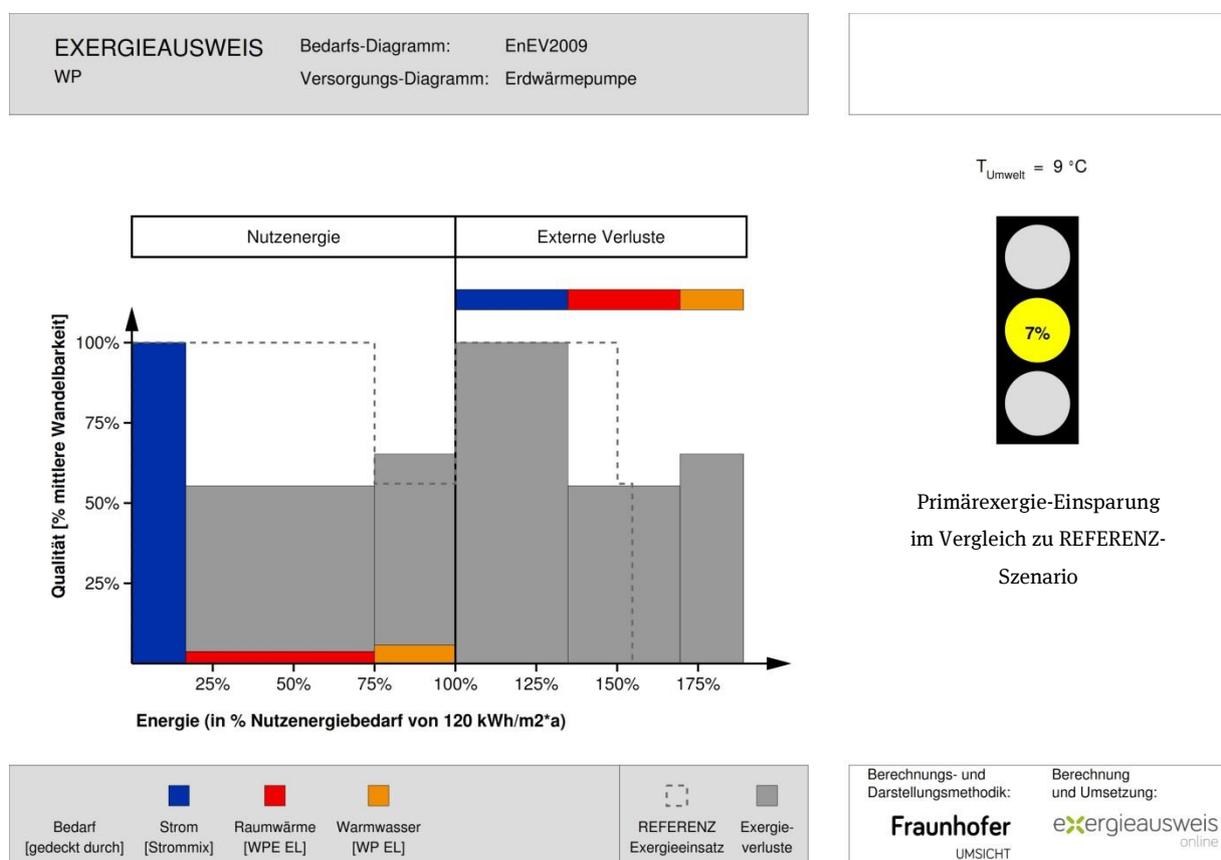
T Temperatur

Es wird deutlich, dass trotz des Einsatzes eines energetisch hocheffizienten Gasbrennwertkessels und Solarthermie noch großes Potential für Verbesserungen besteht. Die graue Fläche (Verluste) ist mehr als acht Mal größer als die farbig markierte (Bedarf). Auffällig ist, dass die

Energiequalität für die Versorgung der Heizung viel zu hoch ist. Die Einkopplung der Solarthermie für die Warmwasserbereitung bringt eindeutige Vorteile mit sich, da die mittlere Qualität der Versorgung gesenkt wird und auch die „Externen Verluste“ dadurch reduziert werden können. Im Hinblick auf die elektrische Energie fallen die großen externen Verluste auf. Sie ergeben sich aus der verhältnismäßig geringen elektrischen Effizienz der Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen.

In Abbildung 47 wurde angenommen, dass das gleiche Gebäude mit einer Erdsonden-Wärmepumpe versorgt wird.

Abbildung 47: Exergieausweis für ein nach Energieeinsparverordnung 2009 gedämmtes Gebäude, welches mit einer Erdwärmepumpe beheizt wird. Im Vergleich zur Referenz ist dieses Szenario um 7% Primärenergie-schonender.



Quelle: Exergieausweis Online 2013

Abkürzungen in Abbildung 47:

EL Elektrisch

WPE Effiziente Wärmepumpe, z.B. eine Erdsonden Wärmepumpe

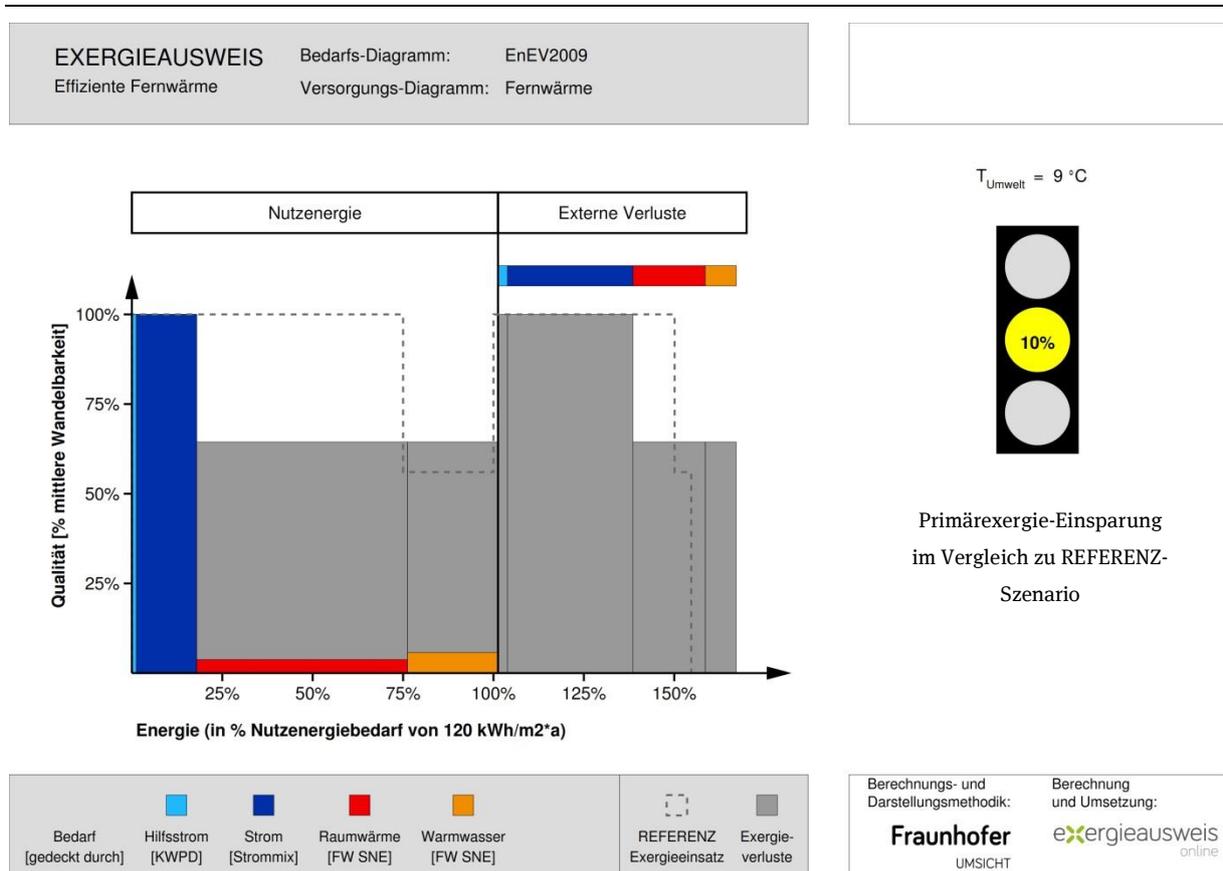
WP Wärmepumpe mit einer gewöhnlichen Jahresarbeitszahl oder Betrieb einer effizienten Wärmepumpe für die Erzeugung von Trinkwarmwasser

T Temperatur

In Abbildung 47 wird deutlich, dass auch trotz größerer energetischer Verluste letztlich Primärenergie eingespart werden kann. Die Wärmepumpe nutzt elektrischen Strom für Ihren Antrieb und ist somit auch für höhere externe Verluste verantwortlich als der Gasbrennwertkessel. Durch die Nutzung von Umweltwärme ist jedoch die mittlere Energiequalität der Primärenergie welche die Wärmepumpe für die Heizwärmeerzeugung einsetzt um mehr als 40% geringer als die von Brennstoffen. Für die Warmwasserbereitung wiederum ist die Wärmepumpe aufgrund mit steigender Bedarfstemperatur abnehmenden Jahresarbeitszahl weniger geeignet als eine Solarthermische Anlage mit Gaskesselunterstützung.

In Abbildung 48 wird nun bewertet, welche Effekte auf den Primärenergie-Verbrauch durch den Anschluss an die Fernwärme eines effizienten Städtetzes zu erwarten sind.

Abbildung 48: Exergieausweis für ein nach Energieeinsparverordnung 2009 gedämmtes Gebäude, welches mit Fernwärme aus einem effizienten Städtetz beheizt wird. Im Vergleich zur Referenz ist dieses Szenario um 10% Primärenergie-schonender.



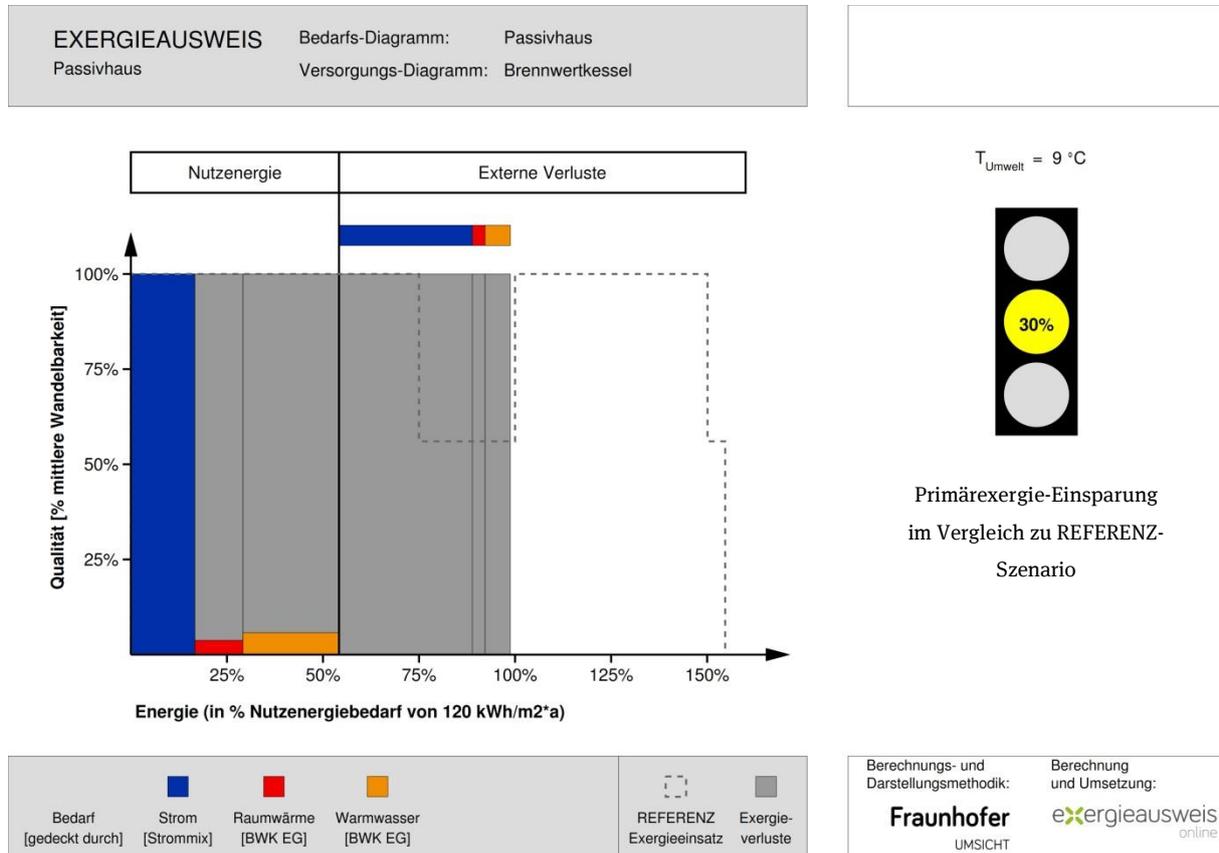
Quelle: Exergieausweis Online 2013

Abkürzungen in Abbildung 48:

FW	Fernwärme
SNE	Effizientes Stadtnetz
KWPD	Kraftwerkspark Deutschland – entspricht dem Strommix
T	Temperatur

Auch die Versorgung mit Hilfe effizienter Fernwärme führt letztlich zu einem leicht erhöhten Einsatz an Primärenergie im Vergleich zum Referenzszenario. Jedoch sind auch hier Einsparungen in der Dimension der Energiequalität festzustellen. Diese ergeben sich aus der Tatsache, dass der Großteil der effizienten Fernwärme mit Hilfe von hocheffizienter Kraft-Wärme-Kopplung erzeugt wird. Diese Technologie nutzt die Abwärme, welche in Verbrennungskraftwerken unvermeidbar ist als Grundlage für Wärmeversorgung. Es wird somit nur eine verhältnismäßig geringe Menge zusätzlicher Brennstoff benötigt um die Abwärme die mindestens bei Umgebungstemperatur abgegeben werden kann auf die benötigte Temperatur „anzuheben“. In Abbildung 49 ist der Exergieausweis für ein Passivhaus mit Brennwertkessel dargestellt.

Abbildung 49: Exergieausweis für ein Passivhaus, welches mit einem Brennwertkessel beheizt wird. Im Vergleich zur Referenz ist dieses Szenario um 30% Primärenergie-schonender.



Quelle: Exergieausweis Online 2013

Abkürzungen in Abbildung 49:

BWK Brennwertkessel

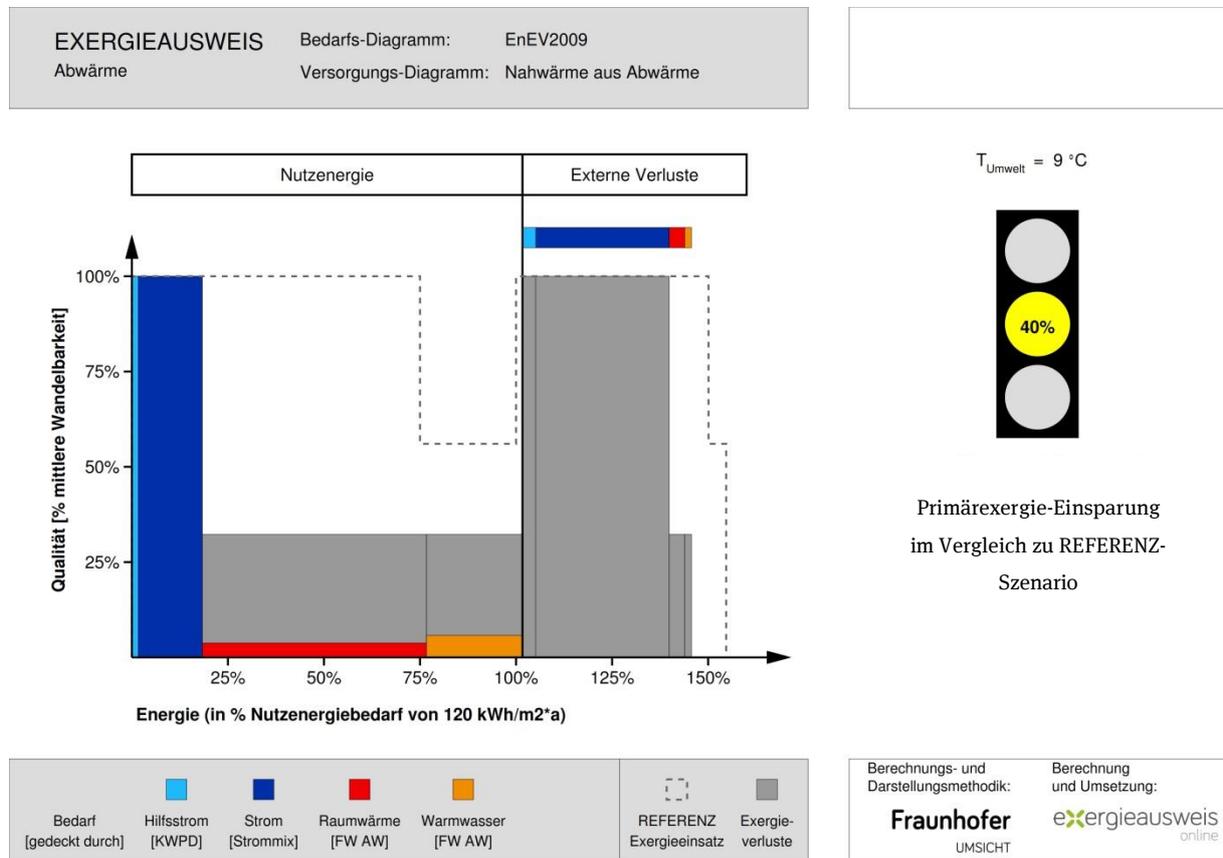
EG Erdgas

T Temperatur

Im Vergleich zur Referenz, hat dieses System einen um mehr als 30% reduzierten Nutzenergiebedarf. Auch wenn offensichtlich wird, dass der Verzicht auf die Solarthermie im Vergleich zur Referenz nachteilig ist, so ergibt sich durch die starke Dämmung auf Passivhausstandard dennoch eine hohe Primärenergie-Einsparung für das Gesamtsystem.

In Abbildung 50 ist im Vergleich dazu das Referenzgebäude dargestellt, welches mit Nahwärme aus Abwärme versorgt wird.

Abbildung 50: Exergieausweis für ein nach Energieeinsparverordnung 2009 gedämmtes Gebäude, welches mit Nahwärme aus industrieller Abwärme beheizt wird. Im Vergleich zur Referenz ist dieses Szenario um 40% Primärenergie-schonender.



Quelle: Exergieausweis Online 2013

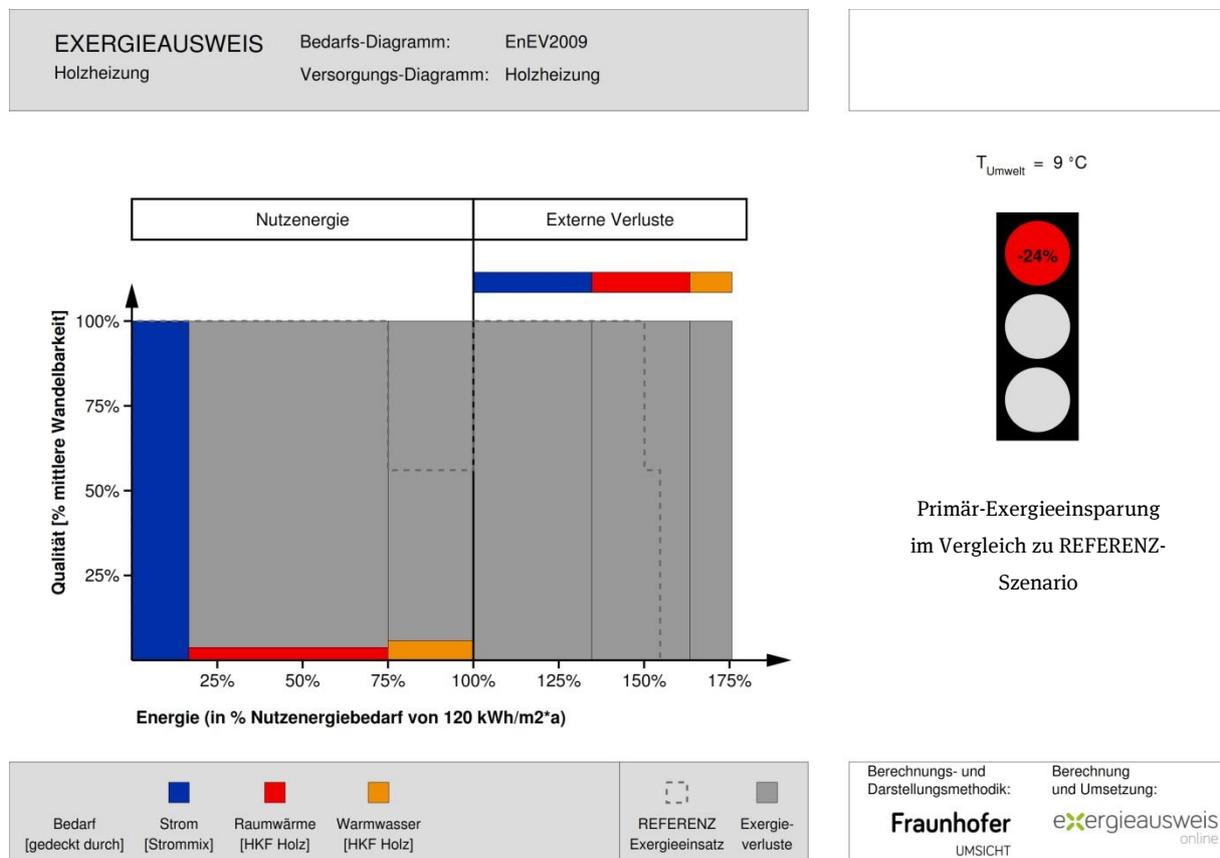
Abkürzungen in Abbildung 50:

AW	Abwärme
EnEV2009	gemäß Energieeinsparverordnung 2009
FW	Fernwärme (Nahwärme ist letztlich nur ein anderes Wort für Fernwärme mit verhältnismäßig kurzen Leitungslängen)
KWPD	Kraftwerkspark Deutschland – entspricht dem Strommix
T	Temperatur

Hier wird offensichtlich, dass auch ohne stärkere Dämmung ein stark verringerter Exergiebedarf erreicht werden kann. Durch die Nutzung industrieller Abwärme im Rahmen einer Nahwärmeversorgung wird hier eine sehr geringe Energiequalität der Primärenergie für die Wärmeversorgung erreicht. Mit ca. 30% Energiequalität ist die Abwärme für die Wärmeversorgung mehr als drei Mal angemessener als der Einsatz von Erdgas. Auch prinzipiell lässt sich das Ergebnis gut nachvollziehen. Die Nutzung von nicht vermeidbaren „Abfallenergieströmen“ verursacht keinen zusätzlichen Druck auf die primären Ressourcen und hat dadurch einen ähnlich starken Effekt auf den Primärenergie-Verbrauch, als würde man durch Bedarfsabsenkung (z.B. Dämmung) wesentlich weniger Energie benötigen. Doch auch die Abwärme bei Temperaturen über der Umgebungstemperatur hat noch einen gewissen Wert, denn sie kann im Idealfall zu einem kleinen Anteil in Strom umgewandelt werden. Daher wird die Energiequalität der Abwärme physikalisch genau berücksichtigt.

In Abbildung 51 ist die Versorgung des Referenzgebäudes mit einer Holzheizung dargestellt.

Abbildung 51: Exergieausweis für ein nach Energieeinsparverordnung 2009 gedämmtes Gebäude, welches mit Nahwärme aus industrieller Abwärme beheizt wird. Im Vergleich zur Referenz verbraucht dieses Szenario 24% mehr Primärenergie.



Quelle: Exergieausweis Online 2013

Abkürzungen in Abbildung 51:

HKF Heizkessel für Festbrennstoffe

T Temperatur

Hier wird offensichtlich, dass der Einsatz erneuerbarer Energien vom Standpunkt des Primärenergie-Verbrauchs nicht immer vorteilhaft ist. Heizkessel für Festbrennstoffe haben eine geringere Effizienz als Gasbrennwertkessel. Ihr Einsatz führt daher zu größeren Verlusten. Da Holz wie auch Erdgas und andere fossile Energieträger eine Energiequalität von 100% hat, ist der Einsatz dieser Biomasse aus Effizienzgründen kein Vorteil. Wird der Exergieausweis um eine Bewertung der CO₂-Emissionen ergänzt, zeigt sich jedoch der Klimaschutzeffekt dieses erneuerbaren Brennstoffes.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der Exergieausweis es ermöglicht verschiedene Gebäudesystemalternativen gegenüberzustellen und Ihre Unterschiede im Hinblick auf den verursachten Primärenergie-Verbrauch exakt und leicht nachvollziehbar zu bewerten. Wird die Betrachtung der Primärenergie mit einer Bewertung der CO₂-Emissionen und der Energiekos-

ten²⁵ ergänzt, bietet der Exergieausweis eine fundierte und leicht überschaubare Grundlage zur Einschätzung der wesentlichsten Aspekte Gebäudesystemalternativen.

6.6 Ausblick: Der Exergieausweis in Zukunft

Der Exergieausweis wird von Richtvert | Energiesystemberatung ständig weiterentwickelt. So soll der Exergieausweis um die Angabe der durch ein Gebäudeenergiesystem im Betrieb verursachten CO₂-Emissionen und Energiekosten ergänzt werden. Da es für viele Anwender schwierig ist den Begriff Exergieverbrauch und Exergieausnutzung zu verstehen wird im Exergieausweis von Richtvert der Ressourcenbegriff eingeführt. Als Ressource wird laut Duden "ein natürlich vorhandener Bestand von etwas" verstanden. Jeder Rohstoff (Energieträger, Metalle...), der in seiner Konzentration, Temperatur oder Druck nicht den Durchschnittswerten der Referenzumwelt entspricht, kann mit Hilfe der Exergie auf eine universale Größe umgerechnet werden. Somit eignet sich das Exergiekonzept besonders gut, um den natürlichen Bestand bzw. die dem natürlichen Bestand entnommenen Stoff- und Energieströme mit Hilfe einer universalen Größe zu bewerten.

Die Umschreibung des Primärenergie-Einsatzes mit Ressourceneinsatz²⁶ führt schlüssig zur Bezeichnung der Exergieausnutzung als Ressourcenausnutzung.. Dabei ist zu beachten, dass diese ein Maß für die exergetische Güte des Versorgungssystems ist und für sich genommen keinen Rückschluss auf den Ressourceneinsatz erlaubt, da die Effizienz bei gleichbleibenden technischen Parametern grundsätzlich Verbrauchsmengen-unabhängig ist.

Vor diesem Hintergrund wurde ein Entwurf für einen erweiterten Exergieausweis entwickelt.

Das Prinzip des zentralen Diagramms bleibt erhalten, allerdings wurde das Format auf Hochkant verändert und zusätzliche Informationen wie Ressourceneinsatz, Ressourcenausnutzung, CO₂ Ausstoß und Kosten für den Energieeinkauf hinzugefügt. In Abbildung 52 ist ein beispielhafter erweiterter Exergieausweis als Referenzszenario dargestellt.

Zusätzlich zur Erweiterung um vier Kennwerte sollte auch die Ampelbewertung erweitert werden, da Klimaschutz und Kosten neben dem Ressourcenschutz eine ebenso zentrale Rolle bei der Bewertung von Technologien spielen. Zu diesem Zweck wurden in Abbildung 53 zwei weitere Ampeln hinzugefügt, welche nach dem gleichen Prinzip funktionieren wie auch schon die Ampel für die Ressourceneinsparungen. Die Angabe der Kosten steht dabei in Klammern, da im Gegensatz zum Ressourcenverbrauch und den CO₂ – Ausstoß die Kosten für den Energieeinkauf nicht das abschließende sondern nur ein informatives Bewertungskriterium darstellen.

²⁵ Das oberste wirtschaftliche Entscheidungskriterium sollten die Lebenszykluskosten sein. Da jedoch meist detaillierte Planungen für deren Berechnung erforderlich sind, ist deren Berechnung nicht auf der gleichen Datengrundlage wie für Primärenergieverbrauch und CO₂ Emissionen möglich. Stattdessen können die Kosten für den Energieeinkauf als informative wirtschaftliche Größe für eine Vorauswahl ergänzend dargestellt werden.

²⁶ Der gesamte Ressourceneinsatz kann auf Basis von Ökobilanzdaten für den Lebenszyklus berechnet werden. Meist sind die Daten hierfür jedoch nicht verfügbar. Daher bewertet der Exergieausweis vorrangig die durch den Betrieb entstehenden Effekte die aus der Nutzung stofflicher und energetischer Ressourcen entstehen.

Abbildung 52: Entwurf für das Referenzszenario eines erweiterten Exergieausweises, welcher zusätzlich die Werte für Ressourceneinsatz, Ressourcenausnutzung, CO₂-Emissionen und Kosten für den Energieeinkauf angibt

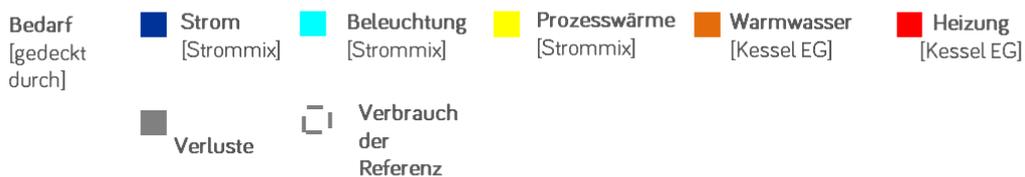
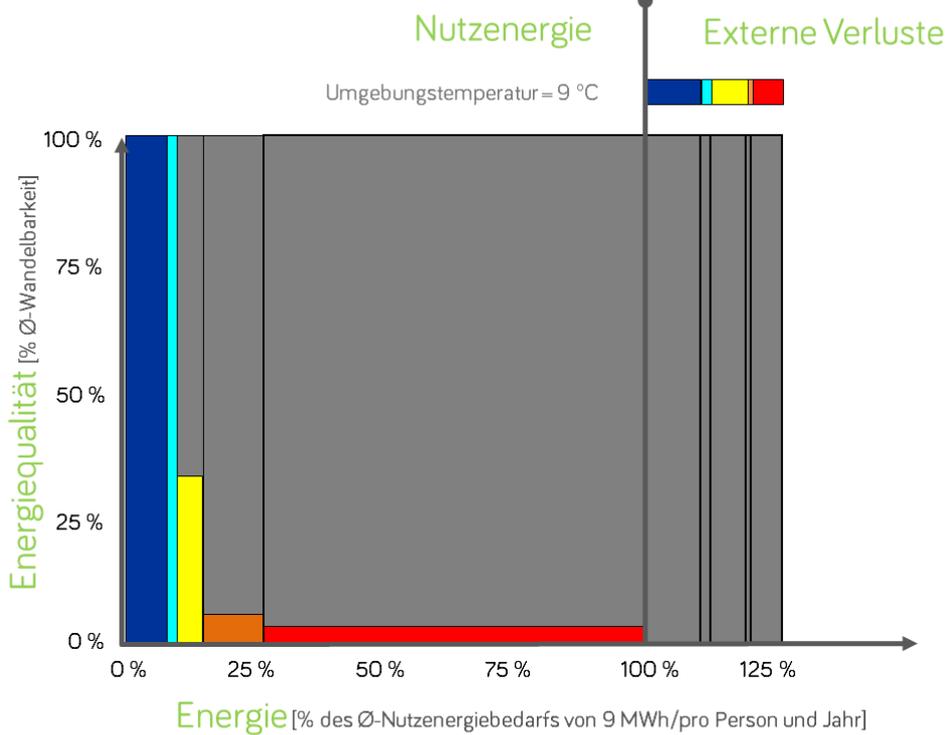


Dies ist die Referenz-Variante

Zusammenfassung der Ergebnisse	Ressourcen	CO ₂	(Kosten)*
	Verbrauch: 11,7 MWh/pP*a	Ausstoß: 2,9 t/pP*a	Energieeinkauf: 720 €/pP*a
	Ausnutzung: 10,5%		*Teil der Gesamtkosten

Bedarf: Durchschnittsgebäude BRD 2008

Versorgung: Wärme aus Gaskessel

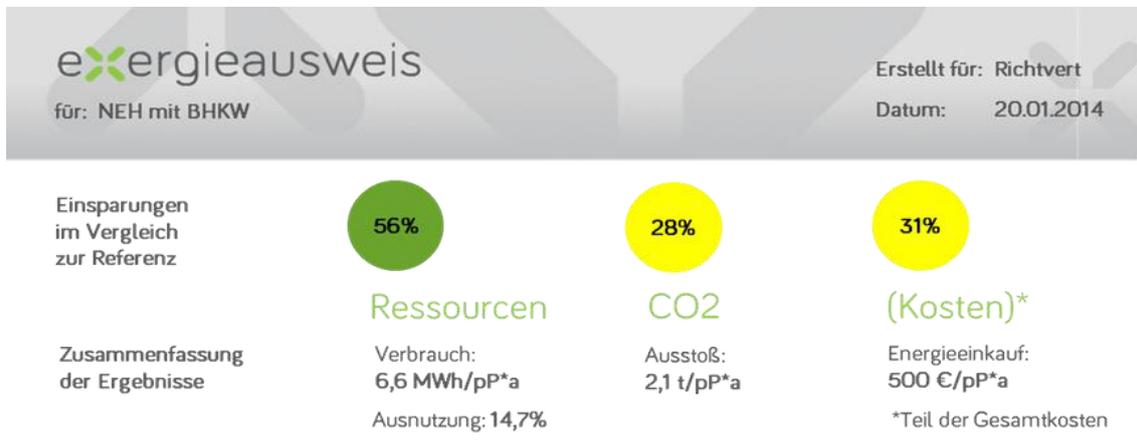


Berechnung: Richtvert

Darstellung Richtvert

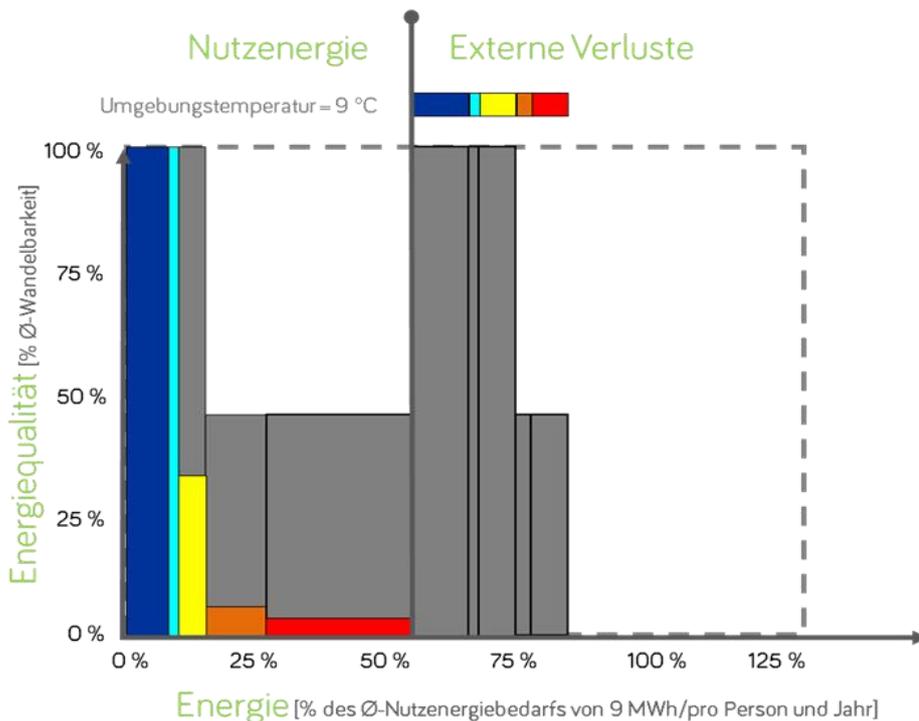
Quelle: Richtvert

Abbildung 53: Entwurf für eine Variante als erweiterter Exergieausweises, welcher zusätzlich die Werte für Ressourceneinsatz, Ressourcenausnutzung, CO₂-Emissionen und Kosten für den Energieeinkauf angibt. Zusätzlich zur Ampel, welche anzeigt wie viele Ressourcen gespart werden, sind Ampeln ergänzt worden, welche die Einsparungen an CO₂-Emissionen und Kosten für den Energieeinkauf im Vergleich zum Referenz-Szenario angeben.



Bedarf: Niedrigenergiehaus 2009

Versorgung: Wärme aus BHKW



Es wird offensichtlich, dass die dargestellte Option mehr Ressourceneinspareffekte als Klimaschutzeffekte oder verringerte Kosten mit sich bringt. Das zeigt auch, dass die drei Kriterien nicht proportional voneinander abhängen sondern nur verknüpft sind. So werden die CO₂-Emissionen auf Basis des Ressourcenverbrauchs berechnet und die Kosten für den Energieeinkauf unter Berücksichtigung von Ressourcenverbrauch, CO₂-Emissionen und Markteffekten.

Die Kosten für den Energieeinkauf berücksichtigen wesentliche wirtschaftliche Faktoren wie Investitions- oder Wartungskosten nicht. Deshalb sollten in dieser Darstellung die Kosten für den Energieeinkauf durch die Kosten über die gesamte Lebensdauer ersetzt werden, falls diese Daten verfügbar sind.

Durch die parallele Darstellung der einzelnen Kriterien in den Ampeln und den Verzicht auf eine Verrechnung mit Hilfe von Wichtungsfaktoren ist es dem Nutzer selbst überlassen, welche Prioritäten er bei seiner Entscheidung setzt. Studien mit dem Exergieausweis bieten somit eine gute Grundlage um Grundsatz-Entscheidungen in Bezug auf kommunale Bauprojekte frei, fundiert und nachvollziehbar zu treffen.

7 Allokation von Koppelprodukten in KWK-Anlagen

Für die Beurteilung der Effizienz von kraft-wärmegekoppelten Anlagen und die Allokation von Primärenergie und Emissionen auf die Zielenergien existieren unterschiedliche Verfahren (siehe z.B. /VDI 4608-2/). Um modellhafte Energiesysteme und reale Strom-Wärmesysteme berechnen und vergleichen zu können, muss daher zuerst eine geeignete Methodik ausgewählt werden.

Da das vorliegende Projekt die Nutzung von Exergieströmen im Fokus hat, ist es folgerichtig, auch die Zuordnung (Allokation) der Emissionsfrachten auf die Koppelprodukte Strom und Wärme exergetisch vorzunehmen. Diese Betrachtungsweise hat sich allerdings noch nicht vollständig auf dem Markt durchgesetzt²⁷. Vielmehr tritt diese Betrachtungsweise dabei in Konkurrenz zu Allokationsmethoden, die entweder unzureichend (finnische Methode – siehe Kapitel 7.6) oder unvollständig (Dresdener Methode – siehe Kapitel 7.5) die Energiequalität berücksichtigen. Für den öffentlich-rechtlichen Nachweis nach der Energieeinsparverordnung (EnEV) wird nach der Stromgutschriften-Methode (siehe Kapitel 7.7) allokiert.

Die unterschiedlichen Verfahren führen zu recht unterschiedlichen Ergebnissen. Deshalb werden im Folgenden relevante Verfahren vorgestellt und mit der exergetischen Allokationsmethode (Carnot-Methode) verglichen.

7.1 Überblick über Allokationsmethoden

Wird in einem Kraftwerk neben Strom auch Wärme produziert (KWK-Anlagen), sinkt häufig der elektrische Wirkungsgrad der Anlage durch die Wärmeauskopplung. Um diesen Stromverlust in den entsprechenden Anlagen ausgleichen zu können, müsste zusätzlicher Brennstoff eingesetzt werden. Es erscheint daher naheliegend eine Allokationsmethode zu nutzen, welche diesen häufigen Zusammenhang als Grundlage nimmt. Diese Methode wird allgemein als Stromverlust-Methode oder Brennstoffmehraufwand-Methode bezeichnet. Allerdings ist diese Methode nicht immer einsetzbar. So ist der Stromwirkungsgrad bei einem Motor-BHKW unabhängig von der Wärmeauskopplung. Auch kann bei komplexen Kraftwerkskonfigurationen der Stromverlust nicht mehr direkt ermittelt werden. Unter Umständen sind die Kraftwerksdaten auch intern und werden nicht an Externe herausgegeben. Daher wäre es vorteilhaft, eine Allokationsmethode zu haben, die mit wenigen Daten auskommt und trotzdem möglichst gut fundiert ist.

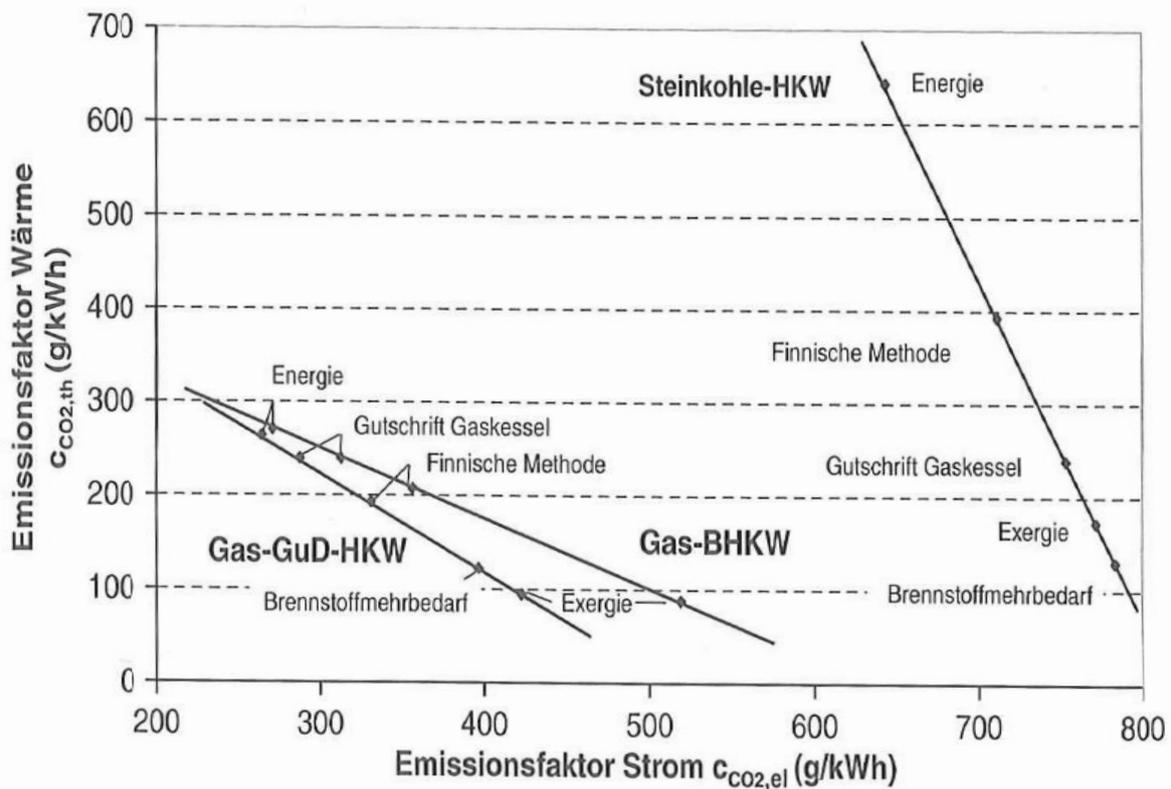
Neben der Abbildung des praktischen Mehraufwandes für die Wärmeauskopplung aus spezifischen Heizkraftwerken, wurden verschiedene Methoden entwickelt, die auf einem Systemvergleich aufbauen. So wird bei der Gutschriftenmethode über ein Vergleichssystem (Wärme oder Strom) die Zuordnung geschaffen. Bei anderen Methoden werden Vergleiche mit Wärme- und Stromsystemen dargestellt (Referenzmethoden).

²⁷ Es ist zu beobachten dass die exergetische Allokation bzw. die Carnot-Methode zunehmend an Anwendern gewinnt. So wird in der kommenden Richtlinie des AGFW zur Berechnung der Primärenergiefaktoren die Carnot-Methode empfohlen (AGFW 2014). Ebenso wird die exergetische Allokation im Rahmen des Entwurfs zur VDI Richtlinie 4800 zur Ressourceneffizienz (VDI 2014) vorgeschlagen. Sie ist bereits in der VDI Norm 4680 (VDI 2008) als eine Möglichkeit zur Kostenallokation aufgeführt und wird in diversen wissenschaftlichen Publikationen verwendet z.B. (Rosen 2008, Jentsch 2010, Bargel 2010).

Bei (Pehnt 2010) wurden die Emissionsfaktoren Strom und Wärme der verschiedenen Methoden statisch (bei festem Wirkungsgrad je Technik) verglichen:

Es zeigt sich (siehe **Abbildung 54**), dass im direkten Vergleich die Emissionsfaktoren der Exergie-Methode am nächsten an die Brennstoffmehrbedarf-Methode (deren Anwendung sich aus Sicht des Kraftwerksprozesse leicht begründen lässt) heran kommen.

Abbildung 54: Vergleich verschiedener Berechnungsverfahren für Emissionsfaktoren



Quelle: Pehnt (2010)

7.2 Sensitivität der Allokations-Methoden

Für einen bestimmten Auslegungspunkt von KWK-Anlagen (z.B. 30% elektrischer und 50% thermischer Wirkungsgrad) ergeben sich bereits, wie oben dargestellt, sehr unterschiedliche Allokationsergebnisse. Den „Härtetest“ erfahren diese Methoden allerdings erst, wenn die Methoden auf ihre Sensitivität bezüglich veränderter Wirkungsgrade unterzogen werden. Daher wird im Folgenden bei jeder Methode der elektrische Wirkungsgrad der KWK-Anlage von 10% bis 70% bei gleichem Gesamtwirkungsgrad variiert. Für den jeweiligen Wirkungsgrad wurde der Emissionsfaktor für Wärme und Strom sowie den Anteil der beiden Energiearten an der gesamten Emissionsfracht der KWK Anlage berechnet. Die einzelnen Methoden werden kurz erläutert und die Grafiken mit der Wirkungsgradvariation vorgestellt. Die Emissionsfaktoren sind dabei als Linien, die Anteile an der Emissionsfracht als Fläche dargestellt. Vereinfacht wird hier analog nach (Mauch 2010) eine gasgefeuerte KWK mit einem CO₂-Emissionsfaktor von 200g/kWh_{EE} angenommen. Bezugsgröße ist die kWh frei Kraftwerk, d.h. ohne Netz oder sonstige nachgelagerte Verluste.

Folgende Methoden werden berücksichtigt:

- Carnot-Methode (auch als Exergie-Methode bezeichnet)
- Gutschriftverfahren
- Finnische Methode
- Kalorische Methode/IEA Methode
- Wirkungsgradmethode (nach Mauch 2010)
- Dresdener Methode
- Exergieverlust-Methode

7.3 Brennstoffmehrbedarf bzw. Arbeitswert-Methode

Es ist naheliegend die Aufteilung nach dem Verursacher-Prinzip vorzunehmen: Der zusätzlich gewonnenen Wärme wird nur der Mehrbedarf an Brennstoff zugerechnet, der durch die Auskopplung verursacht wird. Dies geschieht über die Stromverlustkennzahl:

$$\beta = \frac{\Delta W_{el}}{Q_{th,KWK}}$$

Wobei ΔW_{el} dem Strom entspricht, der vom entnommenen Prozessdampf erzeugt worden wäre. Die CO₂ Zuordnung ergibt sich dann zu:

$$spez\ CO_2, th = \beta\ CO_2, el, ohnekwk$$

Die Emissionen des Stroms entsprechen bei dieser Methode den Emissionen ohne Wärmeauskopplung. Allerdings werden heutige KWK-Anlagen mit Wärmeauskopplung geplant und die Bestimmung der Emissionen ohne Wärmeauskopplung ist letztlich nur über Referenzsysteme möglich. Diese bringen jedoch wieder einen Unsicherheitsfaktor in die Berechnungen. Darüber hinaus ist diese Methode für BHKW mit Motoren nicht anwendbar, da hier der Wirkungsgradverlust und somit der Brennstoffmehrbedarf vernachlässigbar ist.

7.4 Carnot-Methode / Exergie-Methode

Das IFEU verwendet zur Allokation von Koppelprodukten bei KWK-Prozessen in Kommunen und Betrieben seit etwa 1990 die exergetische Methode bzw. Exergie-Methode (auch Carnot-Methode genannt). Bei der Exergie-Methode (vgl. Pehnt 2010) wird neben der Quantität auch die Qualität der Energie physikalisch exakt berücksichtigt.

Die Carnot-Methode ist eine einfache, physikalisch basierte Methode, bei der lediglich Input, Output der KWK-Anlagen inkl. Temperaturniveau der Wärme und der Referenzumgebung benötigt werden. Sie ist nicht von frei wählbaren Referenzsystemen abhängig und daher nur auf den tatsächlich betrachteten Koppelprozess bezogen²⁸. Ein weiterer Vorteil der Carnot-Methode

²⁸ Interessanterweise lässt sich die Carnot-Methode auch als Referenzmethode wie z.B. der finnischen Methode begreifen. Im Unterschied zu letzterer erfolgt die Referenzfestlegung jedoch nicht willkürlich und verhandelbar sondern physikalisch konsistent. Dabei ist letztlich die absolute Effizienz der Referenzsysteme unerheblich. Die Carnot-Methode legt ausschließlich fest, dass beide Referenzsystem in gleicher Weise physikalisch ausgereift sein müssen. D.h. sie haben den gleichen Gütegrad bezogen auf das ideale Stromerzeugungssystem (ideale Brennstoffzelle – Exergie-Ausnutzung = 100%) und zum idealen Wärmeerzeugungssystem (ideale Wärmepumpe – Exergie-Ausnutzung = 100%, Temperaturabhängige Jahresarbeitszahl). Die Carnot-Methode ist somit nicht nur theoretisch

ist die Anwendbarkeit auf Abwärmenutzung und Fernwärme-Systeme mit LowEx-Kaskadennutzung. Es können daher z.B. auch den Wärmeströmen aus der Industrie, die nicht aus KWK-Prozessen stammen, oder der Wärmeentnahme aus dem Rücklauf eines Fernwärmesystems Emissionsfrachten eindeutig zugeordnet werden.

Die Exergie eines Wärmestroms wird über den Carnot-Faktor bestimmt:

$$\eta_c = 1 - \frac{T_u}{T_A}$$

Wobei T_A die durchschnittliche Temperatur des Wärmestroms in der Einheit Kelvin ist; im Fall eines Fernwärmesystems lässt sich diese über die thermodynamische Mitteltemperatur berechnen. T_u ist die Temperatur der Referenzumgebung.

Bei der Carnot-Methode werden neben den Temperaturen zusätzlich nur noch der elektrische und thermische Nutzungsgrad benötigt.

Der Allokationsfaktor für die Stromauskopplung ergibt sich dann aus:

$$a_{el} = \frac{\eta_{el}}{\eta_{el} + \eta_c \eta_{th}}$$

Äquivalent ergibt sich der thermische Allokationsfaktor zu (Rosen 2008, Pehnt 2010, Jentsch 2010):

$$a_{th} = \frac{\eta_c \eta_{th}}{\eta_{el} + \eta_c \eta_{th}}$$

Folgende Abbildung zur Kaskadennutzung zeigt den Carnot-Faktor in Abhängigkeit zur zu Grunde liegenden (Mittel-)Temperatur des Mediums.

gut fundiert, sondern auch in Bezug auf praktische Referenztechnologien sinnvoll einsetzbar (Jentsch 2014).

Abbildung 55: Abhängigkeit des Carnot-Faktors von der Temperatur

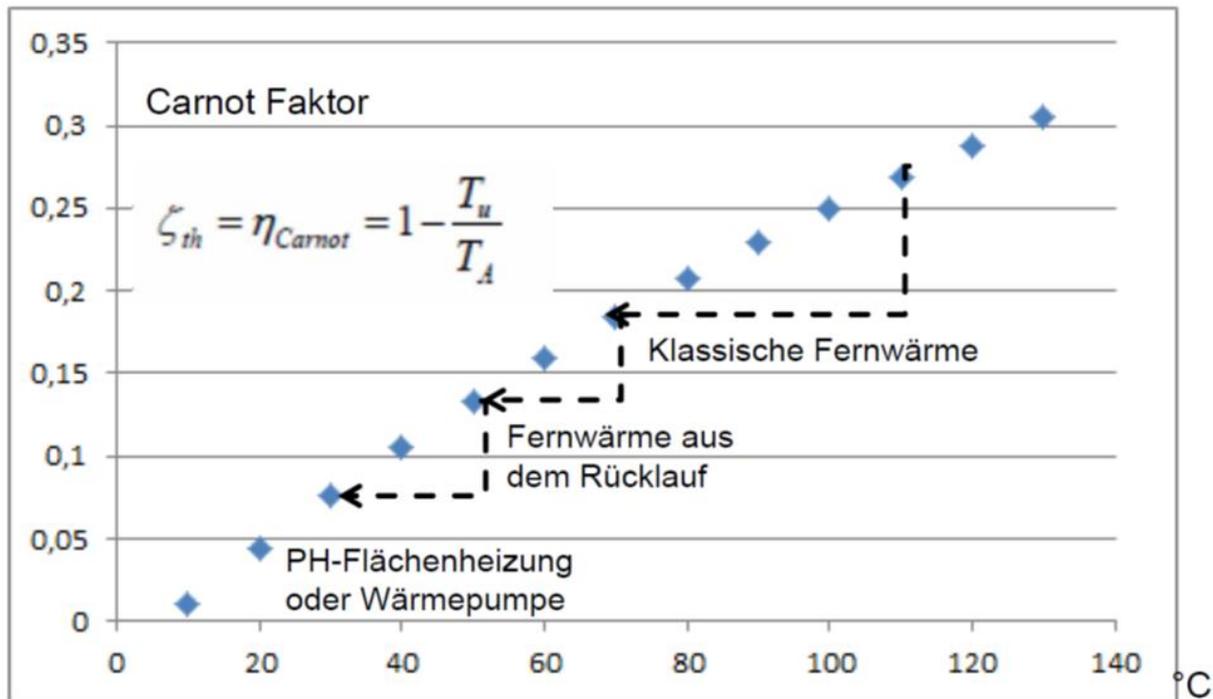
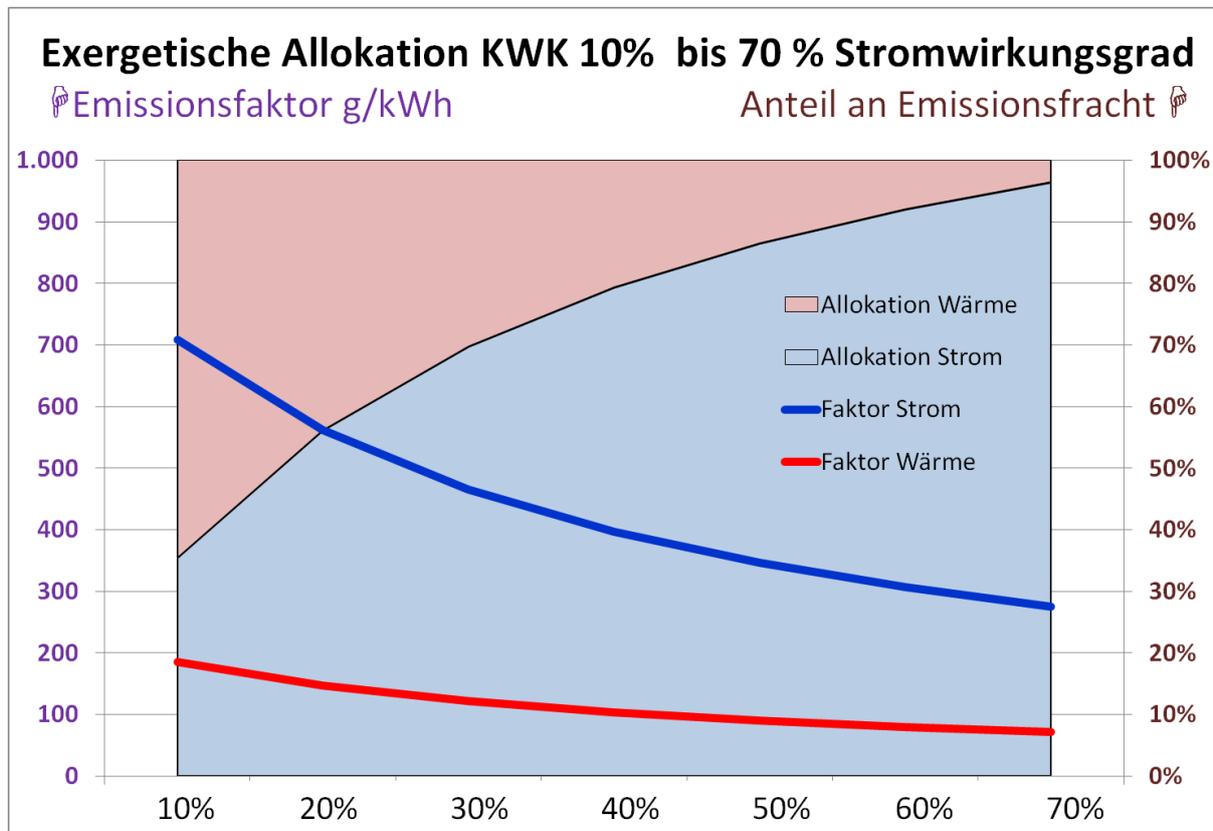


Abbildung 56 zeigt die Emissionsfaktoren Strom und Wärme der exergetischen Allokationsmethode (Carnot-Methode) in Abhängigkeit vom Stromwirkungsgrad der Anlage an. Dabei wurde vereinfacht (Mauch 2010) eine gasgefeuerte KWK mit einem CO₂-Emissionsfaktor von 200g/kWh_{EE} für den Brennstoff Erdgas angenommen²⁹.

²⁹ Das IFEU rechnet sonst mit Emissionsfaktoren einschließlich Vorketten und äquivalenten Emissionen.

Abbildung 56: Emissionsfaktoren Strom und Wärme der exergetischen Allokationsmethode in Abhängigkeit vom Stromwirkungsgrad



7.5 Dresdener Methode

Auch die Dresdener Methode basiert grundsätzlich auf einer exergetischen Berechnung, die allerdings mit einem Gütefaktor ergänzt wird. Die Brennstoffe und somit auch die Emissionen werden über den aus der Wärme im praktischen Idealfall erzeugbaren Strom gewichtet:

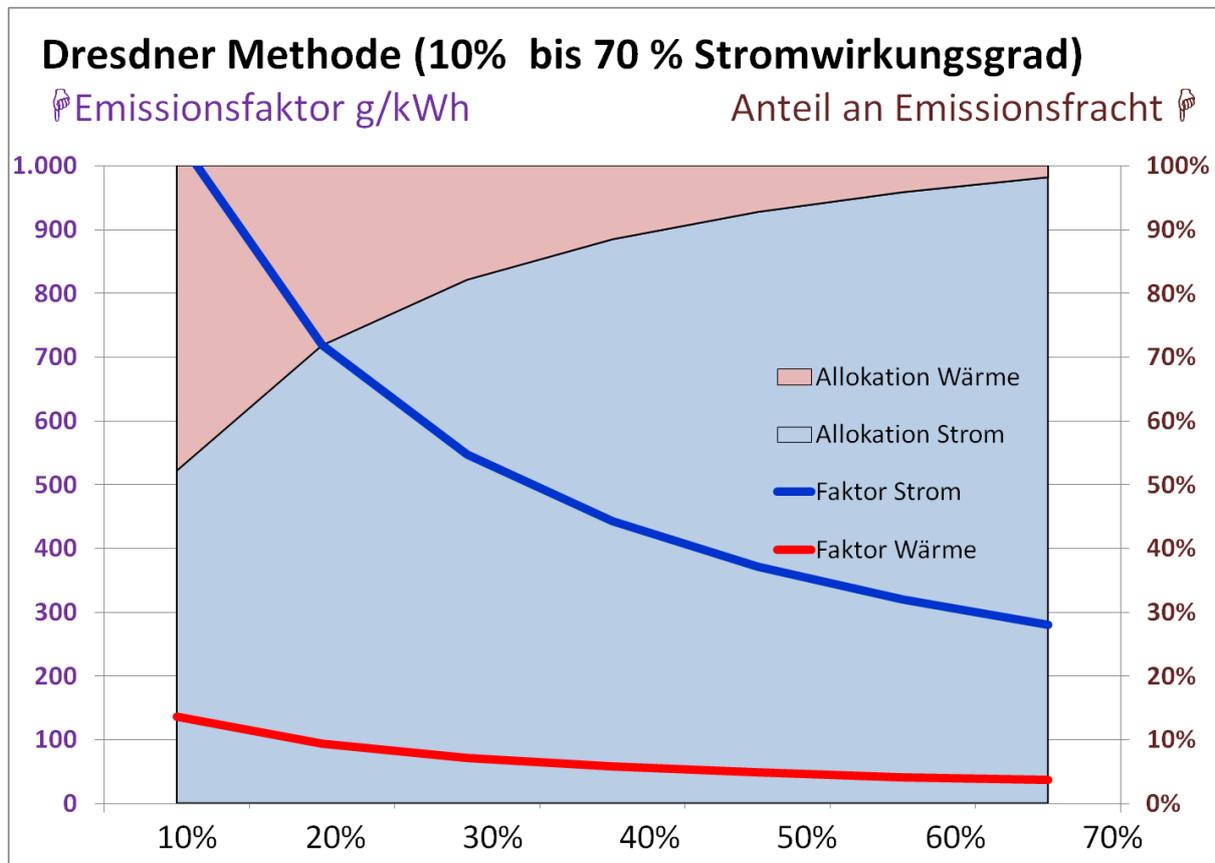
$$P_{el,Qth} = Q_{th,KWK} \eta_c v_c$$

Dabei ist Q_{th} die ausgekoppelte Wärme multipliziert mit dem Carnot-Faktor η_c (also dem Verhältnis von maximal gewinnbarer Arbeit zur eingesetzten Wärme) und einem Gütefaktor v_c der die praktischen Verluste in Turbine, Generator etc. berücksichtigen soll. Der Brennstoffanteil der Wärme ergibt sich dann aus dem Verhältnis von dem aus ihr gewinnbaren Strom („Stromerzeugungsfähigkeit“) zu der Summe aus Strom und Stromerzeugungsfähigkeit (vgl. AGFW 309 – Entwurf 2012):

$$a_Q = \frac{P_{el,Qth}}{P_{el} + P_{el,Qth}}$$

Durch die Berücksichtigung des Gütegrads wird dabei impliziert, dass das letztliche erwünschte Zielprodukt Strom ist und Wärme eigentlich nicht gebraucht wird. Ihr werden somit weniger Brennstoff und somit weniger Emissionen als bei der Carnot-Methode zugeordnet. Vor dem Hintergrund der Realität im Gebäudesektor, wo ein großer Teil des Energiebedarfs dem Heizwärmebedarf entspricht ist diese Festlegung jedoch schwer haltbar. Daher ist auch die AGFW in Ihrer Empfehlung (AGFW 2014) inzwischen von der Dresdener Methode abgerückt und hat diese durch die Carnot-Methode ersetzt.

Abbildung 57: Emissionsfaktoren Strom und Wärme der Dresdner Allokationsmethode in Abhängigkeit vom Stromwirkungsgrad



Bei der Dresdner Methode nehmen die Emissionsfaktoren Strom und Wärme mit steigendem elektrischen Wirkungsgrad deutlich ab. Die Emissionsfracht wird dabei zu Ungunsten der Stromerzeugung verteilt. Dadurch liegt der spezifische CO₂-Emissionsfaktor von Strom z.B. bei 10% Wirkungsgrad mit über 1.000 g/kWh_{el} höher als bei einem bestehenden älteren Kraftwerk mit Kondensationsstromerzeugung. Die Wärmeseite wird bevorzugt. So liegt der spezifische CO₂-Emissionsfaktor von Wärme bereits ab einem Stromwirkungsgrad von mehr als 15% unter 100 g/kWh_{th} und damit sehr deutlich unter dem Faktor eines gasbefeueren Heizkessels von 250 g/kWh_{th}.

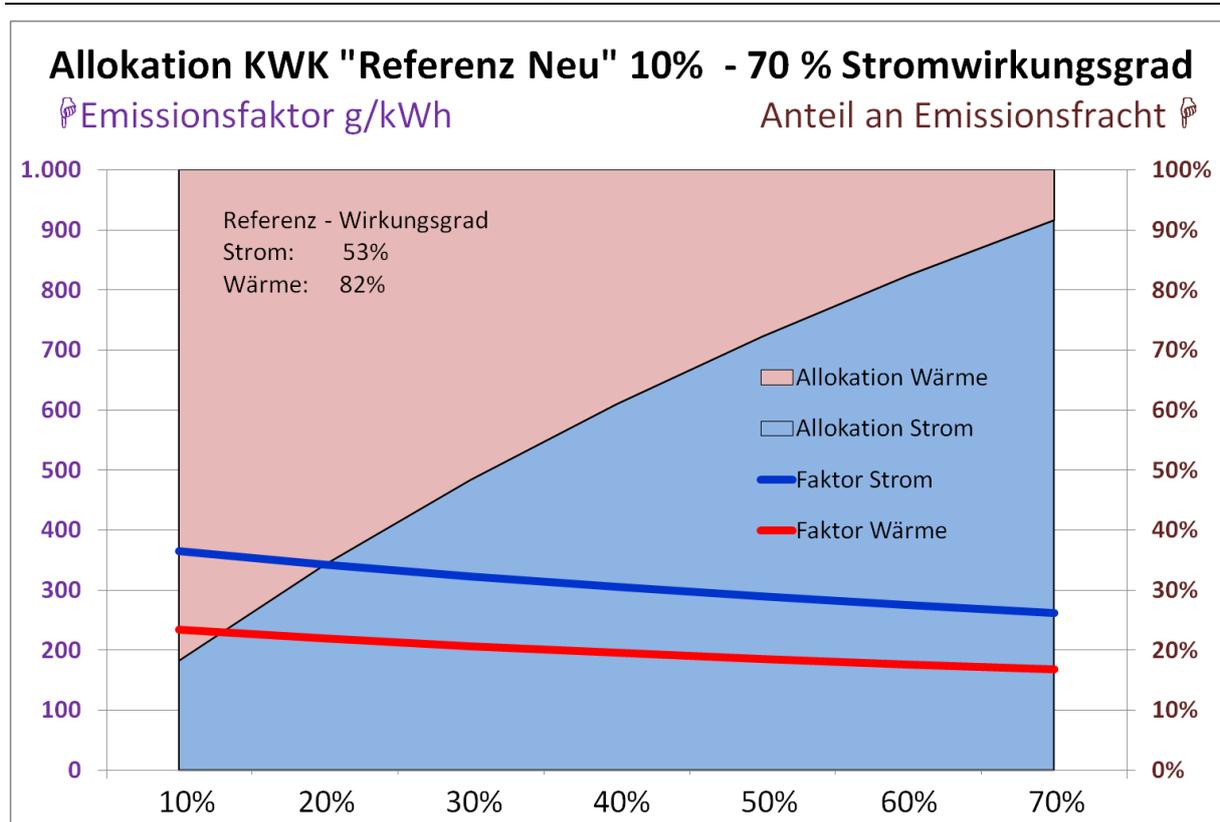
7.6 Finnische Methode

Bei der sogenannten Finnischen Methode werden für die Allokation frei gewählte Referenzsysteme zugrunde gelegt. Dabei wird der elektrische und thermische Wirkungsgrad der KWK-Anlage mit einem auf dem Markt erhältlichen Einzelsystem verglichen. Dabei sind die jeweiligen KWK-Wirkungsgrade normalerweise geringer. Andererseits wird durch die gekoppelte Produktion insgesamt Brennstoff und somit Primärenergie eingespart. Dies wird in der finnischen Methode über die Primärenergieeinsparung (PEE) berücksichtigt: (vgl. Pehnt 2010, Fritsch und Rausch 2008 und Mauch 2010)

$$\varepsilon_{el} = (1 - PEE) \frac{\eta_{el,KWK}}{\eta_{el,ref}}$$

$$\varepsilon_{th} = (1 - PEE) \frac{\eta_{th,KWK}}{\eta_{th,ref}}$$

Abbildung 58: Emissionsfaktoren Strom und Wärme der finnischen Methode in Abhängigkeit vom Stromwirkungsgrad



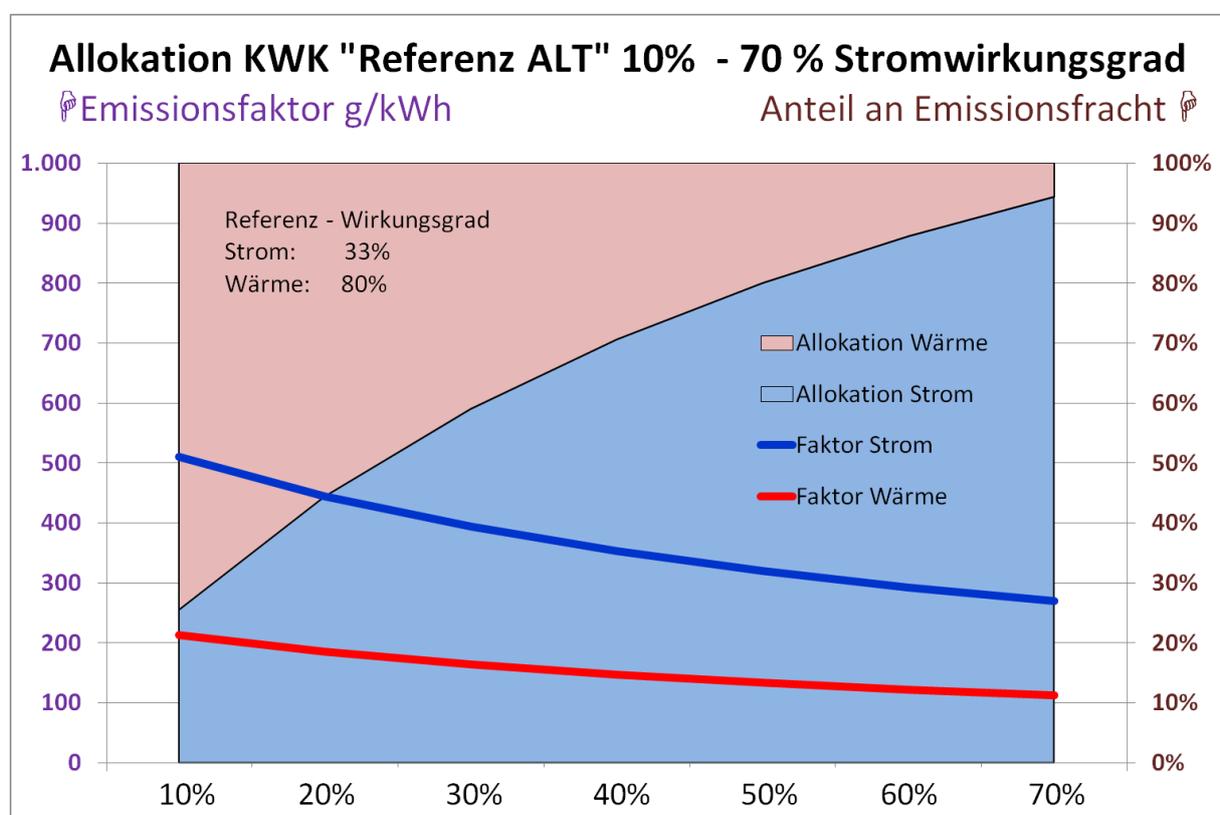
Wie die oben stehende Grafik zeigt, nehmen die Emissionsfaktoren für Strom und Wärme mit steigendem elektrischen Wirkungsgrad der Anlage ab, allerdings nur in geringem Maße. Dabei wird Strom relativ gut, Wärme relativ schlecht bewertet.

Die Finnische Methode lässt sich aus der Richtlinie für die Berechnung der Primärenergieeinsparung der EU ableiten (EU 2004) und wird, zum Teil in etwas abgewandelter Form, auch für die Landesstatistiken in Deutschland verwendet. Allerdings ist die Berechnungsvorschrift für die Primärenergieeinsparung ausschließlich dazu gedacht ein konkretes KWK System mit der getrennten Erzeugung zu vergleichen. Für einen direkten Vergleich von KWK Anlagen unterei-

einander sind die berechneten Primärenergieeinsparungen nicht geeignet, da sie sich stets auf ein durch die KWK Anlage festgelegtes Strom-Wärme-Verhältnis beziehen. Somit ist es auch zweifelhaft, ob dieser Ansatz für den Vergleich von KWK Anlagen prinzipiell geeignet ist.

Zusätzlich ist die Finnische Methode sensibel gegenüber dem gewählten Referenzsystem. Die unten stehende Grafik verdeutlicht dabei nochmal den Einfluss des Referenz-Wirkungsgrades auf die Emissionsfaktoren: Hier wurde ein „altes“ Referenzsystem mit schlechten Wirkungsgraden als Vergleich genommen. Die Spreizung zwischen den Strom- und Wärmefaktoren ist hier wesentlich größer.

Abbildung 59: Emissionsfaktoren Strom und Wärme der finnischen Methode in Abhängigkeit vom Stromwirkungsgrad mit einem alten Referenzsystem Gutschriftverfahren



7.7 Die Stromgutschriften-Methode

Bei Gutschriften-Verfahren werden entweder Strom oder Wärme als Hauptprodukt definiert. Außerdem definiert man einen Referenzprozess mit dem hypothetisch das Produkt alternativ erzeugt würde. Dem jeweiligen Hauptprodukt (im hier dargestellten Fall Strom) wird dann die CO₂-Menge zugeordnet, die in einem Referenzprozess produziert werden würde:

$$\text{spez. CO}_{2,el,Referenz} = \frac{\text{spez. CO}_{2,Brennstoff,Referenz}}{\eta_{el,Referenz}}$$

Der dem Strom zugeordnete Emissionsfaktor ist somit vom Wirkungsgrad der KWK-Anlage als auch von der Brennstoffwahl der KWK-Anlage unabhängig!

Die CO₂-Emissionen für das Nebenprodukt (hier Wärme) ergeben sich anschließend im Allgemeinen wie folgt:

$$\text{spez. } CO_{2,th} = \frac{\text{spez. } CO_{2,KWK,Brennstoff} \cdot W_{Brennstoff,KWK} - \text{spez. } CO_{2,el,Referenz} \cdot W_{el,KWK}}{W_{th,KWK}}$$

Dabei steht $W_{th,KWK}$ für die ausgekoppelte KWK-Wärme.

Analog lassen sich die Emissionsfaktoren für Wärme als Hauptprodukt definieren (vgl. Mauch 2010).

Die Zuordnung zum Nebenprodukt fällt bei dieser Methode verhältnismäßig gering aus, da es als „Abfall“-Produkt gewertet wird. Außerdem ist diese Methode sehr sensibel gegenüber dem definierten Referenzsystem.

In den folgenden Grafiken sind drei verschiedene Emissionsfaktoren ($\text{spez. } CO_{2,el,Referenz}$) für Strom-Referenz-Systeme ausgewertet worden: 600g/kWh_{el}, 400 g/kWh_{el} und 125 g/kWh_{el}.

Die unten stehende Grafik zeigt die Verteilung der Emissionsfracht und die Entwicklung des Emissionsfaktors beim Stromgutschrift-Verfahren für den Referenzfall 600g/kWh_{el}:

Abbildung 60: Emissionsfaktoren Strom und Wärme der Gutschriftenmethode in Abhängigkeit vom Stromwirkungsgrad

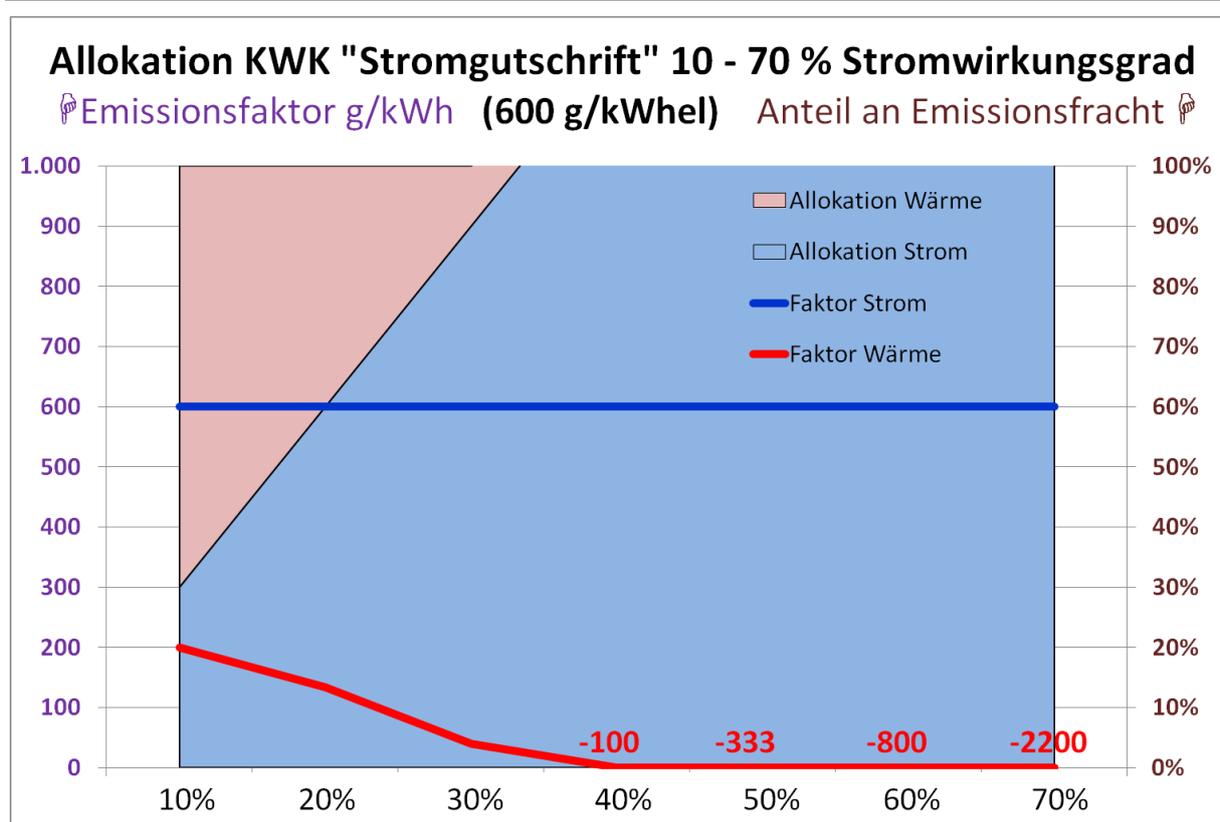


Abbildung 61: Emissionsfaktoren Strom und Wärme der Gutschriftenmethode in Abhängigkeit vom Stromwirkungsgrad mit 400g/kWh_{el}

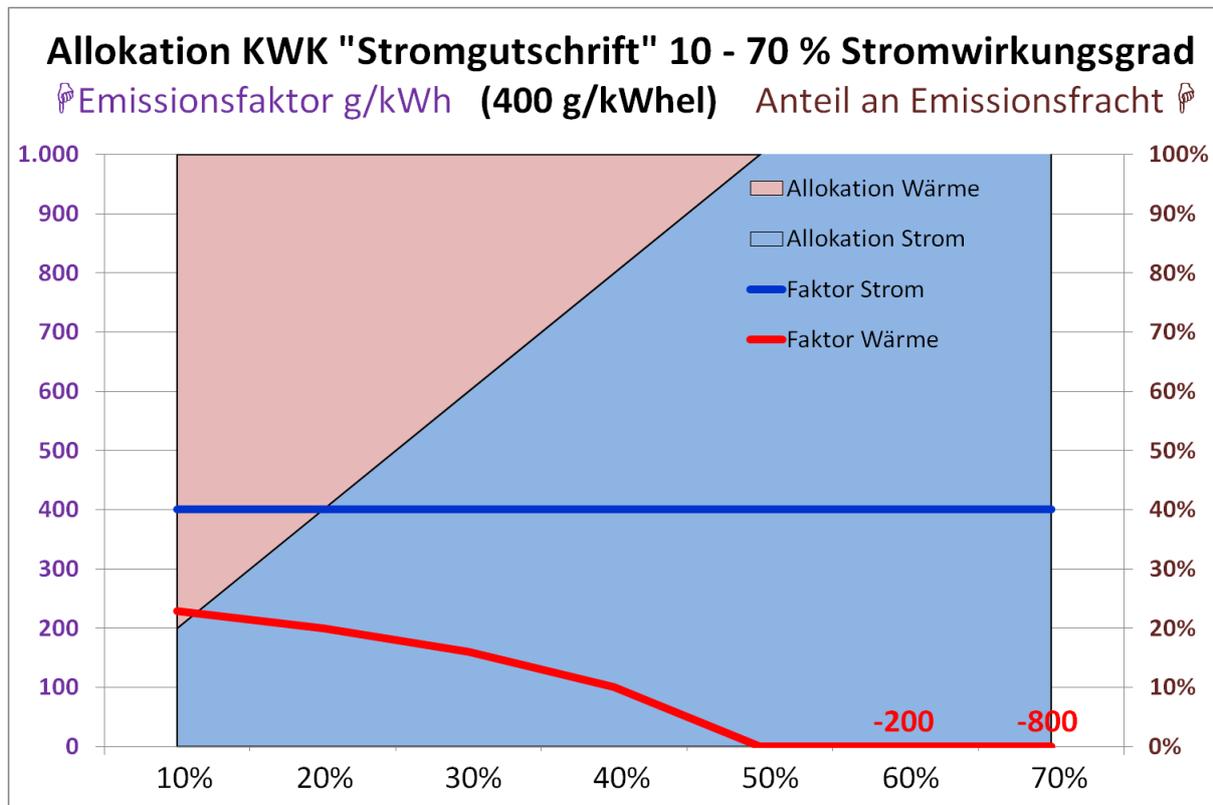
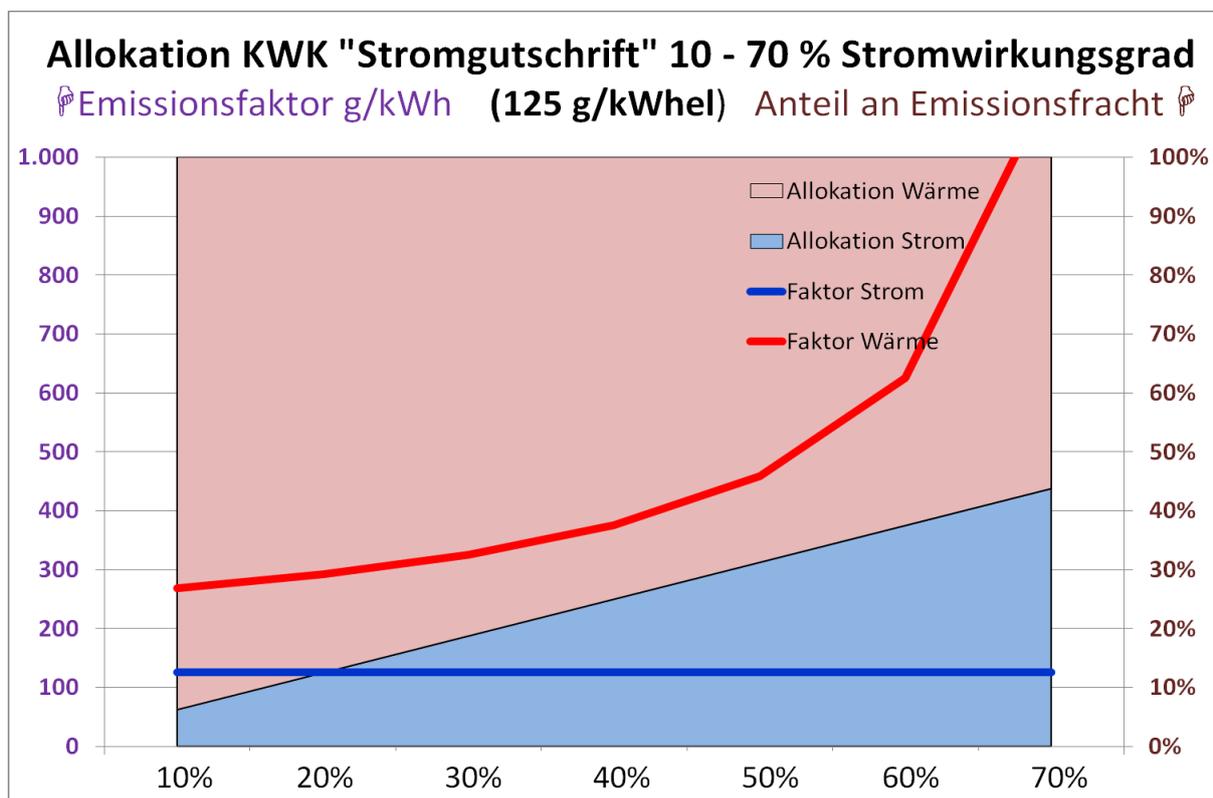


Abbildung 62: Emissionsfaktoren Strom und Wärme der Gutschriftenmethode in Abhängigkeit vom Stromwirkungsgrad mit 125g/kWh_{el}



Im betrachteten Fall (Basis-Daten siehe Anhang) reicht ein Stromwirkungsgrad von ~35%, damit die gesamte Emissionsfracht vom Strom getragen wird. Bei höheren Stromwirkungsgraden hätte die Wärme gemäß der Berechnungsvorschrift einen negativen Emissionsfaktor. Ein negativer Emissionsfaktor beim Gutschriftverfahren würde bedeuten, dass der substituierte Prozess höhere Emissionsfaktoren für das Hauptprodukt (also einen schlechteren Gesamtwirkungsgrad) aufweist als der untersuchte KWK Prozess (Vgl. Pehnt 2010).

Bei 400g/kWh_{el} (Abbildung 61) wird ab einem elektrischen Wirkungsgrad von 50% der Emissionsfaktor der Wärme negativ. Die gesamte Emissionsfracht wird dem Strom zugeordnet.

Senkt man den Referenzfall auf 125g/kWh_{el}, ergibt sich das Abbildung 62. In diesem Fall nimmt der Anteil der Wärme an der Emissionsfracht mit steigendem elektrischem Wirkungsgrad zu. Auch steigt der Emissionsfaktor der Wärme signifikant an. Dies zeigt die mangelnde Universalität des Ansatzes, denn es lässt sich kaum erklären, warum die Nutzung ausgekoppelter Wärme zunehmend weniger attraktiv wird je höher der Stromwirkungsgrad der KWK Anlage ist. Auch ist vor dem Hintergrund einer emissionsarmen Referenz für die Stromerzeugung zu erwarten, dass für eine elektrisch effiziente KWK Anlage die Wärme einen geringeren Emissionsfaktor hat als bei einer ineffizienten KWK Anlage.

Das Stromgutschriftverfahren wurde bislang bei der Bestimmung der Primärenergiefaktoren der EnEV angewandt. Allerdings mit der Einschränkung, dass negative Werte für die Emissionsfaktoren zu Null gesetzt werden. Die Problematik des, in den letzten Jahren, stetig sinkenden Stromreferenzwertes wurde erkannt. Für den erzeugten KWK-Strom wird nun ab der EnEV 2009 ein Verdrängungsmix gegengerechnet, der das Problem etwas entschärft. Hier treten dann aber andere Probleme auf (Inkonsistenz Stromverbrauch zu Stromeinspeisung durch KWK und Änderung des Faktors über die Jahre).

Für die kommunale Anwendung ist die klassische Stromgutschriftenmethode nicht geeignet, da die Faktoren zum einen auch negativ werden können, zum anderen sich die Faktoren bei gleicher KWK-Anlage vor Ort mit der Änderung des Referenzsystems (z.B. Bundesstrommix oder Verdrängungsmix) ebenfalls verändern.

7.8 Kalorische Methode / IEA-Methode

Bei der kalorischen Methode oder auch IEA Methode genannt (vgl. Mauch 2010) werden elektrische Arbeit und Nutzwärme als gleichwertig betrachtet und entsprechend der produzierten Menge mit den Emissionsfaktoren belegt:

$$\text{spez. } CO_{2,el,KWK} = \text{spez. } CO_{2,th,KWK} = \frac{\text{spez. } CO_{2,Brennstoff,KWK}}{\eta_{el} + \eta_{th}}$$

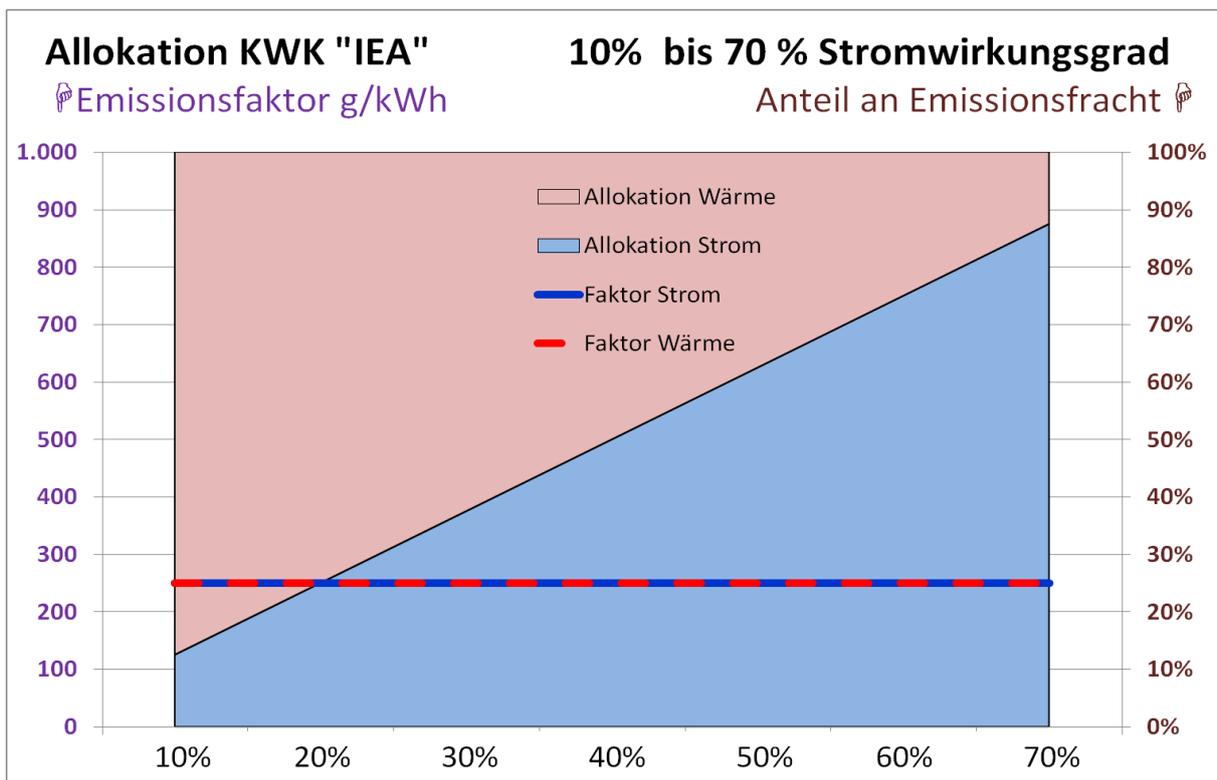
D.h. die spezifischen Emissionsfaktoren für Strom und Wärme sind identisch. Das ist auch in der Grafik Abbildung 63 zu sehen.

Für den Emissionsfaktor der Wärme ist das Verhältnis von thermischem und elektrischem Wirkungsgrad hier unerheblich; er geht lediglich in den Anteil an der Emissionsfracht ein. Steigt der Stromwirkungsgrad und somit die Menge an produziertem Strom steigt auch der Anteil an der Emissionsfracht. Allerdings wird nicht berücksichtigt, dass Wärme nicht die gleiche Arbeitsfähigkeit wie Strom besitzt. Dadurch bewertet die Methode die Stromproduktion extrem vorteilhaft, die Wärme nachteilig. So liegt der spez. CO₂-Emissionsfaktor von Wärme selbst bei einem Stromwirkungsgrad von 70% immer noch so hoch wie bei einem klassischen Heizkessel ohne KWK. Der CO₂-Emissionsfaktor von Strom liegt hier bei einem Stromwirkungsgrad von

33% bei 250 g/kWh_{el} und damit deutlich niedriger als der einer klassischen Kondensationsstromerzeugung (600 g/kWh_{el}).

Durch die Anwendung dieser Methode erscheint Wärme aus KWK sehr schnell unattraktiv. Der extrem gute Wert für Strom kann allerdings nur „gehoben“ werden, wenn die Wärme auch abgenommen wird. Somit zeigen die Ergebnisse der Methoden-Anwendung, dass sie keine sinnvolle Alternative für die Bewertung kommunaler System sein kann.

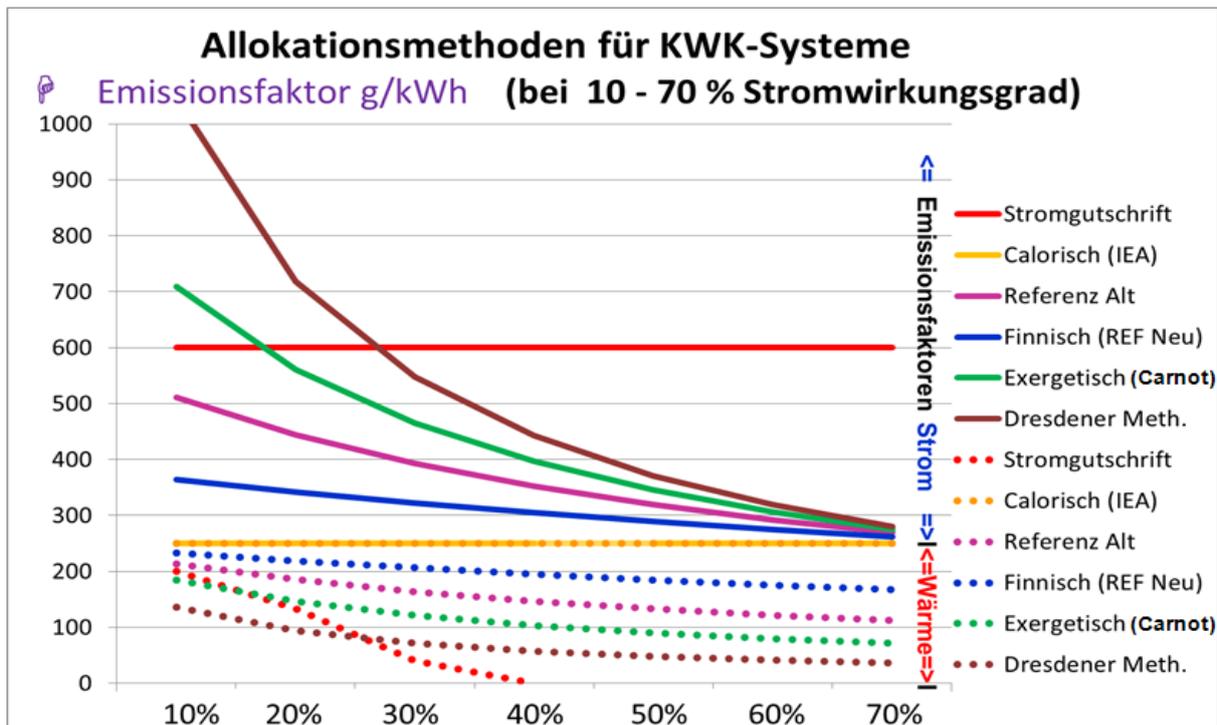
Abbildung 63: Emissionsfaktoren Strom und Wärme der kalorischen Methode in Abhängigkeit vom Stromwirkungsgrad



7.9 Fazit

Die unten stehende Grafik zeigt die Emissionsfaktoren Strom und Wärme einiger der oben aufgeführten Methoden im direkten Vergleich.

Abbildung 64: Vergleich verschiedener Allokationsmethoden in Abhängigkeit vom Stromwirkungsgrad



Quelle: IFEU

Dabei wurde vereinfacht analog (Mauch 2010) eine gasgefeuerte KWK mit einem CO₂-Emissionsfaktor von 200g/kWh_{EE} für den Brennstoff Erdgas angenommen³⁰. Bis auf die Stromgutschriftenmethode führen alle Methoden zu positiven Emissionsfaktoren.

Die kalorische Methode bewertet Strom und Wärme gleichwertig und ist daher weder in Einklang mit der Physik noch konform mit realen Kraftwerksprozessen.

Die finnische Methode, die u.a. über die EU-Dienstleistungsrichtlinie eingebracht wurde, begünstigt die Stromseite zu Ungunsten der Wärmeseite. Die Nutzung der Vorschrift zur Berechnung Primärenergieeinsparung als Basis für einen Vergleich von KWK Systemen lässt sich jedoch kaum widerspruchsfrei begründen. Wie auch andere Referenzmethoden mit frei wählbaren Referenzen (z.B. Referenz Alt) verändert sich außerdem der Emissionsfaktor mit der Änderung des Referenzsystems. Dadurch kann, ähnlich der Gutschriftenmethode, eine heute installierte Anlage bei gleichen Parametern aber verändertem Referenzsystem in 10 Jahren andere Emissionsfaktoren erhalten.

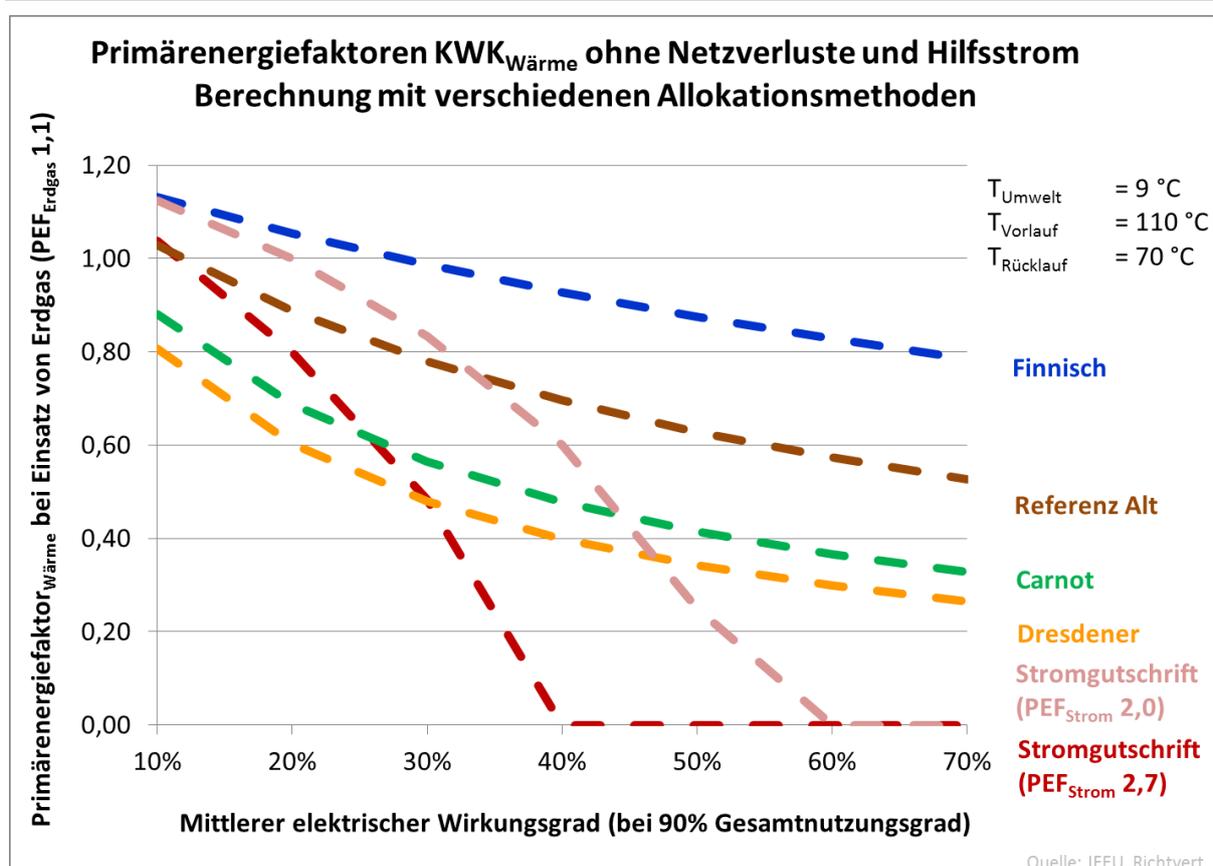
³⁰ Das IFEU rechnet sonst mit Emissionsfaktoren einschließlich Vorkette und äquivalenten Emissionen.

Die Dresdner Methode begünstigt die Wärmeseite zu Ungunsten der Stromseite. Die bei ihr angenommene „real“ höhere Wertigkeit des Stroms zusätzlich zur „physikalisch“ höheren Wertigkeit lässt sich nur schwer begründen.

In diesem Projekt sollen Kommunen und die darin vorhandenen Energieerzeugungsanlage exergetisch bewertet werden. Dabei ist es explizit das Ziel, die unterschiedliche thermodynamische Qualität von Strom und Wärme zu berücksichtigen. Deshalb eignet sich aus Sicht des IFEU lediglich die Carnot-Methode (Exergie-Methode) zur unabhängigen und wissenschaftlich fundierten Bewertung von Koppelprodukten, wie sie in diesem Projekt angestrebt wird.

Im Vergleich mit den anderen Methoden ergeben sich bei der exergetischen Allokation Emissionsfaktoren, die sich gut mit der naheliegenden Praxis der Bewertung über den Stromverlust vereinbaren lassen (siehe Pehnt 2010). Die Faktoren liegen zwischen denen der Finnischen Methode (welche die Stromseite begünstigt) und der Dresdner Methode (welche die Wärmeseite begünstigt). Besondere Vorteile der Carnot-Methode liegen in der einfachen Berechenbarkeit und der Unabhängigkeit von externen, frei wählbaren Referenzsystemen. Der Kraftwerksprozess selbst muss nicht im Detail bekannt sein. Es werden lediglich die Input- und Output Parameter des Kraftwerks benötigt. Zudem können mit der Carnot-Methode auch Kaskadensysteme abgebildet werden. Dies ist notwendig um LowEx-Systeme wie z.B. die Rücklaufeinspeisung bewerten und positiv darstellen zu können.

Abbildung 65: Primärenergiefaktoren KWK_{Wärme} mit verschiedenen Allokationsverfahren ohne Netzverluste und Hilfsstrom



Quelle: IFEU, Richtvert

Auch bzgl. der aktuellen Diskussion um die Weiterentwicklung der Primärenergiefaktoren der EnEV kann die Carnot-Methode eine Lösung bieten. Der derzeitige Ansatz der Berechnung an Hand der Stromgutschriften-Methode (siehe oben) führt dazu, dass der Primärenergiefaktor der Fernwärme sich mit zukünftig sinkenden PE-Faktoren des Strommixes deutlich verschlechtert (siehe Abbildung 65).

Somit kann die Carnot-Methode auch bzgl. der Primärenergiebetrachtung von gekoppelten Systemen eine langfristig taugliche Lösung sein.

8 Exergetische Bewertung von Kommunen

8.1 Einleitung

In Kapitel 5.7 wurde dargestellt, wie Einzelsysteme konsistent exergetisch bewertet werden können. Kapitel 6 stellt dar wie der Exergieausweis dabei helfen kann, komplexe Bauprojekte auf Gebäude- bis zur Quartiersebene exergetisch zu bewerten. Im nächsten Schritt soll nun die Ebene einer Kommune betrachtet werden. Dafür wird die Energie- und Exergiekette von der Primärenergie bis zur endgültigen Nutzung zum Beispiel zur Raumheizung betrachtet. Die verwendeten Bewertungsgrundlagen entsprechen dabei weitestgehend den in Kapitel 5.2 vorgestellten.

Neben dem Wohngebäudebereich können hier auch der Sektor GHD und Industrie mit berücksichtigt werden. Um die Energieströme zu veranschaulichen werden Sankey-Diagramme erstellt. Durch die Mischung verschiedener Stadt- und Versorgungstypen entstehen typische Versorgungs- und Abnahmevarianten mit denen reale Städte gemäß ihrer Größe und derzeitigen Versorgung verglichen werden können. Durch die Betrachtung von alternativen Versorgungsoptionen wie KWK-Fernwärme aus dem Rücklauf, Fernwärme aus tiefer Geothermie, Fernwärme aus Abwärme oder Wärmepumpen, können Rückschlüsse auf die Auswirkung einer Versorgungsumstellung gezogen werden. Dies kann bereits vor der Planungsphase von Systemveränderungen in einer Art Vorab-Analyse erfolgen. In den vorliegenden Sankey-Diagrammen wird sowohl die Energiebilanz einer Stadt (grafisch) als auch deren exergetische Bewertung (tabellarisch) beispielhaft dargestellt. Dazu wird eine fiktive Modellstadt betrachtet, deren Energieversorgung dem durchschnittlichen Mix der BRD nach AGEB (AGEB 2014) entspricht.

8.2 Zu Grunde liegende Annahmen und Werte

Genauso wie für die Einzelsysteme (Kapitel 5.7) und für den Exergieausweis (Kapitel 6) wird für die exergetische Betrachtung von Kommunen als Eingangsströme direkt speicherbare Primär- oder, bei nicht speicherbaren erneuerbaren Energieträgern wie Solarenergie, die speicherbare Sekundärenergie (Wärme bzw. Strom) gemäß Kapitel 5.2 bilanziert.

In drei kleinen Punkten unterscheiden sich die Annahmen für den Exergieausweis zu denen im Folgenden verwendeten:

So wird zur Berechnung des Carnot-Wirkungsgrads im Exergieausweis entsprechend thermodynamischer Anforderungen die logarithmische Mitteltemperatur verwendet. Für die kommunale Analyse ist es jedoch noch wichtiger mit möglichst leicht nachvollziehbaren Grundlagen zu rechnen. Daher wird hier die arithmetische Mitteltemperatur verwendet. Die Abweichung zwischen beiden Temperaturen ist dabei jedoch für den vorliegenden Anwendungsfall (Kommunen) vernachlässigbar.

Zusätzlich werden für die kommunale Bewertung vereinfachte Primärenergiefaktoren herangezogen, während der Exergieausweis mit genaueren Kumulierten Energie Aufwendungen (KEA) arbeitet. Weiterhin verwendet der Exergieausweis weniger Vereinfachungen wie z.B. ein leicht verändertes Set an Annahmen für Wirkungsgrade, Temperaturen etc. Durch diese Unterschiede können die Ergebnisse beim genaueren Exergieausweis von den auf vereinfachter Berechnungsgrundlage ermittelten Werten für Gesamtkommunen ggf. geringfügig voneinander abweichen.

Als Zielgröße wird der Exergiebedarf der Raumtemperatur bzw. der mittleren Warmwassertemperatur berücksichtigt und nicht die evtl. in Radiatoren oder anderen Punkten im System benötigten Temperaturen.

Im Folgenden wird die Berechnung der Primär- und Nutzenergie vereinfacht vorgenommen. Der Exergiebedarf setzt sich hierbei aus dem allgemeinen Strombedarf, dem Wärmebedarf und dem Bedarf an Trinkwarmwasser zusammen. Die Primärenergie wird aus der Nutzenergie vereinfacht über Primärenergiefaktoren und ggf. den eingesetzten Hilfsstrom errechnet, ohne im Detail den Deckungsanteil und Unterschiede im Heizwert/Brennwert zu berücksichtigen.

Es werden im Gegensatz zu den Einzelsystemen in Kapitel 5.7 nur 4 verschiedene Primärenergiefaktoren angenommen für FW, EE, Fossil und Strom. Dabei ist darauf zu achten, dass sowohl der PEF für Fernwärme als auch der PEF für Sonstiges Erneuerbare Anteile enthalten, welche in den üblichen Primärenergiefaktoren (fossil) nach EnEV nicht berücksichtigt werden.

Der Primärenergiefaktor für Fernwärme ist ein pauschalisierter Mittelwert für Fernwärme aus fossiler KWK mit geringem Heizkesselanteil und Hilfsstrom.

Tabelle 16: Pauschalisierte Primärenergiefaktoren (fossil und erneuerbar) für die kommunale Bewertung

PE-Faktor Fernwärme (inkl. Hilfsstrom)	1,1
PE-Faktor Fossil	1,1
PE Faktor Strom	2,6
PE Faktor Sonstiges	1,05

Ein weiterer Unterschied zwischen der Berechnung der Referenzsysteme in Kapitel 5.7 und den Modellstädten ist die Berücksichtigung der in der Geothermie und Abwärme enthaltenen Exergie. Die über tiefe Geothermie oder Abwärme zugeführte Energie wird bei den Modellstädten mit Hilfe des Carnot-Faktors exergetisch bewertet. Anschließend werden mit dem PE-Faktor für sonstiges die „Vorkettenverluste“ – insbesondere für den Hilfsstrom modelliert.

Die Nutzenergie wird mit einem Faktor von 2,6 für Strom, 1,1 für fossile Brennstoffe, 1,1 für importierte Fernwärme und 1,05 für erneuerbare und sonstige Energieträger zur Primärenergie umgerechnet. Diese Primärenergie bzw. die entsprechende Exergie wird für die Berechnung der Exergieausnutzung herangezogen.

Strom und Brennstoffe haben eine Energiequalität von 100%. Wärmeströme werden in 5 verschiedene Energiequalitätsstufen eingeordnet, die vom jeweiligen Temperaturniveau abhängig sind: Ferndampf, Fernwärme alt und neu, Nahwärme und LowEx-Systeme (siehe Tabelle 17). Ferner ist noch das Niveau der Raumwärme (20°C) und von Warmwasser (43°C) und dem ursprünglichen Kaltwasser (10°C) angegeben.

Für jedes dieser Temperaturniveaus wurde die Energiequalität der Wärme über den Carnot-Wirkungsgrad berechnet:

$$\eta_c = 1 - \frac{T_{Umgebung}}{T_{mittel}}$$

Im Diagramm wird die unterschiedliche Energiequalität über die Farbe dargestellt, während die Energieströme über die Breite der Pfeile dargestellt werden.

Tabelle 17: Übersicht Temperaturen und Energiequalitäten (Carnot-Faktoren) der verschiedenen Wärmestufen

		VL	RL	T mittel	Energiequalität	Farbe
1	KWK	200	95	148	33%	FW_DAMPF
2	KWK	130	90	110	26%	FW_ALT
3	KWK	110	60	85	21%	FW_NEU
4	KWK	90	60	75	19%	NW
5	KWK	60	40	50	13%	LowEx
6	Warmwasser	43	10	27	6%	WW
7	Raum			20	4%	RW

Die unter der Kategorie Endenergieträger aufgeführte Fernwärme wird entweder innerhalb des betrachteten Gebietes erzeugt oder als Fernwärme importiert. Bei einer internen KWK Anlage wird als Standard Erdgas als Brennstoff angenommen.

Auf der Nachfrageseite wird der Wärmebedarf der verschiedenen Sektoren in die Bereiche Prozesswärme, Warmwasser und Raumwärme aufgeteilt³¹. Diese für die folgenden Analysen verwendete Aufteilung für die Modellstadt kann Tabelle 18 entnommen werden. Innerhalb der Simulation können diese Werte für eine konkrete Stadt an reale Werte angepasst werden.

Tabelle 18: Wärmebedarfe nach Sektoren

	Haushalte	Gewerbe	Industrie
Prozesswärme	3%	15%	75%
Warmwasser	12%	5%	10%
Raumwärme	85%	80%	15%

Bei der exergetischen Bewertung der Nachfrageseite wird für die Raumwärme eine Bedarfstemperatur von 20°C angenommen (Energiequalität 4%). Beim Warmwasser werden eine Vorlauf-temperatur von 43°C und eine Rücklauf-temperatur von 10°C berücksichtigt. Dadurch ergeben sich eine Mitteltemperatur von 27°C und eine Energiequalität von 6%. Für Prozesswärme wird eine Energiequalität von 30% angenommen (entspricht einer Mitteltemperatur von ca. 130°C bei einer Referenztemperatur von 9°C).

Um das System Stadt beurteilen zu können werden verschiedene exergetische Kennwerte definiert und betrachtet.

Zum einen, ein exergetischer Ausnutzungsgrad (Exergie-Ausnutzung), der sich nur auf den Raumwärmebedarf des Haushaltssektors fokussiert:

³¹ Vereinfacht wird hier der Stromverbrauch außerhalb des Wärmebereichs betrachtet.

$$v_{Ex_Raum} = \frac{Ex_{Raum}(HH)}{Ex_{HH-Sektor} * Anteil\ Raumw\ddot{a}rme}$$

Dabei ist Ex_Raum die für eine Raumtemperatur von 20°C benötigte Exergie:

$$Ex_{Raum} = \eta_c Q_{Raumw\ddot{a}rme} \text{ mit } \eta_c = 1 - \frac{T_{Umgebung}}{T_{Raum}}$$

Ex_HH -Sektor ist dabei die Exergie, die in den Haushaltssektor fließt. Brennstoffe und Strom werden dabei (siehe oben) mit einem PE-Faktor belegt. Die für KWK aufgewendete Primärenergie wird auf die verschiedenen Sektoren exergetisch aufgeteilt.

Als weitere Vergleichsgröße wurde die Ausnutzung für Strom und Raumwärme ausgewertet:

$$v_{Ex_Raum} = \frac{Ex_{Raum}(HH) + Ex_{Strom}(HH)}{Ex_{HH-Sektor} * (Anteil\ Raumw\ddot{a}rme + Anteil\ Prozessw\ddot{a}rme)}$$

Außerdem wird die Exergieausnutzung der gesamten Stadt betrachtet:

$$\begin{aligned} & v_{Ex_Stadt} \\ &= \frac{Ex_{Raum}(HH, GHD, IND) + Ex_{WW}(HH, GHD, IND)}{Ex_{Stadt}} \\ &+ \frac{Ex_{PW}(HH, GHD, IND) + Ex_{Strom}(HH, GHD, IND)}{Ex_{Stadt}} \end{aligned}$$

Als weitere Bewertungskriterien werden der Primärenergie-Verbrauch pro Einwohner und Quadratmeter (mit oder ohne Stromverbrauch) angegeben.

Zusätzlich könnte für jedes Bewertungskriterium eine Verbesserung im Vergleich zu einem gewählten Referenzsystem (z.B. dem Ausgangszustand der Stadt) angegeben werden, wie das beim Exergieausweis geschieht. Darauf wird in der aktuellen Version jedoch noch verzichtet.

Der Fall in dem keine Fernwärme eingesetzt wird, entspricht der ausschließlichen Versorgung mit konventionellen fossilen Energieträgern. Da diese eine Energiequalität von 100% haben entspricht in diesem Fall der Energieverbrauch dem Exergieverbrauch. Der Exergiebedarf ist (aufgrund der geringen Energiequalität des Bedarfs) deutlich geringer!

Als Alternative zur Ist-Situation können eine neue Versorgungsstrategie und ein dadurch veränderter Verbrauch zu betrachtet werden.

8.3 Aufbau der kommunalen Sankey Diagramme

In folgender Abbildung 66 wird das Prinzip der Sankey-Darstellung erläutert.

Es werden (von links nach rechts) folgende Umwandlungsschritte dargestellt:

- Primärenergie: Energie einschließlich Vorkette (z.B. für die Stromerzeugung) zur Bereitstellung der Sekundärenergie an der Stadtgrenze (in der Regel die Bilanzgrenze)
- Sekundärenergie: Energie (ohne Vorkette), die dem System (Stadt) zugeführt wird
- KWK-Systeme in der Kommune: In diesem Bereich werden Energieträger in Strom und Wärme umgewandelt. Der Wärmeoutput wird in verschiedenen Temperaturniveaus dargestellt.

- Endenergie nach Sektoren: Die Endenergie (Hauseingang bzw. Zähler) wird auf die verschiedenen Sektoren aufgeteilt.
- Anwendung: Die Endenergie wird (vereinfacht) auf die verschiedenen Anwendungen nach Anwendungsgebiet (RW-Raumwärme, WWB – Warmwasserbereitung, PW – Prozesswärme) und nach Temperaturniveau aufgeteilt.
- Abwärmeströme: Abwärmeströme werden wie Fernwärme in verschiedenen Temperaturniveaus dargestellt.

Nächste Seite:

Abbildung 66: Aufbauskitze kommunaler Sankey-Diagramme (Quelle: IFEU)

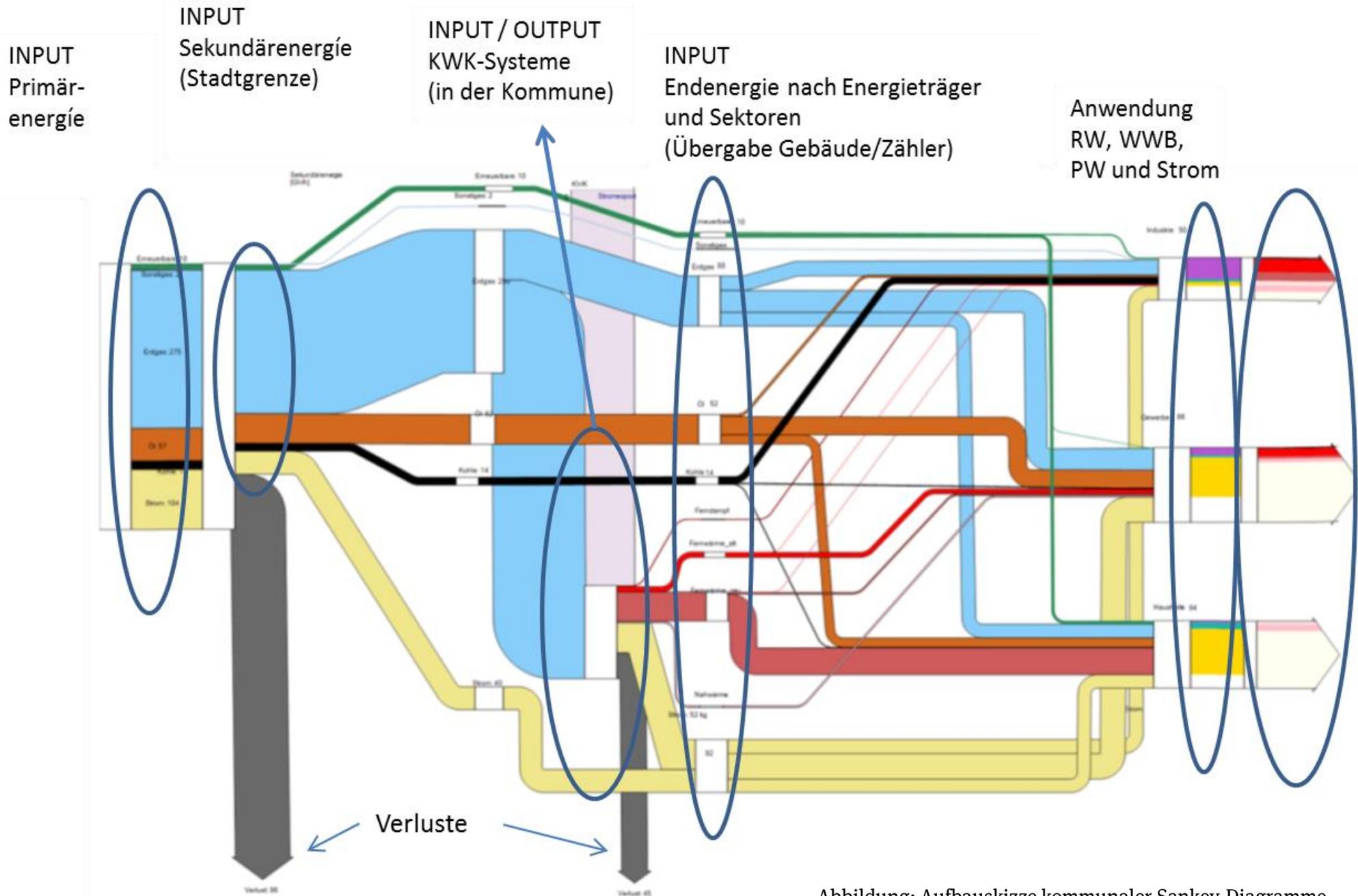
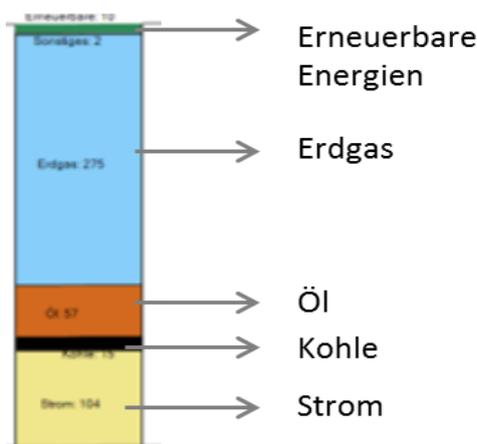
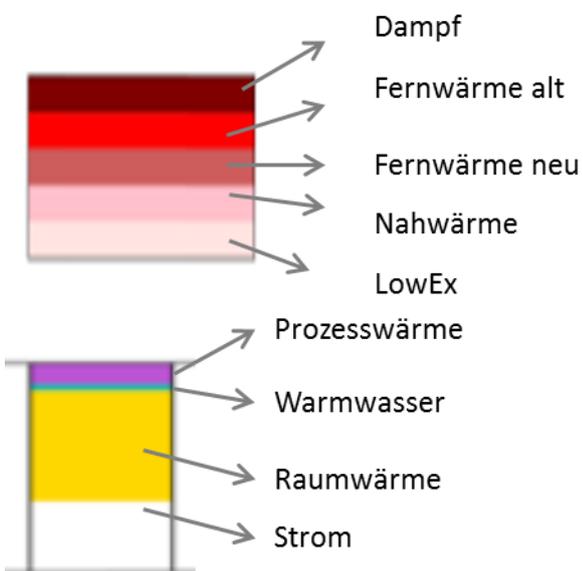


Abbildung: Aufbauskeizze kommunaler Sankey-Diagramme



Im Sankey-Diagramm charakterisiert die Höhe der Balken die Energiemenge. Dabei steht ein grüner Pfeil für erneuerbare Energien, helles Blau für Erdgas, Braun für Öl, Schwarz für Kohle und gelb/beige für Strom. Da die Brennstoffe eine Energiequalität haben, entspricht die Exergie hier der Energie. Anders ist dies im Fern- und Abwärmebereich. Hier handelt es sich um Wärmeströme, deren Energiequalität mit der Temperatur variiert. Die unterschiedliche Energiequalität wird in fünf Abstufungen über die Farbe visualisiert: Die genauen Werte können hier Tabelle 10 entnommen werden



Auch wenn die Fernwärmesysteme namensgebend für die Temperaturstufen waren, sind diese Temperatur- bzw. Energiequalitätsstufen auch für die Abwärme anwendbar. Auf der Ebene der Energieanwendung wird hingegen über die Farbcodierung der Verwendungszweck angezeigt: Violett ist der Anteil der als Prozesswärme eingesetzt wird, Türkis der Warmwasseranteil und gelb die Raumwärme. Zur besseren Unterscheidung wird der Strom in diesem Fall weiß dargestellt.

Abbildung 67: Ausschnitte aus dem Sankey-Diagramm zu dessen Erläuterung

8.4 Modellstadt (Haushaltssektor)

Im Rahmen des Projekts war ursprünglich geplant, die Energieversorgungssituationen konkreter Städte zu berechnen. Aufgrund der hohen Anforderungen an die Datenbeschaffung hat sich diese Option als nicht praktikabel erwiesen. In so gut wie keinem Fall konnten ausreichend Daten für eine aussagefähige Berechnung ermittelt werden. Anstatt konkrete Quartiere und Städte als Berechnungsgrundlage heranzuziehen, die jeweils einen besonderen Typ Stadt charakterisieren sollten, werden im Folgenden für eine definierte Modellstadt verschiedene Optionen durchgespielt. Basis dafür ist eine Modellstadt mit etwa 23.000 Einwohner und 885.000 Quadratmeter Wohnfläche. Der Großteil des Gebäudebestands besteht aus Altbauten, die vor 1988 erstellt wurden und inzwischen nur teilweise saniert worden sind.

Vereinfacht wird im ersten Schritt nur der Haushaltssektor betrachtet. Dabei werden verschiedene Versorgungsoptionen verglichen.

Zuerst wird eine komplett dezentrale Versorgung nur über Heizkessel in den einzelnen Wohngebäuden betrachtet (siehe Abbildung 68 und Basisvariante 0 in Tabelle 19). In diesem Fall gibt es kein Fernwärmenetz.

Im Vergleich dazu werden verschiedene Versorgungsszenarien über ein Fernwärmenetz untersucht. Der Anteil der Fernwärme wird dabei mit 50% (Variante 1) und 90% (Variante 2) angenommen.

Als 3. Variante wird neben einer überwiegenden Fernwärmeversorgung (90% des Wärmebedarfs) eine ehrgeizige Energieeinsparung angenommen, durch die der Gesamt-Wärmebedarf für Raumwärme und Trinkwarmwasser halbiert wird. Dabei wird angenommen, dass der absolute Trinkwarmwasserbedarf konstant bleibt.

In der Regel werden alle FW-Systeme mit einer KWK-Anlage innerhalb des Betrachtungsraums gerechnet. Lediglich bei der Dampfvariante (siehe Abbildung 69) wird eine externe Dampflieferung angenommen.

Für alle drei Szenarien werden im Folgenden verschiedene Versorgungsmöglichkeiten gerechnet. Wesentliche verwendete Parameter sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

Tabelle 19: Fernwärmeparameter der verschiedenen Versorgungsszenarien (die Bezeichnungen entsprechen den vorher eingeführten Energiequalitätsstufen)

Anteil an der Bedarfsdeckung der Haushalte	Referenzsystem ohne zentrale Erzeugungsanlagen	Fernwärmesystem mit importiertem Dampf aus externer KWK	Konventionelle KWK	KWK Rücklaufnutzung	KWK LowEx	Geothermie	Abwärme
50% FW	Keine FW, dezentrale Erzeugung	50% alte FW, 50% neue FW	100% neue FW	40% neue FW, 30% NW, 30% LowEx	50% NW, 50% LowEx	40% neue FW, 30% NW, 30% LowEx	50% NW, 50% LowEx
90% FW	Keine FW, dezentrale Erzeugung	50% alte FW, 50% neue FW	100% neue FW	40% neue FW, 30% NW, 30% LowEx	50% NW, 50% LowEx	40% neue FW, 30% NW, 30% LowEx	50% NW, 50% LowEx
90% FW, halber Verbrauch	Keine FW, dezentrale Erzeugung	50% alte FW, 50% neue FW	100% neue FW	40% neue FW, 30% NW, 30% LowEx	50% NW, 50% LowEx	40% neue FW, 30% NW, 30% LowEx	50% NW, 50% LowEx

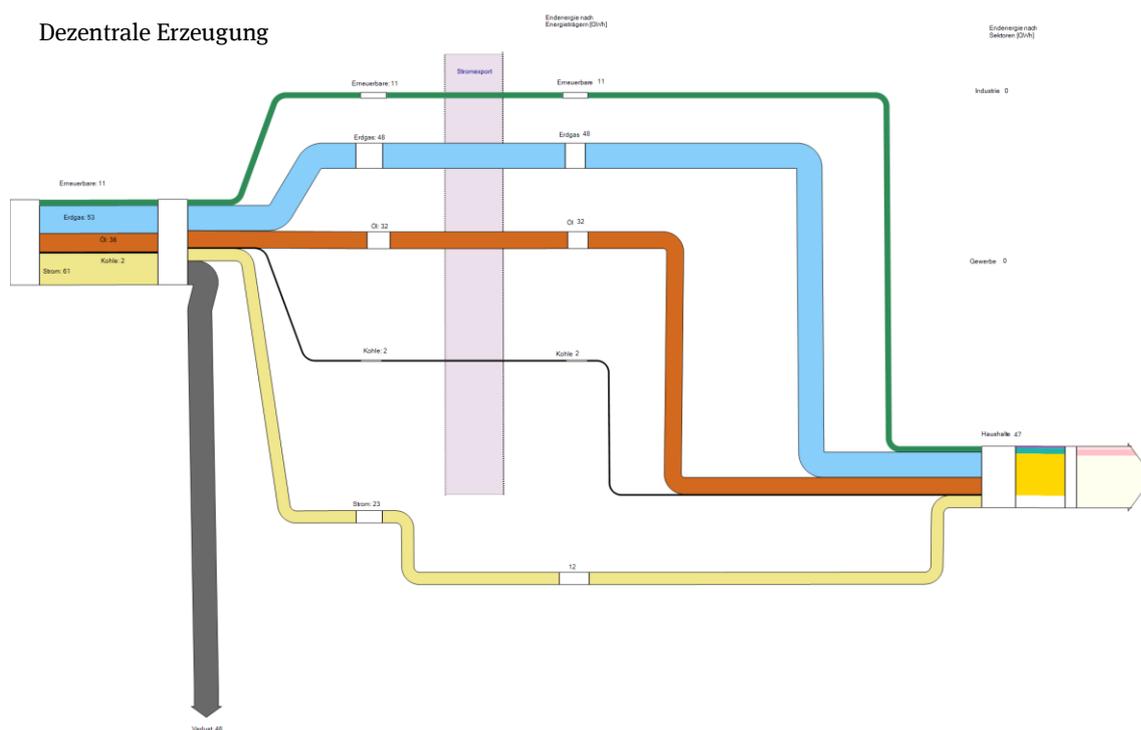
8.5 Ergebnisse: Exergetische Analyse einer Modellkommune (Haushalte)

Verschiedene Optionen werden im Folgenden jeweils kurz vorgestellt.

8.5.1 Dezentrale Erzeugung

Für das Szenario einer rein dezentralen Wärmebereitstellung in den Wohngebäuden ist das entsprechende Sankey-Diagramm in Abbildung 68 dargestellt.

Abbildung 68: Sankey-Diagramm dezentrale Energieversorgung



In Tabelle 20 sind die wichtigsten Faktoren aus dem Sankey-Diagramm zusammengefasst. In der ersten Spalte finden sich die Werte für eine Vollversorgung des Haushalts über eine KWK-Anlage bei gleichbleibendem Verbrauch. In der zweiten Spalte finden sich entsprechende Werte für die dritte Variante mit ehrgeizigen Einsparzielen beim Wärmeverbrauch.

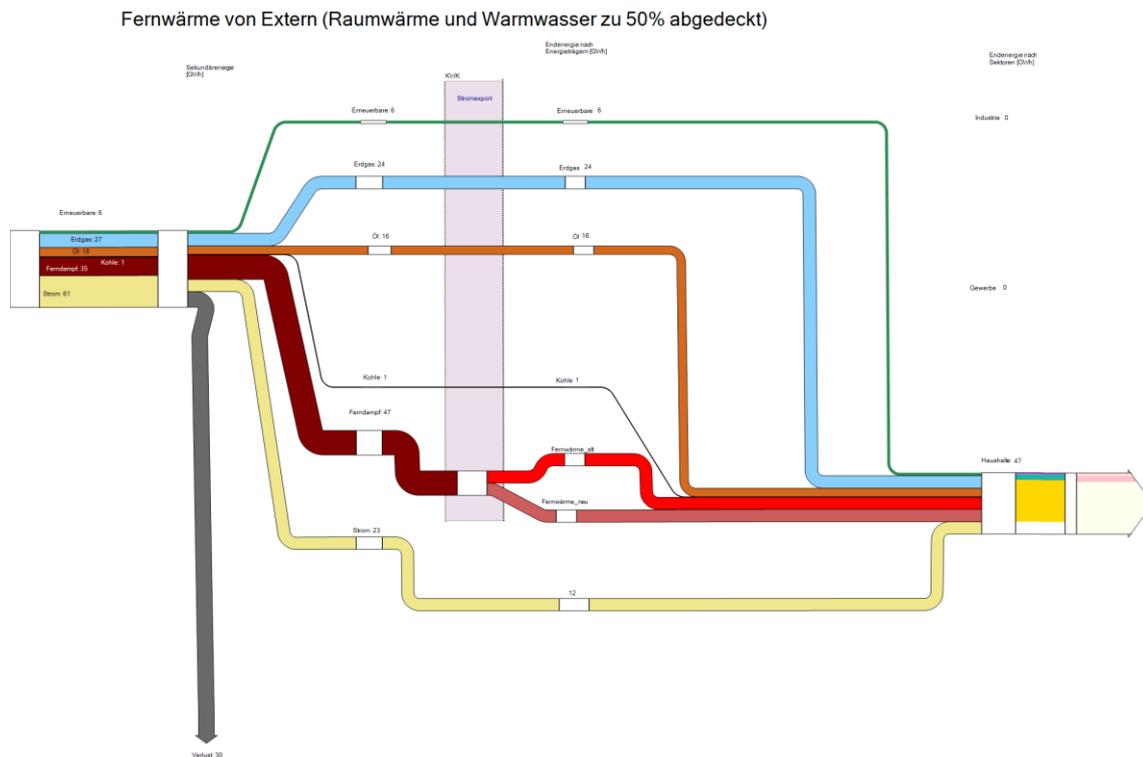
Tabelle 20: Ergebnisübersicht dezentrale Erzeugung mit Erdgas-Kesseln

Dezentrale Erzeugung	Normaler Wärmebedarf	Halber Wärmebedarf
Primärenergie-Ausnutzung (Gesamt)	16,0%	22,0%
Primärenergie-Ausnutzung (Wärmeversorgung)	3,0%	3,0%
Primärenergie-Verbrauch (Gesamt) pro Einwohner und Jahr	4,54 MWh/EW*a	2,27 MWh/EW*a
Primärenergie-Verbrauch (Wärmeversorgung) pro Fläche und Jahr	117 kWh/m ² *a	58 kWh/m ² *a

8.5.2 Importierte Fernwärme (Dampf)

In der untenstehenden Abbildung 70 ist das Sankey-Diagramm für das Szenario des Fernwärmebezugs von einer externen Quelle dargestellt. Es wird dabei angenommen der Dampf stammt aus einem alten Steinkohle-Heizkraftwerk. Im Diagramm wird von Variante 1 ausgegangen, in dem 50% des Wärmebedarfs durch Fernwärme gedeckt wird.

Abbildung 69: Sankey-Diagramm Fernwärmeversorgung mit importiertem Ferndampf



In Tabelle 21 sind zur Übersicht alle wichtigen Faktoren für die drei verschiedenen Varianten dieses Szenarios zusammengefasst.

Tabelle 21: Ergebnisübersicht importierte Fernwärme

Fernwärme Dampf importiert	50% Fernwärme (vgl. Bild)	90% Fernwärme	90% Fernwärme, 50% Wärmebedarf
Primärenergie-Ausnutzung (Gesamt)	15,5%	15,2%	21,3%
Primärenergie-Ausnutzung (Wärmeversorgung)	2,9%	2,8%	3,0%
Primärenergie-Verbrauch (Gesamt) pro Einwohner und Jahr	7,41 MWh/EW*a	7,55 MWh/EW*a	5,12 MWh/EW*a
Primärenergie-Verbrauch (Wärmeversorgung) pro Fläche und Jahr	122 kWh/m ² *a	125 kWh/m ² *a	63 kWh/m ² *a

In der ersten Spalte entsprechen die Werte der in Abbildung 69 dargestellten Variante mit der 50%igen Bedarfsdeckung durch importierte Fernwärme. Die Werte verändern sich entsprechend für die zweite Variante einer 90%igen Versorgung durch Fernwärme und die dritte Variante mit der Annahme der Verbrauchsreduktion.

8.5.3 Konventionelle KWK

Für das Szenario der Fernwärmeerzeugung durch konventionelle alte KWK innerhalb der Stadt ändert sich das Sankey-Diagramm im Vergleich zu Abbildung 69 wie dargestellt in der untenstehenden Abbildung 70.

Abbildung 70: Sankey-Diagramm Fernwärmeversorgung mit konventioneller KWK-Anlage

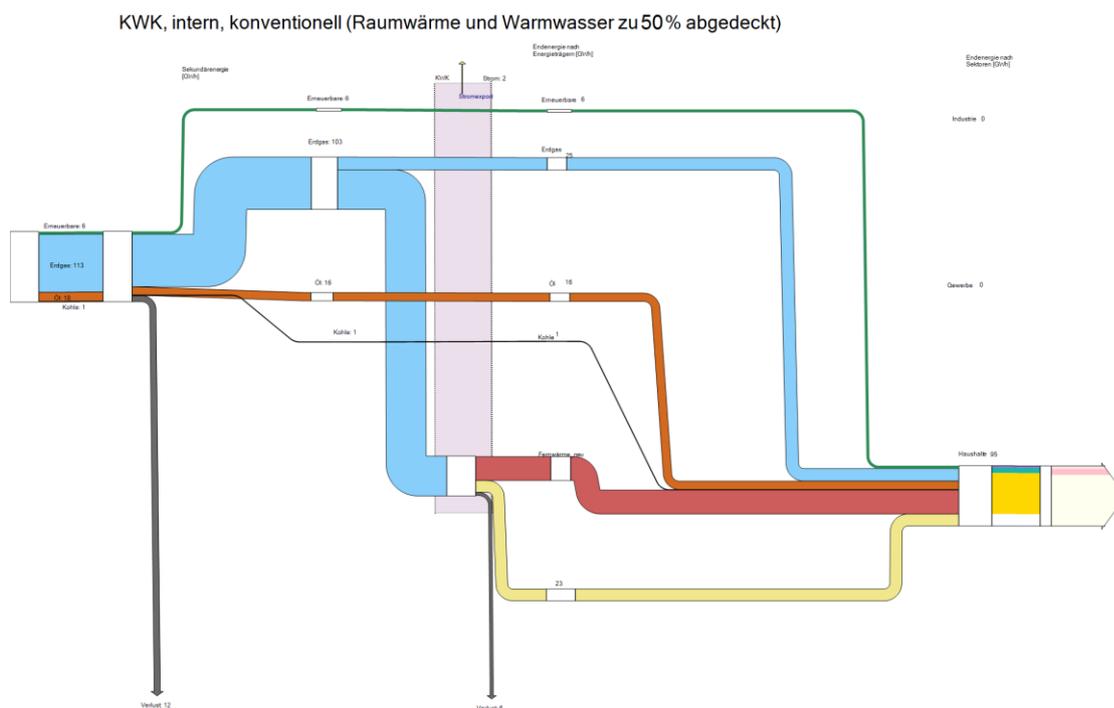


Tabelle 22: Ergebnisübersicht für Fernwärmeversorgung über konventionelle KWK

KWK Fernwärme konventionell	50% Fernwärme (vgl. Bild)	90% Fernwärme	90% Fernwärme, 50% Wärmebedarf
Primärenergie-Ausnutzung (Gesamt)	18,0%	20,2%	26,0%
Primärenergie-Ausnutzung (Wärmeversorgung)	3,7%	4,5%	4,8%
Primärenergie-Verbrauch (Gesamt) pro Einwohner und Jahr	6,37 MWh/EW*a	5,69 MWh/EW*a	4,19 MWh/EW*a
Primärenergie-Verbrauch (Wärmeversorgung) pro Fläche und Jahr	95 kWh/m ² *a	77 kWh/m ²	39 kWh/m ²

8.5.4 KWK mit Rücklauf-Nutzung

Wird die Fernwärme innerhalb der Stadt erzeugt, mit einem Anteil von 40% neuer Fernwärme, 30% Nahwärme- und 30% LowEx-Anteil (das entspricht einer Entnahme aus dem Rücklauf) ergibt sich untenstehendes Sankey-Diagramm (Abbildung 71).

Abbildung 71: Sankey-Diagramm Fernwärmeversorgung mit Rücklaufausnutzung

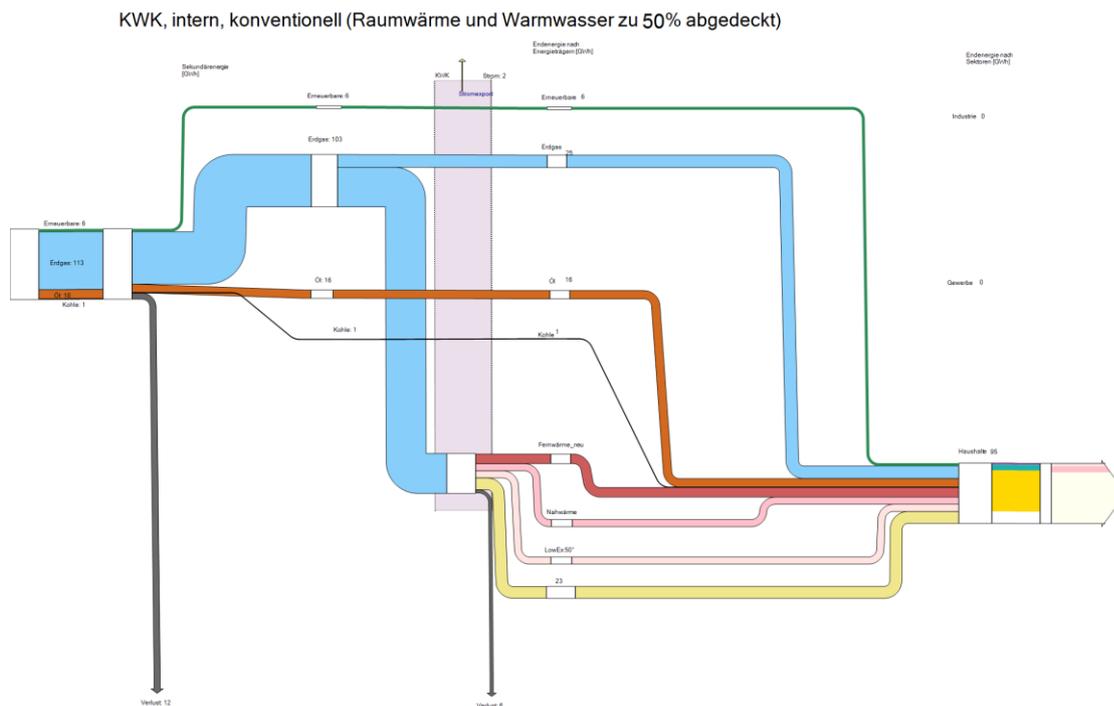


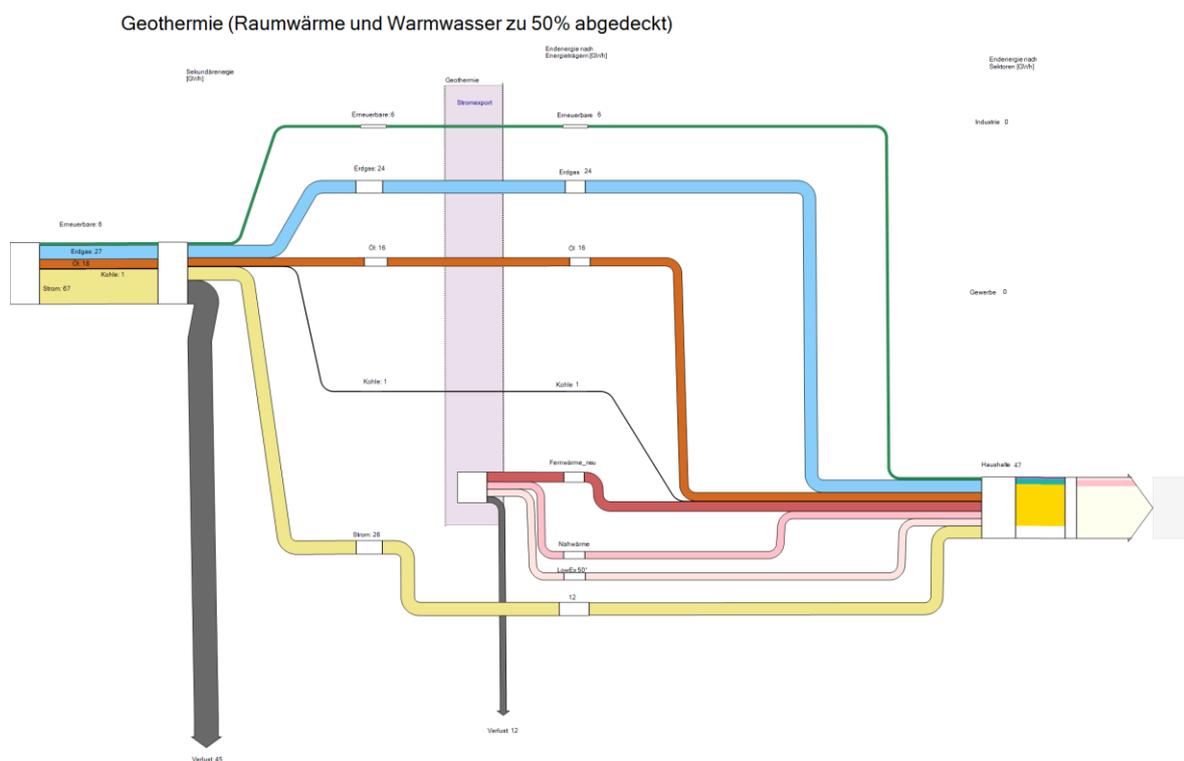
Tabelle 23: Ergebnisübersicht Fernwärmeversorgung mit Rücklaufausnutzung

KWK Fernwärme Rücklauf	50% Fernwärme (vgl. Bild)	90% Fernwärme	90% Fernwärme, 50% Wärmebedarf
Primärenergie-Ausnutzung (Gesamt)	19,4%	23,7%	28,9%
Primärenergie-Ausnutzung (Wärmeversorgung)	4,2%	6,2%	6,8%
Primärenergie-Verbrauch (Gesamt) pro Einwohner und Jahr	5,91 MWh/EW*a	4,86 MWh/EW*a	3,77 MWh/EW*a
Primärenergie-Verbrauch (Wärmeversorgung) pro Fläche und Jahr	83 kWh/m ² *a	56 kWh/m ² *a	28 kWh/m ² *a

8.5.5 Fernwärme aus tiefer Geothermie

Für tiefe Geothermie ergibt sich folgendes Diagramm:

Abbildung 72: Sankey Diagramm Fernwärmeversorgung mit Geothermie



In Tabelle 24 sind die wichtigsten Faktoren noch einmal zusammengefasst, wie sie sich nach der Abbildung 72 ergeben nach dem Szenario, dass 90% des Raumwärme- und Warmwasserbedarf über Fernwärme gedeckt wird.

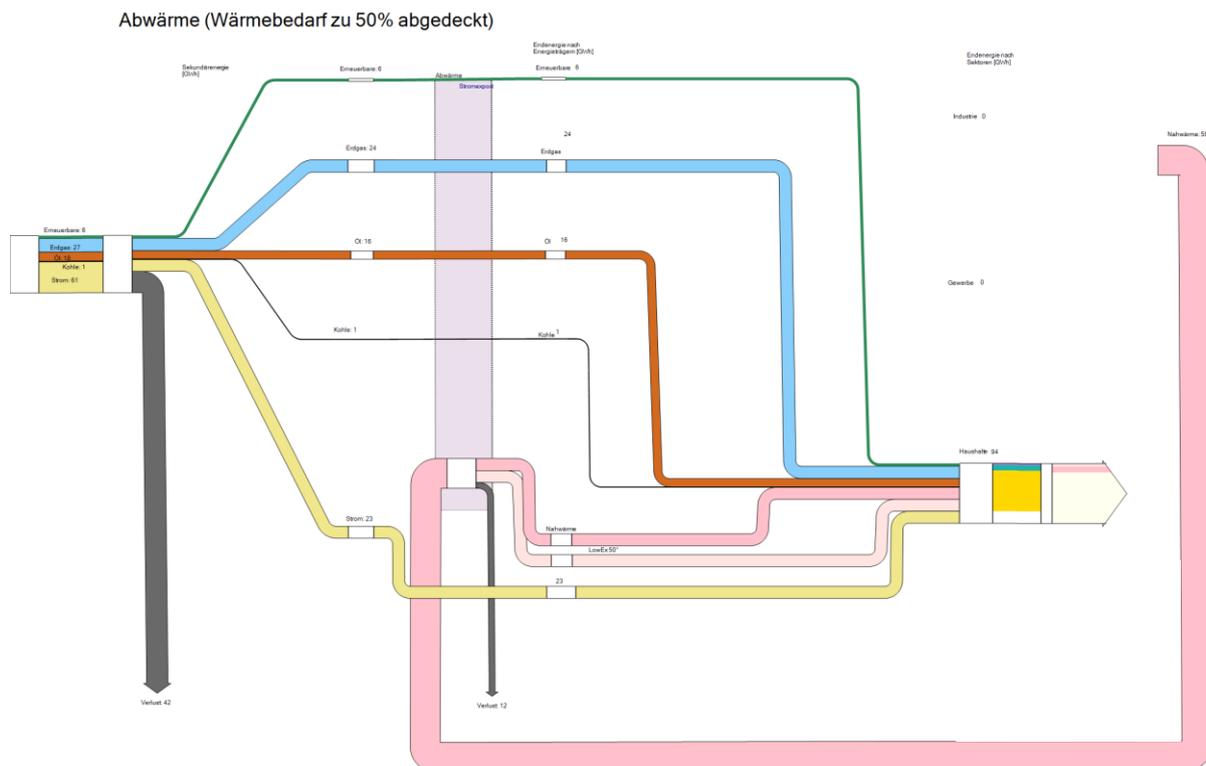
Tabelle 24: Ergebnisübersicht Fernwärmeversorgung mit Geothermie

Fernwärme aus tiefer Geothermie	50% Fernwärme (vgl. Bild)	90% Fernwärme	90% Fernwärme, 50% Wärmebedarf
Primärenergie-Ausnutzung (Gesamt)	20,6%	26,9%	31,3%
Primärenergie-Ausnutzung(Wärmeversorgung)	4,7%	8,6%	9,1%
Primärenergie-Verbrauch (Gesamt) pro Einwohner und Jahr	5,58 MWh/EW*a	4,27 MWh/EW*a	3,48 MWh/EW*a
Primärenergie-Verbrauch (Wärmeversorgung) pro Fläche und Jahr	75 kWh/m ² *a	41 kWh/m ² *a	20 kWh/m ² *a

8.5.6 Fernwärme aus Abwärme von Industriebetrieben

Für das Szenario einer vollständigen Deckung des Fernwärmeanteils über industrielle Abwärme ergibt sich folgendes Diagramm (Abbildung 73).

Abbildung 73: Sankey-Diagramm Fernwärmeversorgung mit industrieller Abwärme



Die dazugehörigen Daten finden sich in Tabelle 25.

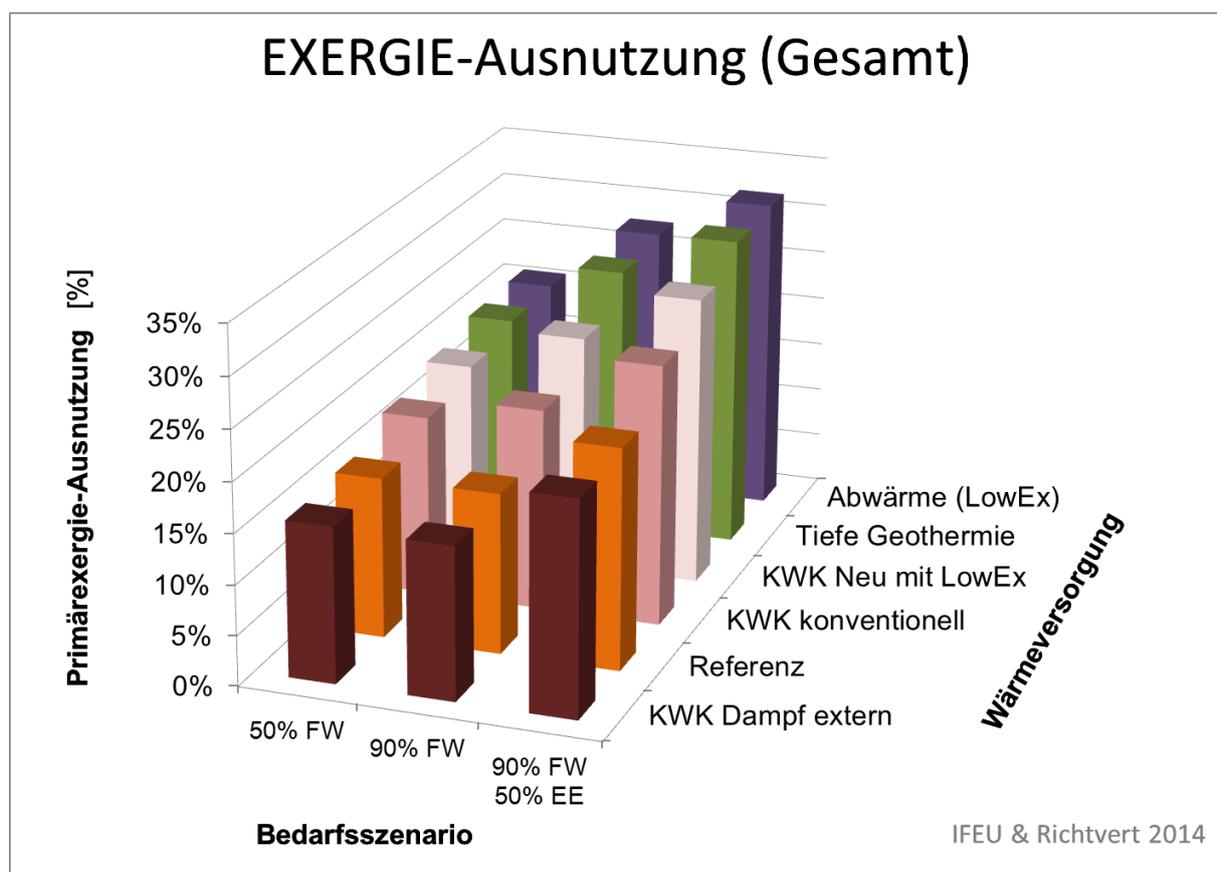
Tabelle 25: Ergebnisübersicht für Fernwärmeversorgung mit industrieller Abwärme

Fernwärme aus industrieller Abwärme	50% Fernwärme (vgl. Bild)	90% Fernwärme	90% Fernwärme, 50% Wärmebedarf
Primärenergie-Ausnutzung (Gesamt)	20,8%	27,6%	31,8%
Primärenergie-Ausnutzung(Wärmeversorgung)	4,8%	9,2%	9,7%
Primärenergie-Verbrauch (Gesamt) pro Einwohner und Jahr	5,53 MWh/EW*a	4,17 MWh/EW*a	3,43 MWh/EW*a
Primärenergie-Verbrauch (Wärmeversorgung) pro Fläche und Jahr	73 kWh/m ² *a	38 kWh/m ² *a	19 kWh/m ² *a

8.6 Zusammenfassung und Auswertung für den Wohngebäudesektor (Modellstadt)

Für die Parameter Gesamtausnutzung, Raumwärme & Warmwasser, Exergieausnutzung, Exergie pro Einwohner und Exergie pro m² sind die Ergebnisse für die verschiedenen Optionen sowohl in einer Tabelle (Tabelle 26) als auch als Kennwerte graphisch dargestellt. Abbildung 74 zeigt die Primärenergie-Ausnutzung über alle Anwendungen (Prozesswärme, Warmwasser, Raumwärme und Strom).

Abbildung 74: Primärenergie-Ausnutzung über alle Anwendungen (Prozesswärme, Warmwasser, Raumwärme und Strom)



Das Referenzsystem besitzt keinen Fernwärmeanteil und ist daher für alle Fälle identisch. Für die Fälle 50% FW und 90%FW ist der Exergiebedarf auch identisch. Dieser wird durch den Energiebedarf und das Verhältnis der Energiemenge für Warmwasser, Strom und Heizung bestimmt. Beim Szenario 90%FW / 50% EE werden anteilig mehr Trinkwarmwasser und Strom benötigt, da durch bessere Dämmung ausschließlich der Heizwärmebedarf sinkt, während der Trinkwasser- und Strombedarf konstant bleibt. Damit steigt auch die durchschnittliche Energiequalität des Bedarfs. Somit ist die Primärenergie-Ausnutzung für den Fall 90%FW / 50%EE für alle Versorgungsoptionen höher als für die anderen beiden Fällen.

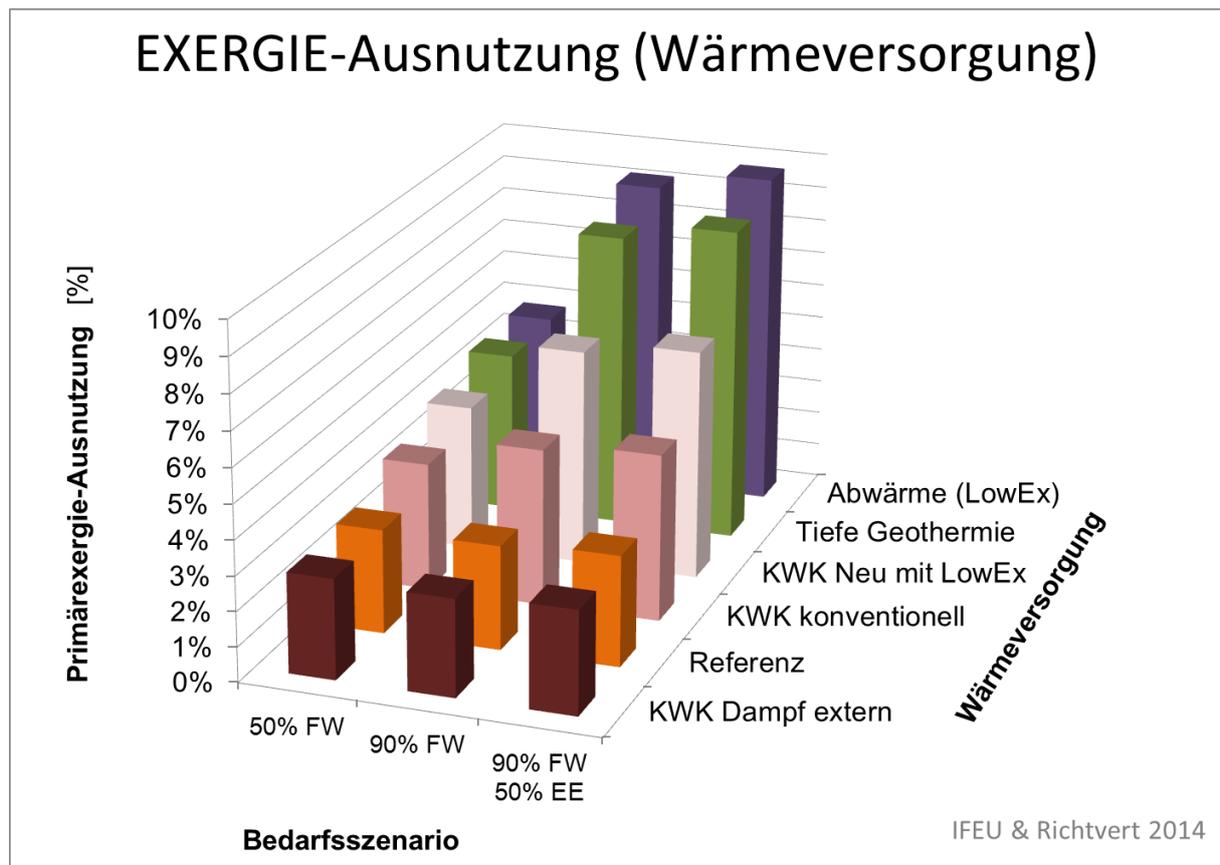
Im Vergleich der verschiedenen Versorgungsoptionen bleibt die Reihenfolge der Systeme unabhängig von dem untersuchten Bedarfsszenario gleich. So erzielt die Versorgung mit Abwärme aus Industriebetrieben mit fast 30% für den Fall 90% FW / 50% EE die besten Werte, gefolgt von Fernwärme aus tiefer Geothermie, Fernwärme aus neuer KWK mit Rücklaufnutzung

(LowEx), Fernwärme aus konventioneller KWK, der Referenz und Fernwärme aus „alter“ Dampf-KWK, welche extern erzeugt wird.

Für die Primärenergetische Bewertung eines externen Energieflusses muss dessen Herkunft bekannt sein (z.B. Abwärme, KWK oder Gaskessel). Die externe Erzeugung hat dabei nur über die ggf. anderen Wärmeverluste Einfluss auf das Bewertungsergebnis.

Noch deutlicher wird diese Verteilung in Abbildung 75, wenn nur Raumwärme und Warmwasser bezüglich der Primärenergie-Ausnutzung betrachtet werden.

Abbildung 75: Primärenergie-Ausnutzung für Raumwärme und Warmwasser



Hier ist die Primärenergieausnutzung der Abwärme (für 90% FW / 50%EE mit 9,7%) um mehr als Faktor 3 größer als die des Referenzsystems für das gleiche Bedarfsszenario (3,2%).

Ein etwas anderes Bild zeigt sich, wenn man den Primärenergieverbrauch pro Einwohner betrachtet (Abbildung 76). Als absolute Größe ändert sich dieser mit einem steigenden oder sinkenden Bedarf und ist somit bei halbem Bedarf auch nur noch halb so groß. Durch den geringeren Bedarf ist auch der Abstand der Ergebnisse für die einzelnen Wärmeversorgungs-Systeme voneinander geringer. Die generelle Reihenfolge in der „Attraktivität“ der Wärmeversorgungs-Systeme bleibt aber gleich.

Wird der Primärenergie-Verbrauch pro Wohnfläche betrachtet wird ergibt sich Abbildung 77.

Abbildung 76: Primärenergieverbrauch für Strom und Wärme pro Einwohner

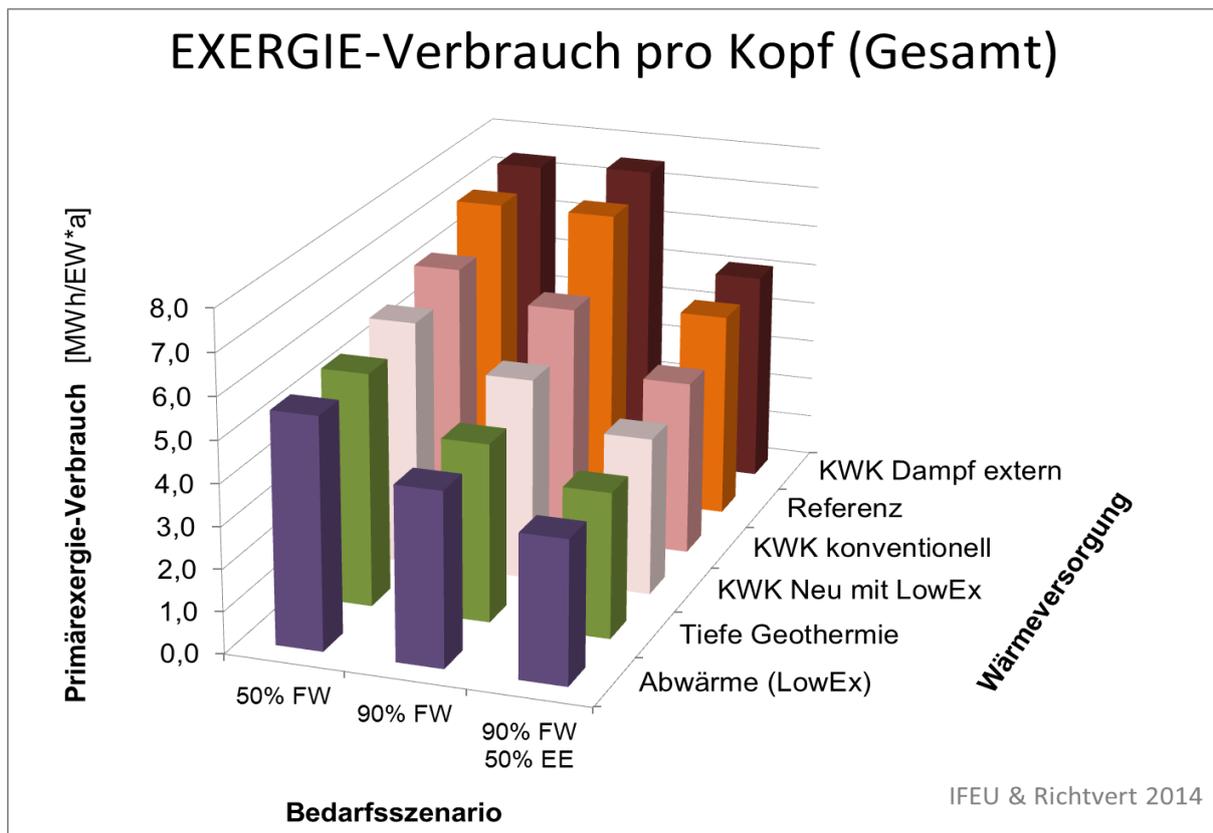
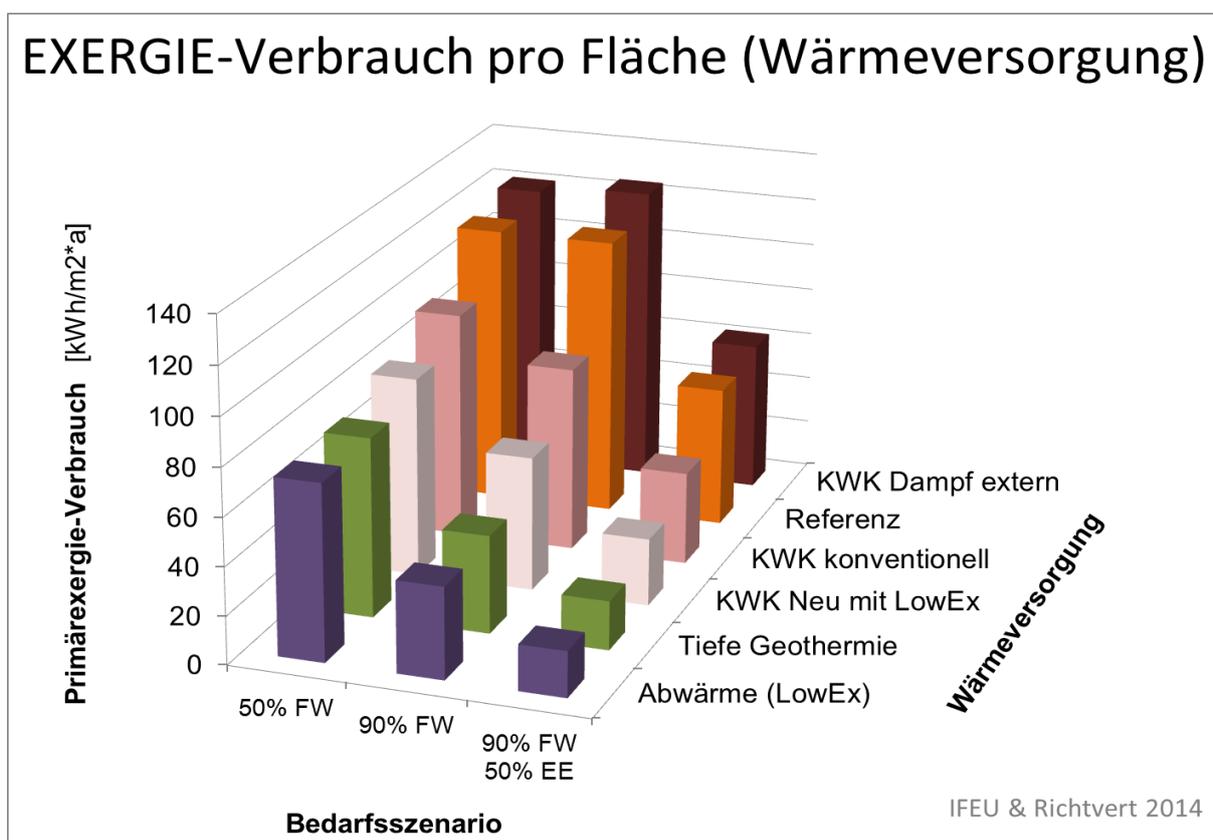


Abbildung 77: Primärenergieverbrauch für Raumwärme und WW-Erzeugung pro Wohnfläche



Dieser Kennwert hat den Vorteil, dass er analog zum Primärenergieverbrauch bei der standardmäßigen Gebäudebewertung nach EnEV die Einheit kWh/(m²a) hat. Da in der EnEV nur der Stromverbrauch für die Gebäudetechnik bewertet wird, erscheint es sinnvoll den individuellen Stromverbrauch auszuklammern und ausschließlich die Wärmeversorgung zu betrachten. Damit wird durch diesen Kennwert der Unterschied der sich aus der wissenschaftlich-exergetischen im Vergleich zur gesetzlich-energetischen Bewertung ergibt besonders gut deutlich.

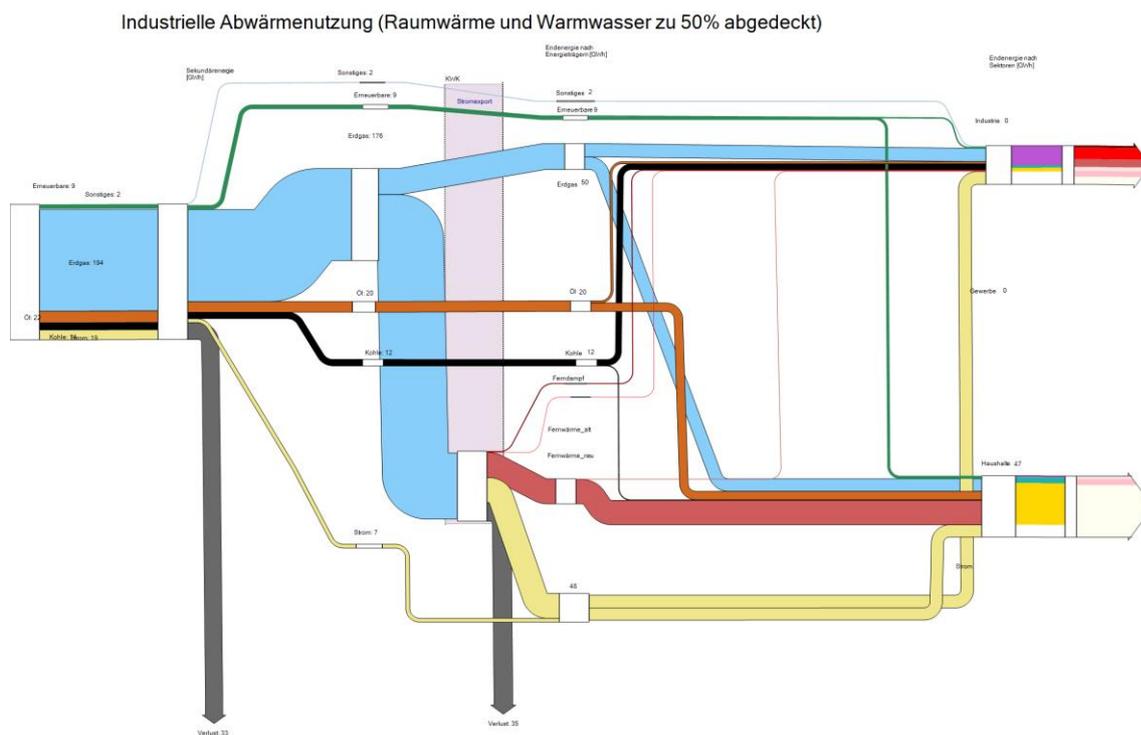
Tabelle 26: Ergebnisübersicht aller betrachteten Optionen

EXERGIE-Ausnutzung (Gesamt)	KWK Dampf importiert	Referenz: Dezentrale Erzeugung	KWK konventionell	KWK Neu/RL	Tiefe Geothermie	Abwärme
50% FW	15,5%	16,0%	18,0%	19,4%	20,6%	20,8%
90% FW	15,2%	16,0%	20,2%	23,7%	26,9%	27,6%
90% FW, halber Verbrauch	21,3%	22,0%	26,0%	28,9%	31,3%	31,8%
EXERGIE-Ausnutzung (RW & WW)	KWK Dampf importiert	Referenz: Dezentrale Erzeugung	KWK konventionell	KWK Neu/RL	Tiefe Geothermie	Abwärme
50% FW	2,9%	3,0%	3,7%	4,2%	4,7%	4,8%
90% FW	2,8%	3,0%	4,5%	6,3%	8,6%	9,2%
90% FW, halber Verbrauch	3,0%	3,2%	4,8%	6,6%	9,1%	9,7%
Primärenergie (Gesamt) pro Einwohner [MWh]	KWK Dampf importiert	Referenz: Dezentrale Erzeugung	KWK konventionell	KWK Neu/RL	Tiefe Geothermie	Abwärme
50% FW	7,41	7,19	6,37	5,91	5,58	5,53
90% FW	7,55	7,19	5,69	4,86	4,27	4,17
90% FW, halber Verbrauch	5,12	4,96	4,19	3,77	3,48	3,43
Primärenergie (RW & WW) pro m² [kWh]	KWK Dampf importiert	Referenz: Dezentrale Erzeugung	KWK konventionell	KWK Neu/RL	Tiefe Geothermie	Abwärme
50% FW-Netz	122	117	95	83	75	73
90% FW-Netz	125	117	77	56	41	38
90% FW-Netz 50% Verbrauch	63	59	39	28	20	19

8.7 Ausblick: Erweiterung um den Industrie-Sektor

Bezieht man den Industrie-Sektor mit ein, ergibt sich unter der Annahme einer Wärmeversorgung der Haushalte zu 50% aus KWK innerhalb der Stadt folgendes Bild:

Abbildung 78: Sankey-Diagramm für Haushalte (50% Wärme aus KWK-Prozess) und Industrie



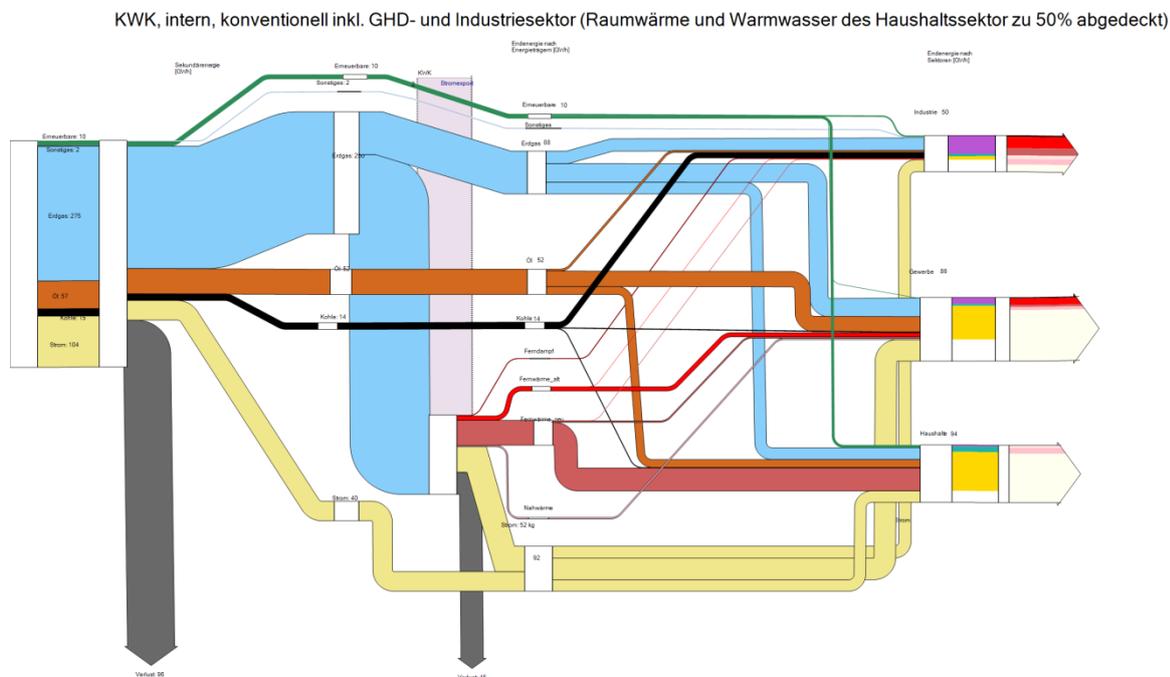
Da im Gegensatz zum Gebäudesektor der Anteil und die Art der Industrie in jeder Stadt hoch spezifisch sind, wurde an dieser Stelle auf eine tabellarische Auswertung verzichtet. Betrachtungen analog zum Gebäudesektor sind jedoch nach Spezifizierung der vorhandenen Industrie ohne weiteres möglich.

Es wird bereits im Sankey Diagramm deutlich, dass die Industrie einen wesentlichen Anteil am Primärenergie-Verbrauch einer Kommune haben kann. Aufgrund der hohen Spezifität der Industrie ist dort jedoch pauschal keine generelle Aussage zur Vorteilhaftigkeit verschiedener Maßnahmen möglich. Hier müsste an jeder Stelle eine Einzelfallbetrachtung erfolgen.

8.8 Ausblick: Erweiterung auf die Gesamtstadt

Bezieht man zusätzlich zu Abbildung 78 auch noch den Gewerbe-Sektor mit ein, ergibt sich eine Betrachtung der gesamten Stadt:

Abbildung 79: Sankey-Diagramm für die Gesamtstadt



Auch hier wurde auf eine tabellarische Darstellung der Ergebnisse verzichtet, da Industrie und Gewerbe sich nur unter extremen Vereinfachungen pauschalisieren lassen. Für die Gesamtstadt ist daher immer eine Einzelfallbetrachtung nötig. Dabei steigt der Primärenergieverbrauch pro Einwohner mit jedem zusätzlich betrachteten Sektor, während der Primärenergieverbrauch für die Raum- und Trinkwasserwärmeversorgung pro Fläche vom baulichen Zustand der Stadt abhängt.

Die Primärenergie-Ausnutzung für die Gesamtstadt steigt mit steigendem Anteil an Strombedarf für die Nutzenergie und sinkt mit steigendem Anteil an Wärmebedarf. Dies liegt an der wesentlich höheren Primärenergie-Ausnutzung der Strombereitstellung (z.B. 38%) im Vergleich zur verhältnismäßig geringen Primärenergie-Ausnutzung der Wärmeversorgung insbesondere für die Bereitstellung von Raumwärme und Trinkwarmwasser (z.B. 6%).

Wird wiederum die Primärenergie-Ausnutzung für die Bereitstellung von Raumwärme und Wärme für die Trinkwarmwasserbereitung betrachtet, so würde auch hier auffallen, dass diese vor allem vom baulichen Zustand der Stadt und weniger von den betrachteten Sektoren abhängt.

9 Entwicklungspfade zur CO₂-Neutralität

In Kapitel 5.7 wurde gezeigt wie Energiesysteme in Bezug auf verschiedene Indikatoren (Energie, Exergie, CO₂ etc.) auf Basis einer exergetischen Bewertung bewertet werden können, in Kapitel 6 wurde gezeigt wie sich Grundsatz-Entscheidungen bei der Auswahl von Gebäudeenergiesystemen mit dem Exergieausweis erleichtern lassen und in Kapitel 8 wurden die Energie- und Exergieströme auf Ebene der Gesamtstadt bzw. von Teilstädten dargestellt und bewertet. Alles diese Betrachtungen setzten ein gewisses technisches Interesse und die Fähigkeit zur korrekten Interpretation von Analyseergebnissen voraus.

Für nur geringfügig technisch Interessierte bietet es sich an, die Darstellung der Bewertungsergebnisse weiter zu vereinfachen und ggf. um weitere Aspekte zu ergänzen. Daher wurde eine Multi-Kriterien-Matrix entwickelt, welche mit Hilfe eines einfachen Punktesystems die unterschiedlichen Kombinationen aus Bedarf und Versorgung in Hinblick auf verschiedene Kriterien schnell erfassbar einschätzen lässt. Dabei geht es weniger um eine exakte Bewertung oder eine abschließende Entscheidung für oder gegen ein System, sondern vielmehr um eine grundsätzliche Vorab-Information zur Güte der verschiedenen Systeme in Hinblick auf verschiedene Aspekte. Darauf aufbauend können interessante Optionen fundiert für eine tiefergehende Analyse ausgewählt werden.

Ziel ist es, den Kommunen ein Werkzeug an die Hand zu geben, das richtungssicher die sinnvollen Entwicklungspfade eines Quartiers (Neubau oder Bestand) zur CO₂-Neutralität aufzeigt. Wesentlicher Fokus liegt dabei auf der qualitativen Einschätzung unterschiedlicher Indikatoren und der Abwägung in Richtung Gesamtziel. Das Ziel der CO₂-Neutralität verstehen wir, im Sinne der Masterplankommune, als weitreichende (-80% bis -95%) Verringerung der Treibhausgasemissionen bis zum Jahre 2050 bei gleichzeitiger Reduzierung des Endenergiebedarfs um mindestens 50%. Die restlichen 5% bis 20% der Treibhausgasemissionen müssten dann noch „neutralisiert“ werden. Dies ist aber nicht Bestandteil der im Folgenden vorgestellten Multi-Kriterien-Matrix.

9.1 Die Multi-Kriterien-Matrix

Um die komplexe Materie für kommunale Anwender anschaulich und leicht zugänglich zu präsentieren, wurde im Rahmen des Projektes ein Programm auf Basis von Microsoft Excel 2010 (EXCEL-Tool) erarbeitet. Dieses EXCEL-Tool soll, auf Basis einiger weniger vorgewählter Parameter wie Bebauungsdichte und Effizienzstandard und Versorgungstechnologie, wesentliche Aussagen zu den in Kapitel 8 bereits beschriebenen Indikatoren treffen und dabei helfen, diese in Bezug auf unterschiedliche Energieversorgungssysteme interpretieren zu können.

Um das Thema möglichst anschaulich zu gestalten, konzentrieren wir uns bei der folgenden modellhaften Quartiersplanung auf den Wohngebäudebereich.

Die Eingabeparameter sind einfach und übersichtlich. Es werden folgende Angaben abgefragt:

- Neubau- oder Altbausituation
- Einwohnerdichte (in Einwohner pro Hektar)
- Wohnflächenbedarf (in m² pro Einwohner)
- Indirekt: Geschossflächenzahl GFZ (aus Einwohnerdichte und Wohnflächenbedarf)
- Dämmstandard als Heizenergiekennwert (in kWh / (m²*a))
- Versorgungsvariante (Auswahlmenü aufbauend auf Kapitel 8)

Abhängig von den Eingaben erfolgt eine qualitative stationäre Bewertung anhand eines 5-Punkterasters für nachfolgende fünf Kriterien (neben der Kurzdarstellung finden sie weitere Er-

läuterungen in den folgenden Kapiteln). Die maximale Punktzahl bedeute immer „besonders gut“. Beispiel: 5 Punkte für Dämmstandard bedeuten nicht, dass der Energiebedarf hoch, sondern dass er besonders niedrig ist.

Die Multi-Kriterien-Matrix lässt sich bei Bedarf um zusätzliche Kriterien erweitern und in den Zielwerten sowie der Schrittweite für die einzelnen Punkte anpassen. Das ermöglicht einerseits eine hohe Anpassung auf eine spezifische Aufgabe andererseits birgt diese Anpassungsmöglichkeit eine Manipulationsgefahr, weshalb die Multi-Kriterien-Matrix für die Entscheidungsfindung immer von genaueren Bewertungsergebnissen flankiert werden muss. In der Multi-Kriterien-Matrix sind die Kriterien absichtlich allgemeinverständlich und nicht mit Hilfe Ihrer wissenschaftlichen Begriffe benannt, um da Verständnis zu erleichtern. So wird auch auf die Erwähnung von Exergie verzichtet, obwohl sie die Grundlage der Effizienzberechnung ist und bei KWK Anlagen auch die Allokation der Emissionen beeinflusst.

9.1.1 Indikatoren der Multi-Kriterien-Matrix

Abbildung 80: Multi-Kriterien-Matrix zur qualitativen Bewertung von Energiesystemen auf Quartiersebene

Dämmstandard				
☹	☺	☺	☺	☺
●	●	●	●	
Effizienz_{ex}				
☹	☺	☺	☺	☺
●				
CO₂				
☹	☺	☺	☺	☺
●	●			
EEQ / Abwärme				
☹	☺	☺	☺	☺
Wärmenetz				
☹	☺	☺	☺	☺
○				

Dämmstandard: Hier wird der tatsächliche bzw. geplante Dämmstandard (Heizwärmebedarf) in Bezug gesetzt zu einem Zielwert (Passivhaus). 5 Punkte bedeutet: Zielwert erreicht. 0 Punkte bedeutet: Energiebedarf ca. 3-mal höher als der Zielwert.

Effizienz: Hier wird die Primärenergie-Ausnutzung (siehe auch Kapitel 5.8) in 1,5%-Schritten bepunktet. Zur Abgrenzung gegenüber der klassischen endenergiebezogenen Effizienz abzugrenzen wird das tiefgestellt Kürzel „ex“ angehängt. 5 Punkte bedeutet: 8% oder darüber. 0 Punkte bedeutet: weniger als 2%.

CO₂-Emissionen: Hier werden die CO₂-Emissionen pro Energiebezugsfläche abhängig vom Zielwert bewertet. 5 Punkte bedeuten spezifische CO₂-Emissionen unter 5 kg CO₂/(m²*a), 0 Punkte: CO₂-Ausstoß mehr als 5-mal höher als der Zielwert.

EEQ/Abwärme: Hier wird der Anteil der Erneuerbaren Energien Quellen (EEQ) an der Wärmeversorgung bzw. der Anteil der Abwärme aufgezeigt. 5 Punkte bedeutet: Anteil EEQ/Abwärme bei über 90%. 0 Punkte: keine Nutzung von EEQ

Wärmenetz: Hier wird die Eignung für ein Wärmenetz dargestellt. Die Wärmedichte (siehe Kapitel 9.2.3) wird hier, beginnend mit 300 kWh/(m²*a), in Schritten von 200 kWh/(m²*a) bepunktet. 5 Punkte bedeutet: Wärmedichte über 1.100 kWh/(m²*a).

Bevor die Multi-Kriterien-Matrix an einem Beispiel erläutert wird (siehe Kapitel 9.3), werden im Folgenden noch Eingabe und Ausgabewerte detaillierter beschrieben. Dabei wird insbesondere auf das Kriterium „Wärmenetz“ eingegangen, da es in den vorherigen Bewertungswerkzeugen noch nicht berücksichtigt wurde.

9.2 Der Indikator: „Wärmenetz“

Wesentliche Voraussetzung für die Option einer leitungsgebundenen Wärmeversorgung ist eine angemessene Wärmebedarfsdichte. Diese resultiert aus der Bebauungsdichte (städtebaulichen Dichte) und dem Wärmebedarf der Gebäude (bzw. der Einwohner).

9.2.1 Bebauungsdichte (städtebauliche Dichte)

Die Bebauungsdichte wird in den Bebauungsplänen der Kommunen festgelegt. Auf der einen Seite wird versucht, eine möglichst hohe Dichte zu erreichen (Rentabilität für den Investor, ökologische und soziale Vorteile u.a. bzgl. Klimaschutz und Nahversorgung), auf der anderen Seite führt der Wunsch der Bewohner auch heute noch häufig in Richtung des eigenen Häuschens mit Gartengrundstück und damit eher zu einer lockeren Bebauung.

Kennwert der Bebauungsdichte in Bebauungsplänen ist die Geschossflächenzahl (GFZ), die sich aus der Zahl der Vollgeschosse und der Grundflächenzahl (GRZ) ergibt.

Die Grundflächenzahl gibt den Flächenanteil eines Baugrundstückes an, der überbaut werden darf. *Beispiel: Eingehalten werden muss eine GRZ von maximal 0,3: Die Grundfläche des Hauses beträgt 112 m², die Fläche des Grundstückes 400 m². Die GRZ beträgt dann $112/400 = 0,28$. Damit ist die GRZ von 0,3 unterschritten.*

Die Geschossflächenzahl gibt das Verhältnis der gesamten Geschossfläche aller Vollgeschosse zu der Fläche des Baugrundstückes an. *Beispiel: Eingehalten werden muss eine GFZ von maximal 0,6: Die Fläche des Grundstückes beträgt 400 m². Die Summe der Geschossfläche des Hauses darf somit 240 m² nicht überschreiten. Beim vorigen Beispiel (Grundfläche des Hauses 112 m²) wäre also bei 2 Vollgeschossen (224 m²) die GFZ eingehalten.*

Von der GFZ ist der Aufwand für die Versorgung eines Quartiers stark abhängig. Je dichter die Bebauung, desto günstiger ist es für die Infrastruktur (Energie- / Wärmeversorgung, Nahverkehr etc.). Für eine Einfamilienhausbebauung (GFZ 0,4 oder 0,5) ist eine Nahwärmeversorgung z.B. schwerer realisierbar als für eine Reihenhaussiedlung (GFZ 0,9) oder eine Blockrandbebauung (GFZ 1,5).

Einwohnerdichte

Für die überschlägige Berechnung verwenden wir im EXCEL-Tool die Einwohnerdichte statt der GFZ. Damit können auch Areale berechnet werden, für die keine Planungsdaten, sondern nur eine grobe Schätzung der Einwohnerdichte vorliegt. Die Einwohner- bzw. Bevölkerungsdichte wird global in Einwohner pro km², im deutschsprachigen Raum auch in Einwohner pro Hektar angegeben¹.

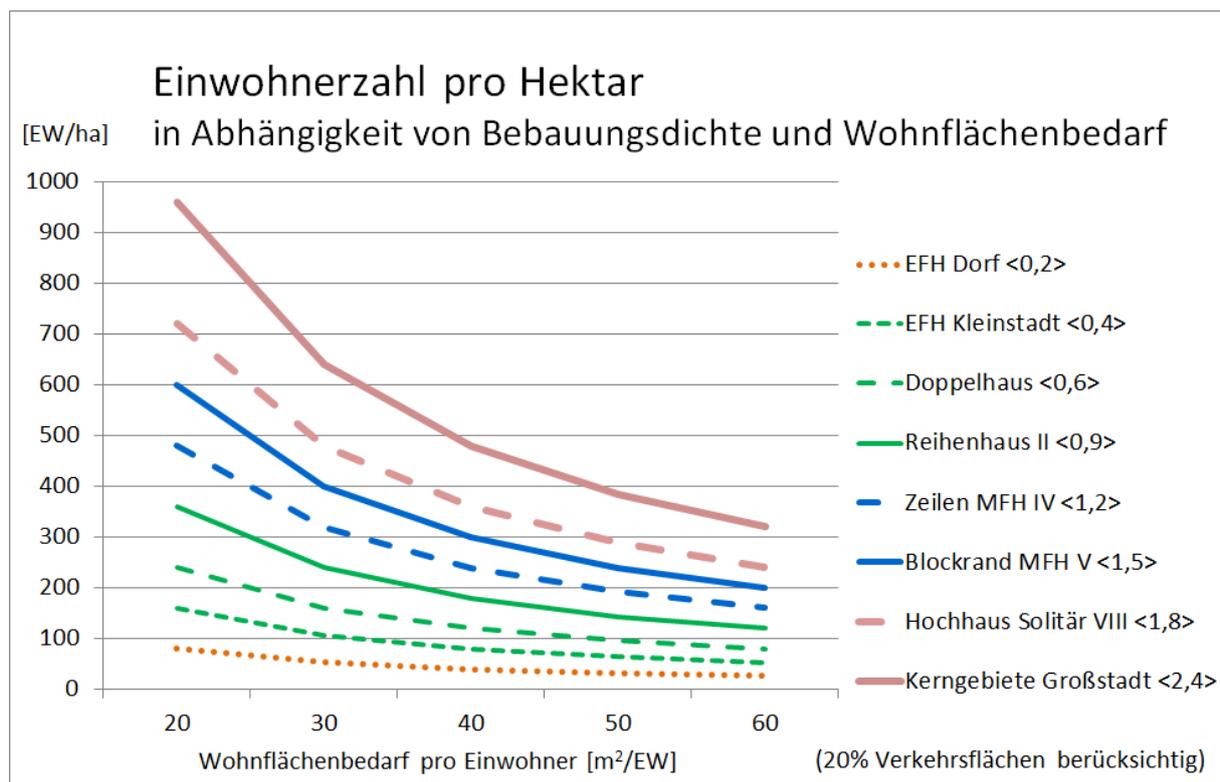
Die Einwohnerdichte lässt sich auch grob aus der GFZ herleiten. Mit der GFZ kann die Bruttowohnfläche pro Hektar Bebauungsfläche berechnet werden ($GFZ \times 10.000 \text{ m}^2$). Die Teilung durch den vorgesehenen oder tatsächlichen (Brutto-)Wohnflächenbedarf führt zu der Einwohnerdichte. *Beispiel: In einer Doppelhaussiedlung ist eine GFZ von 0,6 einzuhalten. Auf einem*

¹ 1 Hektar (ha) = 100 Ar (a) = 0,01 km² = 10.000 m² (1 km² = 100 ha).

Hektar Baugrund darf daher eine Bruttowohnfläche von 6.000 m² (10.000 m² x 0,6) nicht überschritten werden. Pro Einwohner wird eine Bruttowohnfläche von 50 m² erwartet. Damit könnten 120 Personen untergebracht werden.

Abbildung 81 zeigt die Einwohnerzahl pro Hektar in Abhängigkeit vom Siedlungstyp bzw. der GFZ (in Klammern <>) und dem Wohnflächenbedarf auf. Dabei wurden pauschal 20% Verkehrsflächen berücksichtigt.

Abbildung 81: Einwohnerzahl pro Hektar in Abhängigkeit von der Bebauungsdichte und dem Bruttowohnflächenbedarf pro Einwohner.



Deutlich wird, dass die Einwohnerdichte wesentlich von der Siedlungsstruktur abhängt. Bei einem heutigen Wohnflächenbedarf von ca. 45 m² pro Person können auf einem Hektar Netto-Baulandfläche mit einer lockeren Einfamilienhausbebauung (GFZ = 0,2) etwa 36 Bewohner untergebracht werden. In einer Reihenhaussiedlung (GFZ = 0,9) wären es schon 160 und in einer Stadt mit 8-geschossigen Solitärhäusern (GFZ = 1,8) 320 Personen. Die Einwohnerdichte kann daher mit Faktor 10 oder mehr (für Großstadtkerngebiete) durch die Siedlungsstruktur beeinflusst werden².

Der Einwohnerbezogene Wohnflächenbedarf hat dagegen weniger Einfluss auf die Einwohnerdichte. Er schwankt im Extremfall um den Faktor 3. Er ist zudem schwer durch die Kommune beeinflussbar. So lag der durchschnittliche Wohnflächenbedarf in Deutschland im Jahr 1960 noch bei 20 m² pro Person. Heute liegt er bei etwa 45 m², im Jahr 2030 könnten es 60 m² pro Person sein. Gesellschaftliche Trends (Singlehaushalte, Patchwork Familien, Gentrifizierung, höhere Einkommen, ...) führten zu diesem höheren Wohnflächenbedarf. Im Gegensatz zur Effi-

² Hinzu kommt, dass der spezifische Wohnflächenbedarf im verdichteten Wohnungsbau in der Regel niedriger ist als bei locker bebauten Siedlungen mit Einfamilienhäusern.

zizienzsteigerung führt allerdings eine Erhöhung der Suffizienz durch Reduzierung des spezifischen Wohnflächenbedarfs (z.B. durch Mehrgenerationenwohnen, Wohnbörsen, betreutes Wohnen etc.) zu positiven Effekten bzgl. Nahversorgung.

Optimal für die Nahversorgung sind eine verdichtete Bebauung und ein geringer Einwohnerbezogener Wohnflächenbedarf. Ein gutes Beispiel dafür ist die Kalbreite in Zürich. Dort werden auf einem 6.350 m² großem Areal im Stadtzentrum 88 Wohnungen für 230 Einwohner errichtet (ca. 360 EW/ha). Die Einwohner verpflichten sich im Mietvertrag, eine Wohnfläche von 33 m² pro Person nicht zu überschreiten (und zudem auch auf eine Auto bzw. einen Stellplatz zu verzichten (Kalkbreite 2011)).

Im Folgenden ist die Einwohnerdichte von Wohngebieten an konkreten Beispielen aus Tübingen veranschaulicht [Quelle: ebök Tübingen].



Herrlesberg: 64 EW / ha



Loretto: 131 EW / ha



Schafbrühl: 179 EW / ha



Französisches Viertel 220 EW / ha

9.2.2 Wärmebedarf der Gebäude

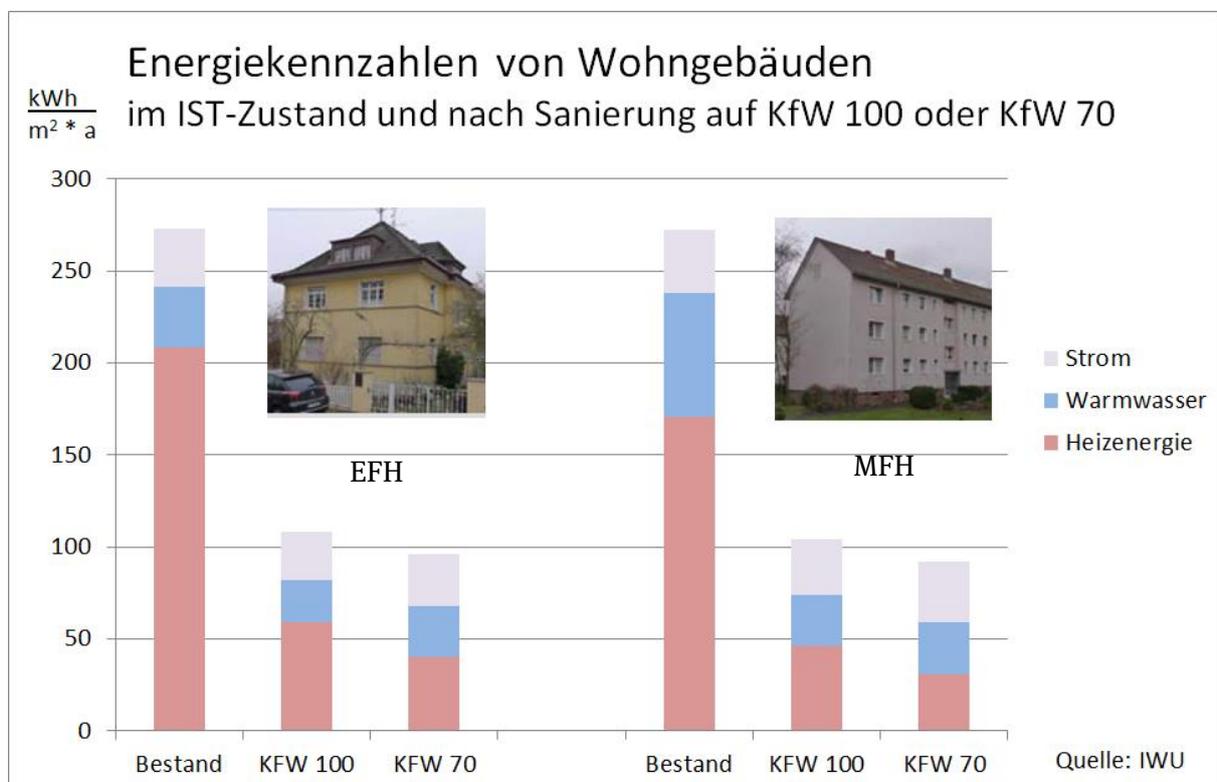
Während die Bebauungsdichte die gesamte Versorgungsstruktur (Mobilität, Güter, Energie...) beeinflusst, wirkt der Effizienzstandard der Gebäude vor allem auf die Energieversorgung. Aus der Bebauungsdichte und dem Effizienzstandard ergibt sich die Wärmedichte des Baugebietes. Letztere bestimmt wesentlich die Auswahl des Energieversorgungssystems (siehe unten).

Als Beispiel für Effizienzstandards sind in die Energiekennzahlen von zwei Bestandsgebäuden im Ist-Zustand und nach Sanierung auf KfW-Effizienzhaus 100 bzw. 70 (EnEV 2009) dargestellt (Enselin 2013). Beim Einfamilienhaus (163 m², 2-geschossig, 1 WE, Baualtersklasse 1919 bis 1948) verringert sich der Heizwärmeverbrauch von 208 auf 59 bzw. 40 kWh/(m²*a). Beim

Mehrfamilienhaus (782 m², 3-geschossig, 12 WE, Baualtersklasse 1958 bis 1968) sinkt er von 171 auf 46 bzw. 31 kWh/(m²*a).

Betrachtet man den gesamten Bereich Wärme (Heizung und Warmwasser), sinkt der Verbrauch von etwa 240 kWh/(m²*a) im KfW-70 Standard auf etwa 70 beim EFH und 60 beim MFH. Die Ausgangswerte liegen bei den Gebäuden in diesem Fall nahe beieinander, da beim MFH der bessere Wert im Bereich Heizwärme durch den deutlich höheren Wert im Bereich Warmwasserverbrauch nahezu ausgeglichen wird. Diese Zielwerte könnten sicher in vielen Fällen, z.B. durch Einsatz von Passivhauskomponenten, noch übertroffen werden. Allerdings gibt es im Bestand mitunter auch Dämmrestriktionen z.B. durch den Denkmalschutz (Jochum, Mellwig 2012), sodass nicht für alle Gebäude eines Quartiers die ambitionierten Ziele vollständig erreicht werden können.

Abbildung 82: Einwohnerzahl pro Hektar in Abhängigkeit von der Bebauungsdichte und dem Bruttowohnflächenbedarf pro Einwohner.



Deutlich wird an dem Beispiel aber auch, dass der Anteil des, über das Jahr relativ konstanten, Warmwasserverbrauchs im Zielzustand stark steigt (EFH 41%, MFH 47%). Auch der Stromverbrauchsanteil (hier vorwiegend Haushaltsstrom) steigt, trotz leichter Verringerung des Stromverbrauchs, erheblich (EFH 29%, MFH 36%).

9.2.3 Wärmedichte

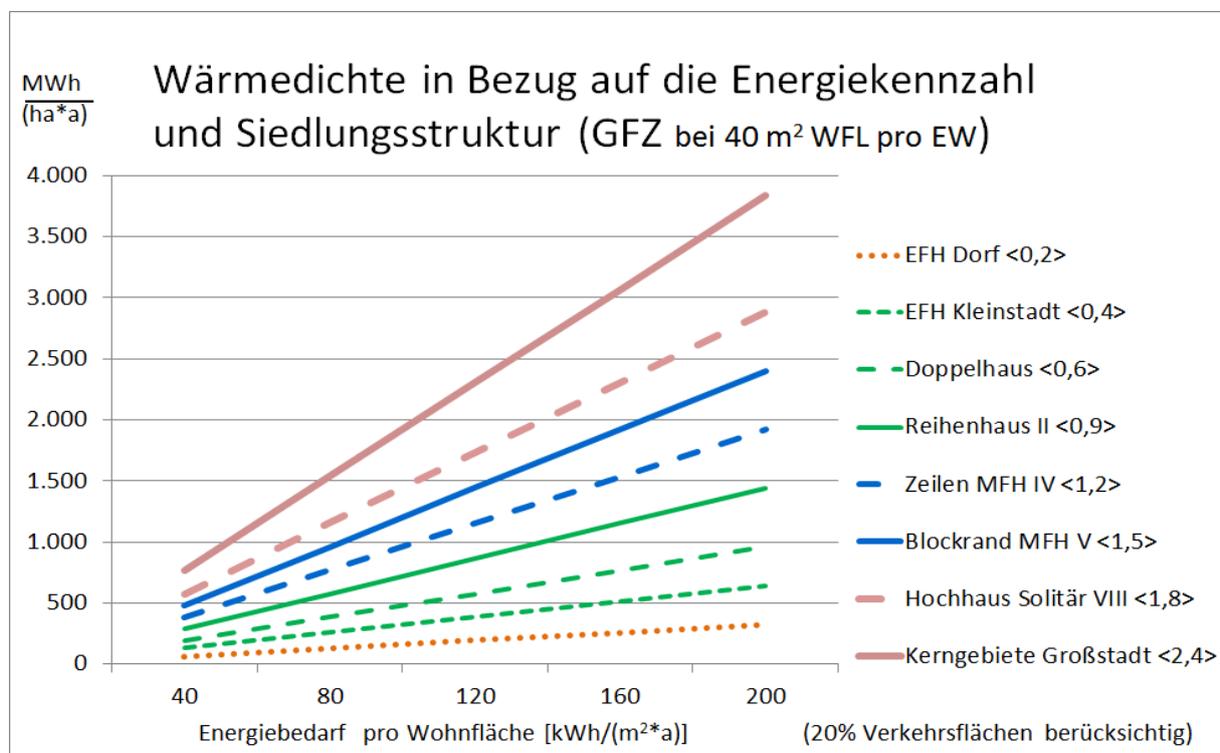
Aus der Bebauungsdichte und dem Effizienzstandard ergibt sich die Wärmedichte des Baugebietes. Abbildung 83 zeigt die Wärmedichte in Abhängigkeit vom Siedlungstyp bzw. der GFZ (in Klammern <>) und der Energiekennzahl (Heizung und Warmwasser) auf. Auch hier wurden pauschal 20% Verkehrsflächen berücksichtigt.

Im Extremfall variiert die Wärmedichte theoretisch zwischen 64 MWh/(ha*a) bei einem neugebauten Passivhaus in lockerer ländlicher Bebauung (GFZ 0,2) und 3.840 MWh/(ha*a) bei undgedämmten Altbauten in verdichteten Kernbereichen der Großstädte (Faktor 60!). In der Praxis liegen die Wärmedichten bei Landgemeinden zwischen 250 und 400 MWh/(ha*a). Städte mit größeren Fernwärmegebieten liegen bei circa 900 MWh/(ha*a).

In Bezug auf die Eignung zur Errichtung von Wärmenetzen ist allerdings die Liniendichte aussagekräftiger. Daher sind die Wärmedichten aus Abbildung 83 in Abbildung 84 in Liniendichten umgerechnet. Ergebnis ist hier die Wärmearbeitsliniendichte in kWh/(m*a) und nicht die Wärmeleistungsliniendichte in MW/km.

Zur vereinfachten Berechnung wurden aktuelle siedlungsspezifische Netzdaten (Henning 2011) auf die GFZ bezogen.

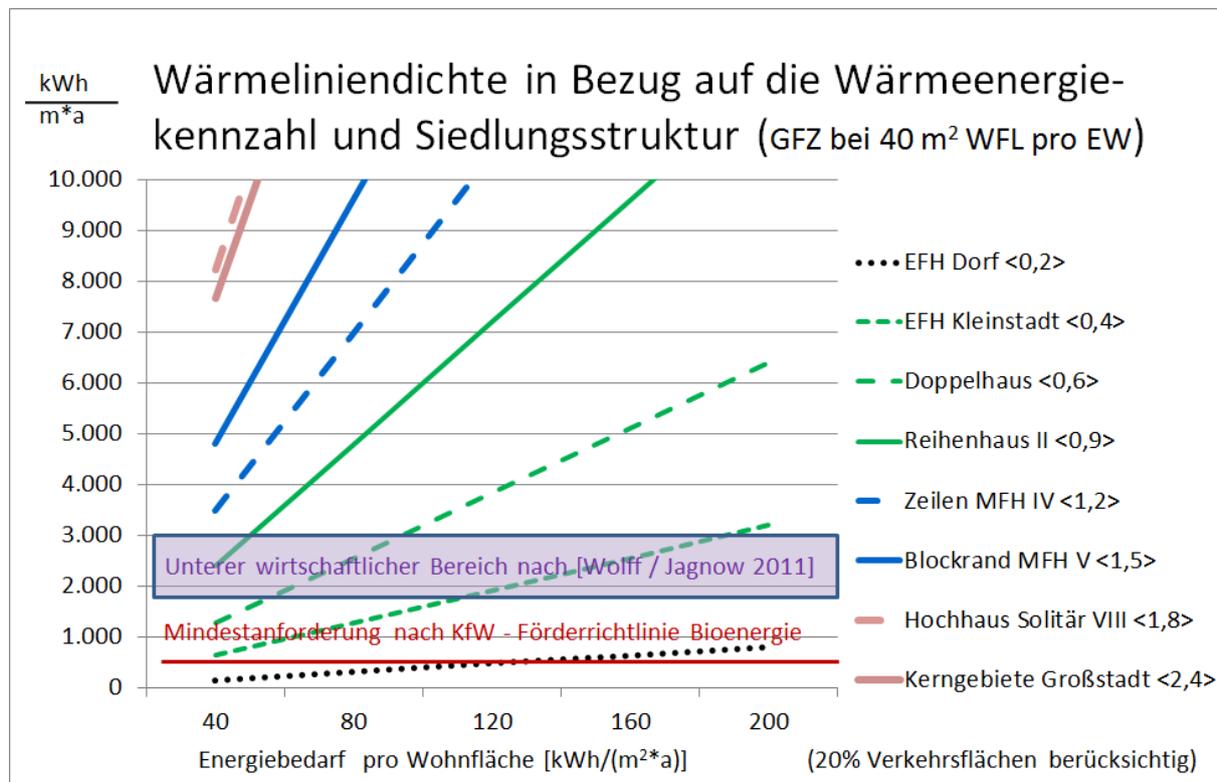
Abbildung 83: Wärmedichte in Bezug zur Energiekennzahl und der Siedlungsstruktur



Zu erkennen ist, dass bei verdichteten Siedlungsstrukturen mit einer GFZ über 0,9 selbst bei einem extrem guten Effizienzstandard (ähnlich Passivhausstandard) noch eine Wirtschaftlichkeit von Wärmenetzen nach (Wolff, Jagnow 2011) erreicht werden kann³. Über den Mindestanforderungen nach KfW-Förderung für erneuerbare Wärmenetze liegen zudem alle Werte, außer die von dünn besiedelten ländlichen Strukturen (GFZ 0,2) mit gutem Effizienzstandard. Ob diese aber auch wirtschaftlich betrieben werden können, ist nicht einfach zu beantworten. Daher folgt hier ein EXKURS zur Zukunft von Wärmenetzen.

³ Wolf, Jagnow 2011: Der deutsche Bundesdurchschnitt von Fernwärmenetzen liegt bei über 4.000 kWh/(m*a)

Abbildung 84: Wärmeliniendichte in Abhängigkeit von der Energiekennzahl und der Siedlungsstruktur⁴.



9.2.4 EXKURS: Zukunft der Wärmenetze

Im Diskurs über die Zukunft der kommunalen Energieversorgung scheint sich ein Paradigmenwechsel abzuzeichnen. Zum einen führt die in Deutschland weitgehend schon genutzte Biomasse zu einer Verknappung und damit zur Verunsicherung der Akteure in diesem Bereich. Zum anderen wird diskutiert, ob Fern- und Nahwärmesysteme im Hinblick auf die Effizienzsteigerung im Gebäudebereich langfristig noch Zukunft haben. Es wurde grundsätzlich aufgezeigt (Energiebilanz 2009), dass insbesondere das Dreieck Effizienz, Erneuerbare und KWK nur durch stärkere Berücksichtigung Systemen mit geringen Netztemperaturen (LowEx-Netze) ausgewogen bleiben kann. In (TRAFO 2013) zeigt die Tabelle zur Einbindung Erneuerbarer Energien in Wärmenetze, dass in einem Low-Ex-Netz alle Varianten der Erneuerbaren eingebunden werden können.

Ohne Berücksichtigung der Transformation des Fernwärmesystems in Richtung Low-Ex-Systeme ergeben sich restriktive Bedingungen, wie z.B. bei der Bewertung für Wärmenetze in (Wolff, Jagnow 2011), bei der selbst bei Verlegung eines neuen Netzes für Nah- und Fernwärme bei mittlerer Verdichtung und Energiekennzahlen unter 120 kWh/(m²·a) kein Netz mehr empfohlen wird⁵.

⁴ Zwischen GFZ 0,2 und 1,2 gilt etwa: Länge des Unterverteilnetzes [m/ha] = 105 * GFZ/GFZ^{1,84}; eigene Berechnungen mit Daten aus (Henning 2011)

⁵ Am Ende des Berichtes wird aber in derselben Kategorie das (seit 2000 umgesetzte) Beispiel Hannover Kronsberg aufgeführt. Hier liegt die Energiekennzahlen unter 80 kWh/(m²·a) (Hertle 2003)

Im Leitfaden von Schleswig Holstein (SH 2014) wird gezeigt, dass auch heute Neubaugebieten mit Wärmenetzen erschlossen werden können. Hier wird auch der Zusammenhang zwischen Effizienzstandard einer Einfamilienhaussiedlung (EnEV 2009 und EnEV 2014) und der notwendigen maximalen Grundstücksbreite erläutert. Einen Überblick bietet die folgende Tabelle.

Tabelle 27: Zusammenhang zwischen Wärmeschutzstandard und Grundstücksbreite in Abhängigkeit von Wärmeliniedichten nach (SH 2014)

	Spezifischer Wärmebedarf in kWh/(m ² *a)	Wärmebedarf bei 120 m ² in kWh/a	Warmwasserbedarf in kWh/a	Gesamtwärmebedarf/EFH in kWh/a	Maximale Grundstücksbreite bei vorgegebener Mindestwärmeliniedichte von	
					1000 kWh/(m ² *a)	500 kWh/(m ² *a)
EnEV 2009	70	8400	1500	9900	20 m	40 m
EnEV 2014	52,5	6300	1500	7800	15	31

Zusammenhang: Die maximale Grundstücksbreite entspricht dem zweifachen Gesamtwärmebedarf geteilt durch der vorgegebenen Mindestwärmeliniedichte

In (Energiebalance 2009) werden auch noch bei Passivhaussiedlungen, d.h. bei Energiekennzahlen deutlich unter 80 kWh/(m²*a) unter bestimmten Voraussetzungen (z.B. KWK-Anteil größer 50%) Nahwärmenetze empfohlen. Allerdings war die hier vorgestellte exergetische Bewertung noch nicht in das damalige Projekt integriert. Daher müssen einige Ergebnisse (z.B. im Bereich der Biomasse) neu interpretiert werden. Die Multi-Kriterien-Matrix liefert dazu eine gute Grundlage.

9.2.5 Netzverluste

Bei Wärmenetzen müssen immer auch Netzverluste thematisiert werden, die insbesondere bei klassischen Fernwärmelösungen und bei geringen Bedarfsdichten nicht zu vernachlässigen sind. Die Netzverluste sollten, soweit wirtschaftlich, weitgehend minimiert werden. Ansonsten könnte der Effizienzgewinn durch die KWK zum Teil wieder aufgehoben werden. Zielwerte von jährlich 5 bis maximal 15 kWh pro Quadratmeter Energiebezugsfläche bzw. Verlustwerte von 150 bis 250 kWh/a je Trassenmeter sollten eingehalten werden (Wolff, Jagnow 2011). Dass dies möglich ist zeigen z.B. die gemessenen Werte von Hannover Kronsberg (Hertle 2003). Hier betragen die Verteilungsverluste lediglich 9 kWh/(m²*a).

9.3 Die Multi-Kriterien-Matrix: Beispiel Neubauwohngebiet

An einem konkreten Beispiel eines Neubauwohngebiets werden die Möglichkeiten der Multi-Kriterien-Matrix aufgezeigt. Die Multi-Kriterien-Matrix soll qualitativ Effekte darstellen, einen Überblick erlauben und Wesentliches schnell erfassbar machen. Sie kann zwar genauere Berechnungen als Basis für Grundsatz-Entscheidungen nicht ersetzen, bietet sich jedoch als erster Schritt an.

Ist die Bebauungsdichte noch nicht festgelegt, können mit der Matrix auch Parametervariationen der Einwohnerdichte und des Wohnflächenbedarfs pro Einwohner durchgeführt werden. Dadurch kann das Bewusstsein für Suffizienz Maßnahmen geschärft werden.

In der Regel sind in einer frühen Projektierungsphase aber bereits wesentliche Rahmenbedingungen, wie z.B. Grundflächenzahl (GRZ), Geschosshöhen und Geschossflächenzahl (GFZ) festgelegt. In der Matrix wird die GFZ nicht direkt eingegeben, sondern aus der Einwohnerdichte und dem Wohnflächenbedarf pro Einwohner generiert.

Wir gehen von einem Neubaugebiet mit 40 m² Wohnfläche pro Einwohner und einer Einwohnerdichte von 200 EW pro Hektar aus. Daraus ergeben sich 8.000 m² WFL pro Hektar und eine GFZ (bei 20% Verkehrsflächen) von 1.

Im nächsten Schritt wird die Basisvariante definiert. Als Dämmstandard wird z.B. ein Heizwärmebedarf von 40 kWh/(m²*a) angenommen. Vor dem Hintergrund eines Zieldämmstandards von 15 kWh/(m²*a) ergibt sich für alle Varianten ein Dämmstandard von 1 Punkt⁶. Dieser Dämmstandard wird für alle Varianten (siehe Abbildung 85) gleich gehalten.

Auf Basis des angegebenen Heizsystems (in diesem Fall **Erdgas-Brennwert-Einzelheizung als „REFERENZ“**) errechnet die Multi-Kriterien-Matrix z.B. einen Endenergieverbrauch Heizwärme (Hauseingang vor Kessel) von 44 kWh/(m²*a). Der Warmwasserverbrauch wird bei diesem Beispiel nicht berücksichtigt, um die Interpretation der Ergebnisse zu erleichtern. Die Effizienz (Primärenergie-Ausnutzung) ist niedrig (1 Punkt). Die CO₂-Bewertung ist mit zwei Punkten schlecht. Erneuerbare sind keine eingesetzt. Es ergibt sich eine Wärmedichte von etwa 350 MWh/(ha*a). Das gibt gerade einen Punkt. Die Eignung für Wärmenetze ist hier (Einzelheizung) zwar nicht relevant, wird aber trotzdem als Kreis (statt als Punkt) angezeigt um hier schon Optionen für den Bau eines Wärmenetzes anzeigen zu können. Erneuerbare liegen nicht vor (Erdgas). Stellt man das Beispiel auf **Pellet-Einzelheizung (Variante 2)** um, steigt der Endenergiekennwert Wärme wegen des schlechteren Kesselwirkungsgrades auf 52 kWh/(m²*a). Trotzdem erhält der Holzpellet-Heizkessel im Kriterium Effizienz einen Punkt, da er nur moderat weniger effizient ist, als der Erdgas-Brennwertkessel⁷. Erneuerbare und CO₂ bekommen aufgrund des Brennstoffes Holz 5 Punkte. Die Eignung für Wärmenetze bleibt unverändert.

In der nächsten Spalte ist die Umstellung auf ein **Fernwärmenetz mit Erdgas-KWK und Rücklaufanbindung (LowEx = Variante 2)** dargestellt. Hier verbessert sich gegenüber REFERENZ die Effizienz- und CO₂-Bewertung. Aufgrund der KWK mit niedrigen Netztemperaturen ist die Effizienz hoch (4 Punkte). Aufgrund des Dämmstandards und der besseren Primärenergieausnutzung durch KWK ist auch die CO₂-Bewertung sehr gut (hier 5 Punkte⁸). Die Eignung für Wärmenetze bleibt unverändert wird aber, da ein Versorgungssystem mit Wärmenetz angeklickt wurde, als Punkt angezeigt. Die Wärmeverluste des Verteilnetzes gehen im Übrigen nicht in die Bewertung Wärmenetze ein, sondern sind auf Effizienzseite eingerechnet (exergetische Allokation, siehe Kapitel 7).

In **Variante 3 (Wärmenetz aus Industrieabwärme)** wird ersichtlich, dass auf dem genutzten niedrigen Temperaturniveau die Effizienz mit fünf Punkten sehr hoch ist. Auch die CO₂-

⁶ Zielwerterreichung = 5 Punkte; Zielwert 3-fach überschritten = 0 Punkte. Für den Bestand ist die Skala allerdings anders bepunktet.

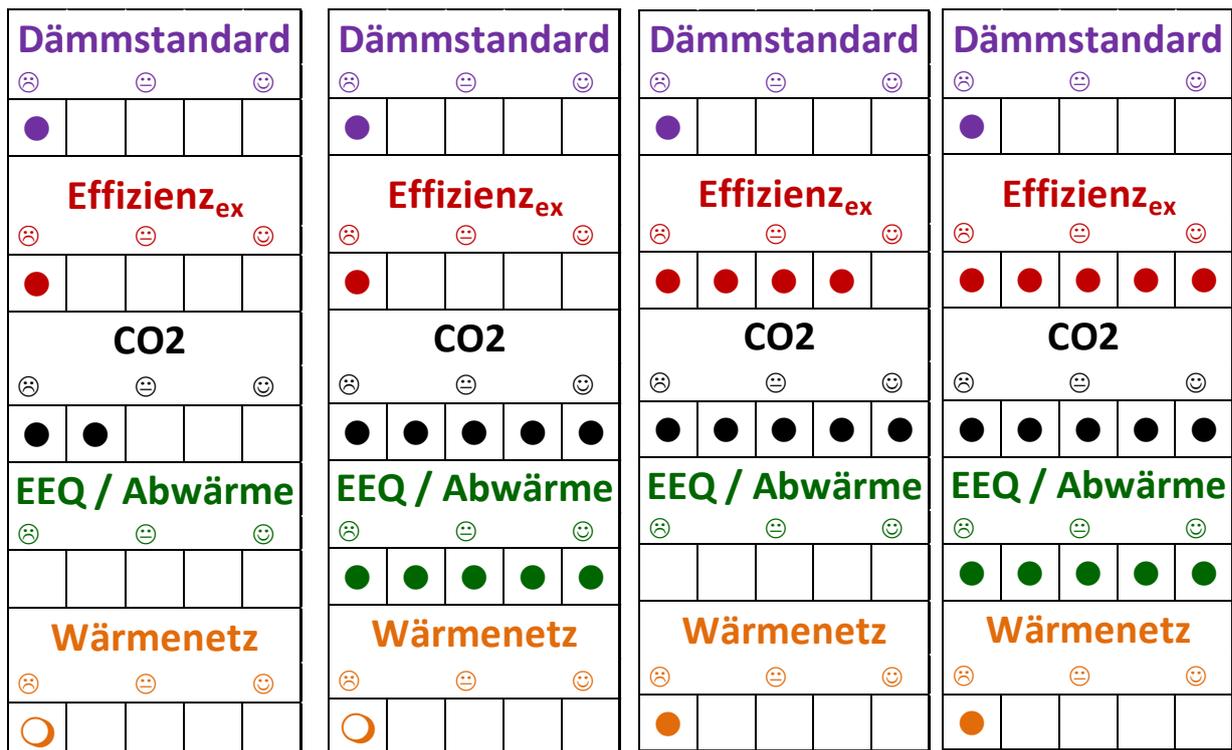
⁷ Hier zeigt sich dass die Multi-Kriterien-Matrix zu ungenau ist um detaillierte Aussagen zu treffen.

⁸ 5 Punkte gibt es für CO₂-Emissionen unter 5 kg/(m²*a)

Bewertung ist sehr gut (5 Punkte). Unter der Rubrik EEQ / Abwärme gibt es ebenfalls 5 Punkte. Die Eignung für Wärmenetze bleibt unverändert bei einem Punkt.

Abbildung 85: Beispiel für die Anwendung der Multi-Kriterien-Matrix

REFERENZ	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Gasbrennwertkessel	Pelletkessel	Fernwärme (Gas)	Abwärme Industrie
Einzelheizung	Einzelheizung	LowEx (Rücklauf)	Wärmenetz



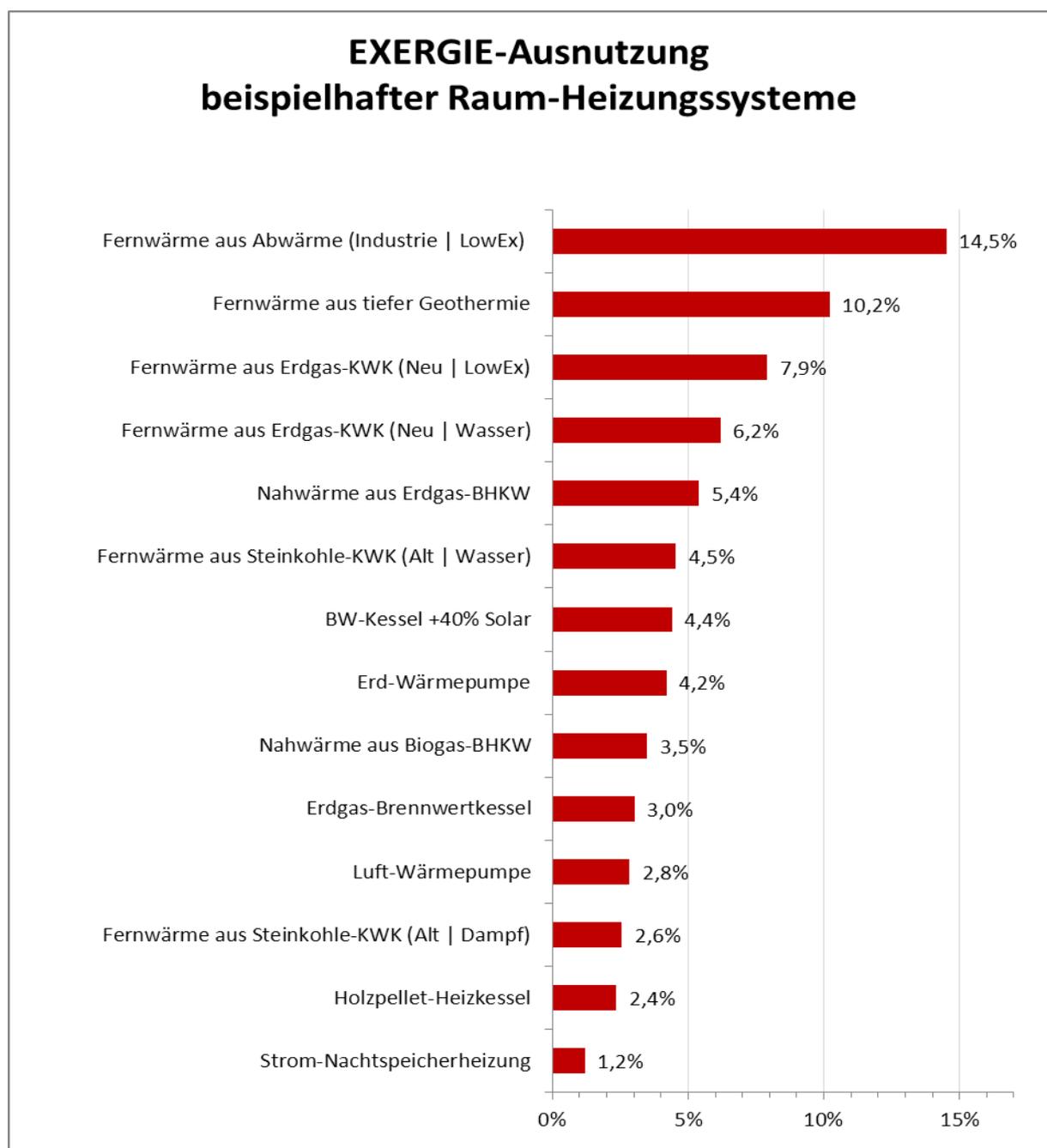
Mithilfe der Multi-Kriterien-Matrix können die grundsätzlichen Zusammenhänge zwischen planerischen Basisdaten eines Gebietes und den Auswirkungen auf wesentliche Indikatoren erfahrbar gemacht werden.

10 Empfehlungen und Ausblick

Die Betrachtung der einzelnen Wärmeversorgungssysteme in Kapitel 5.7 hat deutlich gezeigt, dass neben der quantitativen Bewertung auch die Qualität der Energie, d.h. die prozentuale Arbeitsfähigkeit auf Basis der Exergie, in die Bewertung mit aufgenommen werden muss, um Fehlsteuerungen auf dem langen Weg zu einer CO₂-neutralen Kommune zu vermeiden.

So hat selbst ein energetisch sehr effizientes Heizsystem wie der Gas-Brennwertkessel, mit Heizwert-bezogenen Jahresnutzungsgraden an die 100%, lediglich eine Primärenergie-Effizienz von 3%.

Abbildung 86: Abbildung der Exergieausnutzung durch Einzeltechnologien für die Raumwärmeversorgung auf Basis einer historischen Bewertungsmethodik

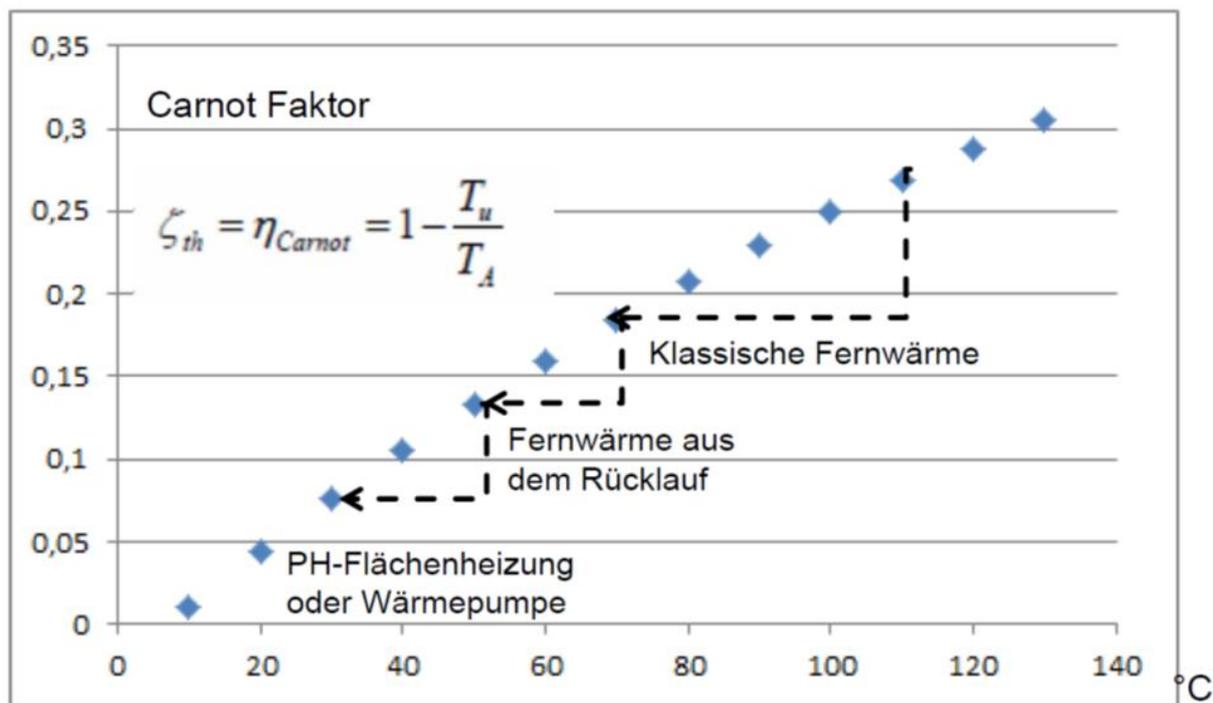


Optimierte Fernwärmesysteme auf Basis von KWK kommen schon auf mehr als das Doppelte (6,2% bis 7,9%), bei der Nutzung von Abwärme aus der Industrie oder tiefer Geothermie kann die Primärenergie-Ausnutzung sogar nahezu verfünffacht werden (bis 14,5%). Zumindest alle begrenzten Energieträger sollten daher immer auch den Qualitätscheck der exergetischen Bewertung durchlaufen. Dabei ist insbesondere auch auf widerspruchsfreie und ausgereifte Bewertungsgrundlagen zu achten, wie sie beispielsweise in Kapitel 5 dargelegt werden.

Besonders notwendig ist das bei der Bewertung der Koppelprodukte Strom und Wärme aus KWK-Prozessen. Hier führen bestehenden Berechnungsvorschriften, wie z.B. das Gutschriften-system und die Finnische Methode, zu einer Fehlallokation der zugeordneten Primärenergie bzw. der CO₂-Emissionen (siehe Kapitel 7). Das Gutschriftensystem ist abhängig vom bundesweiten Strommix. Bei hohen Stromkennzahlen kann der Emissionsfaktor negativ werden, bei Veränderung des gutgeschriebenen Strommix ändern sich auch die Emissionsfaktoren.

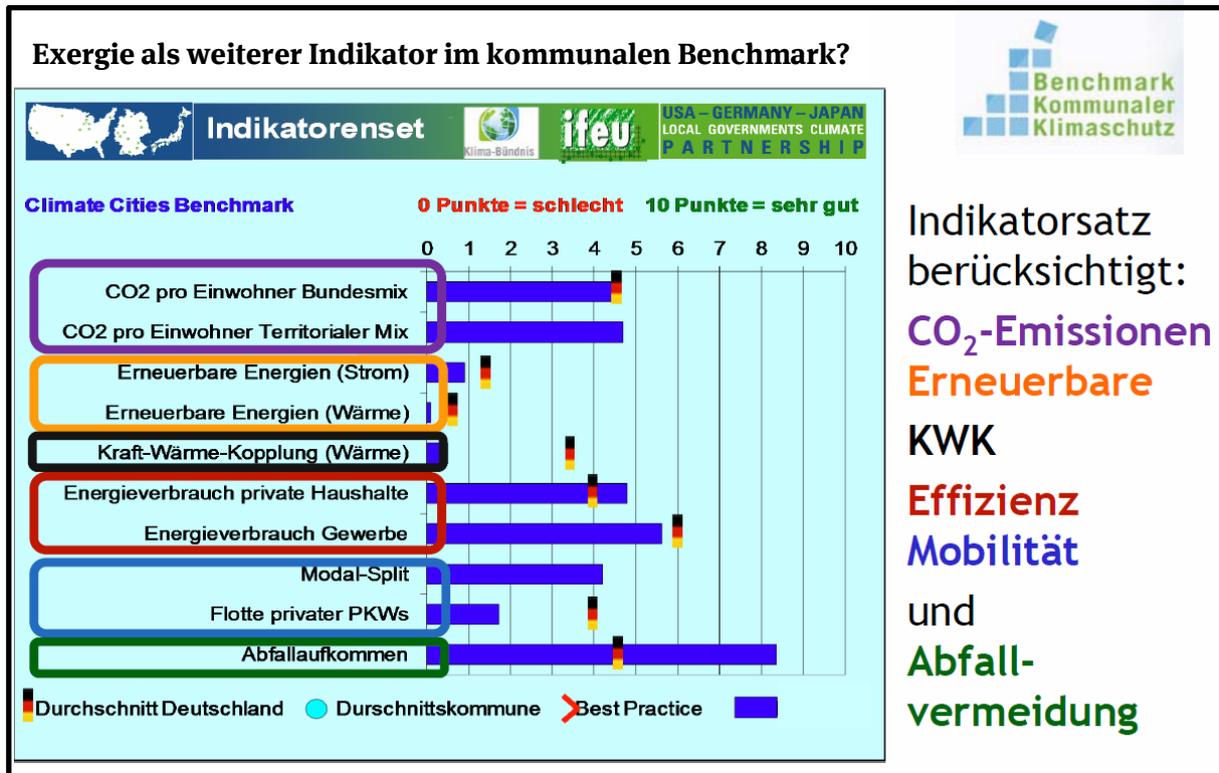
Die Finnische Methode bewertet als Referenzmethode mit frei wählbaren Referenzsystemen die ausgekoppelten Produkte zuungunsten der Wärme. Diese basiert jedoch auf einer logisch unzulässigen Verallgemeinerung der Berechnungsvorschrift zur Primärenergieeinsparung für einzelne KWK Systeme. Sie ist daher nicht für den Vergleich von KWK Systemen untereinander geeignet. Die meisten derzeitigen Allokationsmethoden von KWK-Produkten können außerdem die Kaskadennutzung (siehe Kapitel 5.4) nicht hinreichend genau abbilden.

Abbildung 87: Abbildung von Kaskadensystemen mit dem Carnot-Faktor



Die exergetische Allokation (Carnot-Methode oder Exergie-Methode) stellt hier eine empfehlenswerte Lösung dar mit der eine einfache und physikalisch fundierte Allokation vorgenommen werden kann, welche sich widerspruchsfrei in die kommunale Energie- und Exergie-Analyse integrieren lässt. Mit ihr können auch zukunftsfähige LowEx-Systeme, wie z.B. die Versorgung von Quartieren über den Rücklauf oder andere Niedertemperatursysteme bis hin zur kalten Fernwärme, exakt und fundiert bewertet werden.

Abbildung 88: Indikatorenset auf Gesamtstadtebene (UBA 2010) des Benchmark Kommunalen Klimaschutz.



Über die Betrachtung einzelner Energiesysteme hinaus sollte die Studie auch untersuchen, ob die Exergiebewertung als übergeordneter Indikator hilfreich für die Gesamtbewertung einer Kommune auf dem Weg zur CO₂-Neutralität sein kann. Ist ein exergiebasierter Kennwert geeignet, um die anderen Indikatoren, z.B. des Benchmark Kommunalen Klimaschutz (siehe Abbildung 88) sinnvoll zu ergänzen? Diese Frage kann klar mit „Ja“ beantwortet werden. Eine Vernachlässigung der Energiequalität bei der Bewertung von Wärmeversorgungssystemen führt zu signifikanten Fehleinschätzungen von Effizienzen und ggf. auch bei den Verbräuchen energetischer Ressourcen und sollte nach Möglichkeit vermieden werden. Da die Exergiebewertung allerdings stark vom Mix der Bedarfe abhängt und mit der Größe des Betrachtungsgebietes zunehmend komplex wird bietet es sich an, das Thema stufenweise in den Kommunen zu verankern.

Neben der allgemeinen Sensibilisierung der Kommunen zum Thema exergetische Bewertung kann die Kommune über den Exergieausweis im Detail exergetische Berechnungen zu Einzelgebäuden oder Quartieren durchführen (lassen). Ein einfacher Zugang zum Thema auf Quartiersebene ist auch über die Multi-Kriterien-Matrix möglich. Betrachtungen auf Ebene der gesamten Stadt sind umso leichter nachvollziehbar, je homogener die Energienutzung ist.

Im Rahmen des Projektes wurde besonders darauf geachtet, dass die Exergiebewertungssysteme aufwärtskompatibel sind. D.h., dass die Bewertung vom Einzelgebäude über Energiesysteme und Quartiere bis zur Gesamtstadt keine methodischen Brüche aufweist. Kleinere Unterschiede ergeben sich ausschließlich aus Vereinfachungen bei der Modellierung und bei den Berechnungsannahmen.

Oft müssen im frühen Stadium Strategien für die nachhaltige Entwicklung eines Bestands- oder Neubauquartiers getroffen werden. Häufig sind dabei nur grobe Richtwerte über Fläche, Be-

bauungsdichte oder Nutzergruppe vorhanden. In diesem Stadium geht es im Energiebereich um die grundsätzliche Entscheidung über die Schwerpunktsetzung z.B. zugunsten von Effizienz, Wärmenetzen, Erneuerbaren Energien oder auch Suffizienz.

Um die langfristigen Ziele einer weitreichenden Verringerung der Treibhausgasemissionen bis zum Jahre 2050 bei gleichzeitiger Reduzierung des Endenergiebedarfs zu erreichen, müssen die Strategien im Sinne einer exergetischen Optimierung weiterentwickelt werden.

Durch exergetisch optimierten Niedertemperatur-Wärmeversorgungs-Systemen (LowEx-Systeme) kann es zu einer besseren Integration von KWK und Erneuerbaren Energien kommen. Die Einbindung Erneuerbarer Energien in Wärmenetze ist in einem Low-Ex-Netz optimal möglich (TRAFO 2013). Dadurch steigen auch langfristig die Optionen, ambitionierte Dämmstandards wie den Passivhausstandard mit Nahwärmenetzen auf Basis erneuerbarer Energien und/oder KWK zu verknüpfen.

Nachhaltigkeit bedeutet aber nicht nur, auf fossile Energien weitgehend zu verzichten, sondern auch erneuerbare Energien möglichst effizient zu nutzen. Bereits heute stoßen wir in Deutschland insbesondere bei der Biomasse an die Grenzen der Verfügbarkeit, da der inländische Biomassemarkt in wenigen Jahren weitgehend genutzt sein wird. Außerdem wird der Biomasseeinsatz der Zukunft für viele Sektoren reklamiert (stoffliche Nutzung, Kaskadennutzung, KWK, Verkehr...) sodass hier ein „Wettbewerb der Systeme“ die Folge sein wird.

Aktuelle Planungskriterien, z.B. im Rahmen der EnEV, fördern durch einen niedrigen Primärenergiefaktor den Einsatz von direkt verbrannter Biomasse und erlauben dann auch eine Abschwächung des Dämmstandards. Hier sollte ein deutliches Signal die begrenzte Verfügbarkeit dieser Ressource aufzeigen. Die exergiebasierte Bewertung sorgt hier z.B. über die Kriterien Primärenergie-Ausnutzung oder Primärenergie-Verbrauch dafür, dass auch Defizite bei der Nutzung speicherbarer erneuerbarer Energien physikalisch fundiert bewertet werden können.

Um ein Screening von verschiedenen Lösungen zu ermöglichen, wurde eine Multi-Kriterien-Matrix auf EXCEL-Basis entwickelt die eine qualitative Bewertung im Bereich der Energieplanung eines Quartiers erlaubt. Neben den oben angesprochenen Indikatoren sind hier noch Kennwerte für den Dämmstandard und die Eignung für Wärmenetze enthalten.

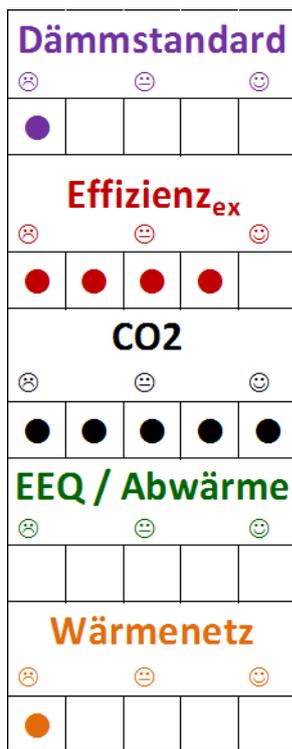


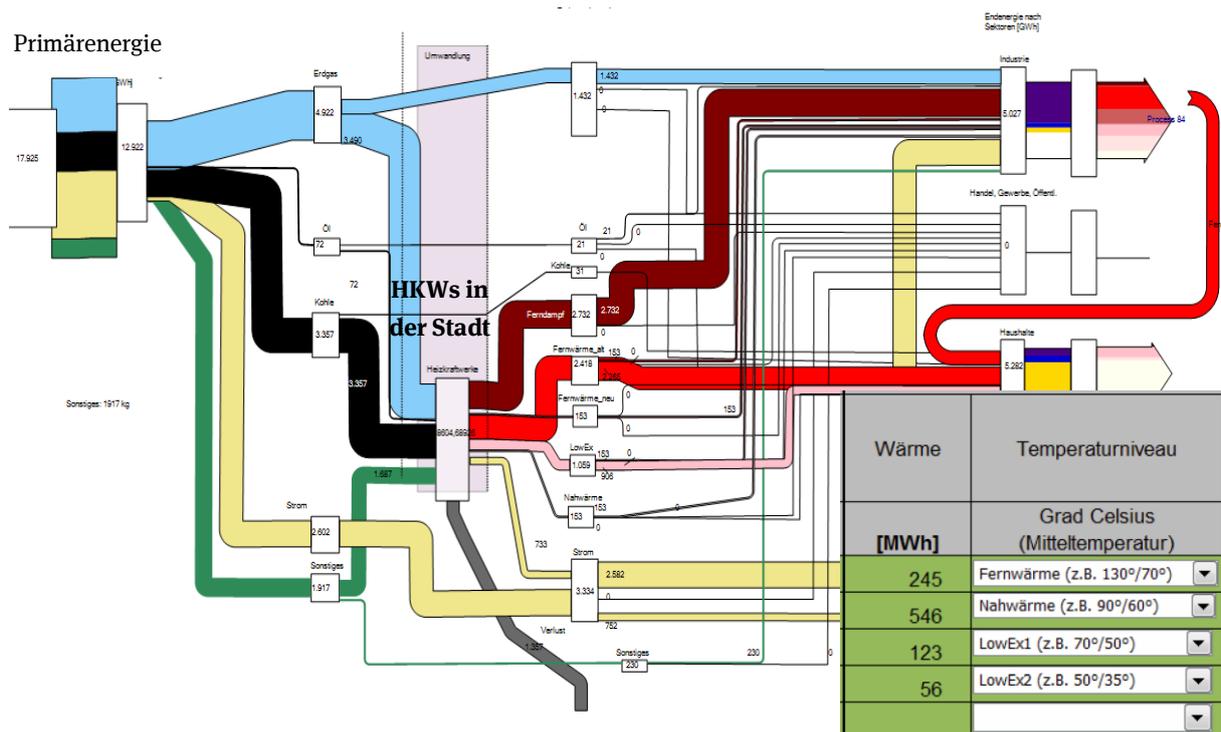
Abbildung 89: Multi-Kriterien-Matrix zur qualitativen Bewertung von Energiesystemen auf Quartiersebene

Wesentliche Eingangsparameter sind Einwohnerdichte und Dämmstandard. Die Auswahl des gewünschten Versorgungssystems ist die Basis der Vorab-Bewertung mit der Multi-Kriterien-Matrix. Eine Übertragung der qualitativen Bewertung in Bezug auf die Energieplanung mittels der Multi-Kriterien-Matrix von einem Quartier auf die Gesamtstadt wäre möglich, ist jedoch aufgrund meist zu vieler unterschiedlicher Energieliefer- und Abnahmesysteme nicht aussagekräftig.

Um die Ergebnisse der Multi-Kriterien-Matrix zu prüfen und weiter zu spezifizieren bieten sich Untersuchungen mit dem Exergieausweis an, mit welchem auch komplexe Wärmeversorgungszenarien detailliert bewertet und verglichen werden können.

Wesentlich auf Ebene der Gesamtstadt ist es, den Energiefluss in der Stadt so aufzubereiten, dass Rückschlüsse auf eine exergetische Optimierungsoption möglich sind. Dazu müssen auf der Abnahmeseite die Anwendungsbereiche (z.B. Prozesswärme, Warmwasserbereitung und Raumwärme) bekannt sein und nach benötigten Temperaturniveaus zugeordnet werden können. Ebenso müssen Wärmeströme aus KWK-Prozessen und Abwärmeströme der Industrie mit Angaben zu Ihren Temperaturniveaus vorliegen. Damit können den Wärmeströmen einer Kommune entsprechende Energiequalitäten zugeordnet werden. Vor allem ist auch die Möglichkeit einer Abwärme- und Kaskadennutzung durch die exergetische Bewertung sofort erkennbar.

Abbildung 90: Energieflussdiagramm einer Kommune als Basis für die exergetische Bewertung der Energieströme (Bilanzdatenblatt im EXCEL verknüpft mit dem *!sankey*® des ifu Hamburg)



In dem Beispiel sieht man deutlich die unterschiedlichen Temperaturniveaus der Wärme (Rot-Töne). Die Abwärme aus dem Industriebereich wird für die teilweise Versorgung der Haushalte genutzt. Sofern klassische Kommunalbilanzen in dieser Form aufbereitet werden, ist eine exergetische Bewertung der Energieströme möglich. Im Bilanztool des IFEU (BICO₂) ist die Aufteilung der Temperaturniveaus mittels Auswahlmenü bereits eingearbeitet (siehe Kasten in rechts unten). Für den Klimaschutzplaner (Klimaschutzplaner) ist das auch vorgesehen.

Sobald so ein Sankey-Diagramm auf Gesamtstadtebene vorhanden ist, können grafisch schrittweise die prinzipiellen Optimierungsmöglichkeiten in Richtung LowEx-Systeme erkannt werden. Allerdings müssen diese dann, z.B. im Rahmen eines Wärmenutzungsplans, auf ein kleinräumiges Raster übertragen werden, um den örtlichen Gegebenheiten Rechnung tragen zu können. Grundsätzlich ist so ein Sankey-Diagramm aus bisherigen Energiebilanzen ableitbar, da dort die Sektoren in der Regel nach Anwendungsbereichen und Energieträgern aufgeschlüsselt sind. Ergänzt werden müssen klassische Kommunalbilanzen allerdings in der Regel durch die genauere Aufschlüsselung der kommunalen internen KWK-Prozesse nach Temperaturniveaus der Wärmenetze. Erst dann kann die exergetische Bewertung zum Tragen kommen und können zukunftsfähige Wärmesysteme (LowEx, Abwärme- und/oder Kaskadennutzung) modelliert werden.

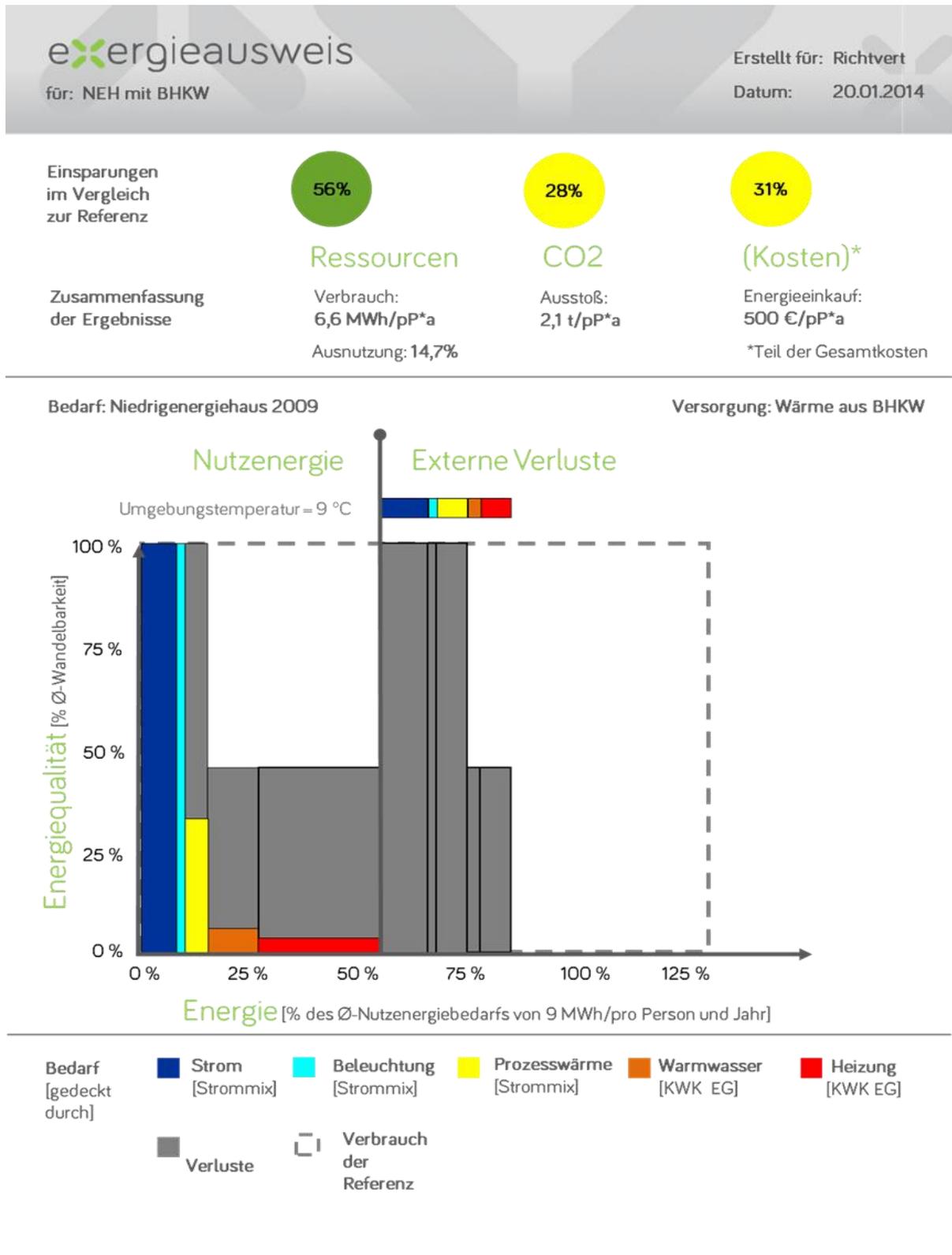
Neben dem Exergieausnutzungsgrad (in der Multi-Kriterien-Matrix mit „Effizienz_{ex}“ bezeichnet) kann der Primärexergieverbrauch pro Fläche für „Raumwärme- und Warmwasser“ dazu dienen, die Gebäudesubstanz und deren Versorgung in einem Gebiet zu charakterisieren, während der Primärexergieverbrauch pro Einwohner (gesamt) ein übergreifender Indikator für die pro Kopf Exergieintensität des Quartiers ist.

Um die kommunalen Nutzer nicht unnötig mit der bisher noch nicht übermäßig bekannten Größe Exergie zu konfrontieren empfehlen wir eine sukzessive Heranführung an das Thema. Eventuell bietet es sich auch an, bei der Darstellung des Primärexergie-Verbrauchs auf das Wort Exergie zu verzichten.

Im Rahmen des Exergieausweises wird z.B. die „Primärexergie“ als „Ressourcen“ dargestellt. Hier handelt es sich allerdings nur um den stofflichen und energetischen Ressourcenverbrauch für den „stationären“ Betrieb und nicht um den Ressourcenverbrauch für den gesamten Lebenszyklus. Perspektivisch kann dieser exergetische Ressourcenbegriff jedoch auch auf die vom VDI vorgeschlagene Lebenszyklus-Bilanzierung erweitert werden (VDI 2014).

Um konkrete Grundsatz-Entscheidungen in Hinblick auf kommunale Bauprojekte zu treffen, können die Ergebnisse einer exergetischen Bewertung detailliert und trotzdem anschaulich mithilfe des Exergieausweises dargestellt werden (siehe Kapitel 6). In einem Ampelsystem zeigt er gegenüber dem Referenzfall die relative Einsparung bzw. Minderung der Ressourcen und der CO₂-Emissionen und Energiekosten auf. Die Primärexergie-Ausnutzung wird hier als Ressourcenausnutzung zusätzlich angegeben (siehe Abbildung 91).

Abbildung 91: Entwurf für ein Alternativszenario eines erweiterten Exergieausweises



11 Beantwortung der zentralen Forschungsfragen

Kann der Exergieansatz die bisherige Betrachtung der CO₂-Bilanz einer Kommune entscheidend bereichern?

In einigen Bereich muss der Exergieansatz die Betrachtung der kommunalen CO₂-Bilanzierung sogar bereichern, da es sonst zu erheblichen Fehlsteuerungen kommt. Das betrifft insbesondere den Bereich der Allokation (Zuordnung) der Primärenergie und der Emissionen auf die Kopplprodukte Strom und Wärme aus KWK-Prozessen, Kaskadennutzung und Abwärmeströmen. Ohne die exergetische Allokation ist hier keine oder zumindest nur ein nicht zielführende Zuordnung möglich. Im Rahmen von Workshops und Tagungen wurde dieser Punkt immer wieder erläutert und diskutiert. Die Umstellung auf die exergetische Allokation war schlussendlich unstrittig und wird auch im kommunalen Berechnungstool Klimaschutzplaner angewendet werden. Auch die AGFW sieht, als eine mögliche Option, die Allokation nach der Carnotmethode vor (AGFW FW 309 2014).

Darüber hinaus ist eine Exergieanalyse im Bereich der erneuerbaren Energien notwendig, um auch hier Effizienzpotenziale korrekt einschätzen zu können. Wird auf eine Exergieanalyse bei der Bewertung von Erneuerbaren Energien verzichtet, kann es auch hier zu starken Fehleinschätzungen und Fehlsteuerungen kommen.

Der Exergieansatz ist des Weiteren auf Ebene der Gebäudekonzepte sehr gut anwendbar. Mit dem Exergieausweis werden wichtige zusätzliche Informationen für eine richtungssichere Entscheidung über die zukünftige Energiebereitstellung und –Nutzung gegeben.

Bei stadtplanerischen Entscheidungen auf Quartiersebene sollte der Bewertungsansatz zusätzlich weitere Indikatoren umfassen. Hierzu wurde auf EXCEL-Basis die Grundlage für eine Multi-Kriterien-Matrix entwickelt, die anhand von fünf Indikatoren in einem frühen Stadium der Quartiersplanung eine qualitative Einschätzung in Richtung nachhaltiger Stadtentwicklung aus exergetischer Sicht erlaubt.

Auf Gesamtstadtebene wurde die Möglichkeit aufgezeigt, eine exergetische Bewertung auf Basis einer differenzierten Bilanz einer Stadt aufzubauen. Sofern klassische Bilanzen um die Bereiche Endenergie nach Anwendungsbereichen und Herkunft sowie die Temperaturniveaus der verwendeten Wärmeströme erweitert werden, kann damit ein Energieflussdiagramm (Sankey) erstellt werden, das eine visuelle Einschätzung der Verbesserungs-Potenziale erlaubt.

Wie müssen kommunale Strom-Wärme-Systeme umgestaltet werden, um den Kriterien der CO₂-Neutralität zu genügen?

Das Ziel der CO₂-Neutralität, im Sinne der Masterplankommunen, ist eine weitreichende (-80% bis -95%) Verringerung der Treibhausgasemissionen bis zum Jahre 2050 bei gleichzeitiger Reduzierung des Endenergiebedarfs um mindestens 50%. Wie dann die restlichen 5% bis 20% der Treibhausgasemissionen „neutralisiert“ werden können, ist nicht Bestandteil der in diesem Projekt durchgeführten Forschung gewesen. Wesentlich für die Umgestaltung der Strom-Wärme-Systeme auf kommunaler Ebene ist die Transformation der Wärmeversorgung hin zu Wärmenetze auf Basis von LowEx-Systemen⁹ (einschließlich der Nutzung von Abwärmequellen aus der Industrie) und damit auch die verstärkte Option für die Einbindung von erneuerbaren Energien in den Wärmemarkt. Nur dadurch kann auch der Konflikt zwischen dem

⁹ Niedertemperatur-Wärmeversorgungssysteme mit geeigneten, exergieeffizienten Wärmeerzeugern

langfristig sinkendem Raumwärmebedarf aufgrund hoher Effizienzstandards und der notwendigen Ausweitung der Wärmenetze gelöst werden. Konkrete Handlungsoptionen wurden schon in (TRAFO 2013) gegeben. Im Rahmen dieses Projektes wurde das EXCEL-Tool „Multi-Kriterien-Matrix“ entwickelt, das auf Quartiersebene im frühen Planungsstadium Einsichten in den Zusammenhang zwischen Dämmstandard, Bebauungsdichte, Effizienz, Erneuerbaren Energien, und CO₂-Emissionen vermittelt. Durch Anlehnung an gängige Kennwerte (z.B. Geschossflächenzahl (GFZ)) wird auch der Zusammenhang zwischen Wohnbedürfnis, geplanter oder vorhandener Siedlungsstruktur und deren Auswirkungen auf die Energiesystemauswahl und die CO₂-Emissionen eines Quartiers transparent. Dadurch können auch Auswirkungen von Suffizienzmaßnahmen dargestellt werden.

Welche Instrumente sind nötig, um diese Entwicklung zu forcieren?

Zuallererst ist es notwendig, den Exergieansatz in die kommunale Bewertungs- und Planungspraxis zu integrieren.

Als einfacher nächster Schritt bietet sich dazu der Einsatz von Analysen mit dem Exergieausweis im Vorfeld von Grundsatz-Entscheidungen bei kommunalen Bauprojekten an. Auf Quartiersebene kann die Multi-Kriterien-Matrix ein geeignetes Instrument sein, wesentliche Indikatoren im Rahmen eines frühen Projektstadiums miteinander abzuwägen. Eine weitere Ausrichtung auf die konkreten Bedürfnisse der Stadtplanung, sowie eine Testphase der Anwendung mit ambitionierten Kommunen ist sinnvoll.

Als weiterer zentraler Schritt sollten die hier vorgeschlagenen Berechnungsvorschriften noch detaillierter ausgearbeitet werden und Eingang in den bundesweiten Standard finden. Mit der Integration in den kommenden Klimaschutzplaner und die Aufnahme der Carnot-Methode in das AGFW-Merkblatt (siehe oben) sind hier schon wichtige Schritte getan. Allerdings muss die Carnot-Methode dann noch Eingang in die entsprechenden DIN-Normen und die zukünftige EnEV sowie in die Bilanzierungsvorschriften der Länder finden.

Aufbauend auf dem Klimaschutzplaner könnten auch Exergie-Kennwerte in die klassische Bilanzierung integriert werden. Dies ist insbesondere im Rahmen eines Wärmenutzungsplanes einer Kommune sinnvoll.

Wie soll dieser Ansatz bei zukünftigen Projekten berücksichtigt werden?

Das Thema Exergie ist in der kommunalen Praxis noch kaum verankert. Im wissenschaftlichen Raum gewinnt es aber zunehmend an Bedeutung. Es erscheint dabei zentral, die häufig relativ abstrakte theoretische Diskussion auf die Ebene des konkreten kommunalen Handels zu transportieren. Zudem sollten die Rahmenbedingungen für die Anwendung des Exergieansatzes verbessert werden.

Hier einige Stickpunkte zu künftigen Entwicklungsoptionen:

- Im Rahmen der Wärmenutzungskonzepte sollte die exergetische Betrachtung entsprechend der in Kapitel 5 dargelegten Bewertungsgrundlagen gefordert werden. Dadurch können Erneuerbare Energien sowie LowEx-, Kaskaden- und KWK - Systeme richtungssicher beschrieben und bewertet werden. Hier bieten Analysen mit dem Exergieausweis einen ausgereiften Ansatz für die praktische Umsetzung dieser Entwicklungsoption.
- Auf Ebene der Quartierskonzepte kann die Multi-Kriterien-Matrix grundlegende Zusammenhänge aufzeigen. Zur Stärkung der Suffizienzmaßnahmen sollte diese Matrix anhand beispielhafter Vorzeigeprojekte (z.B. Kalkbreite in Zürich) getestet und auf an-

dere Bereiche (z.B. Verkehr) ausgeweitet werden. Nach Vorauswahl durch die Multi-Kriterien-Matrix kann der Einsatz des Exergieausweises helfen, fundierte Grundlagen für Richtungsentscheidungen zu schaffen.

- Hohe Abwärmepotenziale stehen bundesweit noch ungenutzt zur Verfügung. Neben einer Berichtspflicht (wie früher schon einmal mit der Abwärmennutzungsverordnung geplant) sollten Beispielprojekte mit vorbildhafter Kaskadennutzung gefördert und dokumentiert werden.
- Um den Exergieansatz in der kommunalen Praxis zu verankern, sollten sowohl interne Mitarbeiter als auch externe Berater dazu fortgebildet werden. Als erster Schritt wäre die Entwicklung eines E-Learning-Angebotes sinnvoll, das die Ergebnisse dieses Projektes an Praxisbeispielen vermittelt.
- Die Wärmeversorger setzen inzwischen LowEx-Systeme punktuell um. Hier sollten die Förderbedingungen so angepasst werden, dass LowEx-Systemen zukünftig ein Bonus gegenüber klassischen Wärmeversorgungssystemen eingeräumt wird.
- Damit LowEx-Systeme in der Breite Anwendung finden muss eine Anrechnung von diesen Systemen in der EnEV möglich sein. Dies gilt auch für Teilsysteme (z.B. für die Rücklaufanbindung von Stadtteilen).

12 Literaturverzeichnis

Berichte:

Blesel M. (2002): Räumlich hoch aufgelöste Modellierung leitungsgebundener Energieversorgungssysteme zur Deckung des Niedertemperaturwärmebedarfs. Doktorarbeit, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung Stuttgart.

Büsser et. al. (2010): Nachhaltige Stadt Zürich – Auf dem Weg zur 2000-Watt-Gesellschaft. Abschlussbericht des Leitungsteams.

Council of Energy Ministers, Canada (Hrsg.) (2009): Integrated Community Energy Solutions. A Roadmap for Action.

Energiebalance, 2009: Energiebilanz – Optimale Lösung für erneuerbare Energien und Energieeffizienz. IFEU Heidelberg und Wuppertal Institut. Im Auftrag des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.

Enselin, A., et al IWU Darmstadt (2013): Akteursbezogene Wirtschaftlichkeitsberechnungen im Bestand, im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz.

Fritsche, U. und Rausch, L. (2008): Climate Change 8/08 Bestimmung spezifischer Treibhausgas-Emissionsfaktoren für Fernwärme, im Auftrag des Umweltbundesamtes Forschungsbericht 360 16 008, UBA-FB 001145, ISBN 1862-4359

Henning, H.-M. et al (2012): Erarbeitung einer integrierten Wärme- und Kältestrategie. Arbeitspaket 1 - Bestandsaufnahme und Strukturierung des Wärme- und Kältebereichs. ISE, ISI, Öko-Institut, IREES, TU Wien, Bremer Energie Institut. Im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.

Hertle, H. (2003): CO₂-Bilanz 2001 Hannover Kronsberg. IFEU Heidelberg. Im Auftrag der Landeshauptstadt Hannover.

Hertle, H. et al. (2005): Beiträge der EnEV und des KfW-CO₂-Gebäudesanierungsprogramms zum Nationalen Klimaschutzprogramm. IFEU Heidelberg, IWU Darmstadt, im Auftrag des Umweltbundesamtes.

Hertle, H. et. al. (2006): Evaluation und Begleitung der Energieeinsparverordnung 2002 in Baden-Württemberg. IFEU Heidelberg / ECONSULT. Gefördert durch das Land Baden-Württemberg.

Jochum, P. und Mellwig, P. et al (2012): Technische Restriktionen bei der energetischen Modernisierung von Bestandsgebäuden, im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Beuth Hochschule für Technik Berlin und IFEU Heidelberg.

Jochum, P. und Mellwig, P. et al (2012): Technische Restriktionen bei der energetischen Modernisierung von Bestandsgebäuden, im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Beuth Hochschule für Technik Berlin und IFEU Heidelberg.

Kühler, D.(2008): Beitrag der Kraft-Wärme-Kopplung zur rationellen Exergieversorgung von Gebäuden und Siedlungen – Vergleich unterschiedlicher Bewertungsmethoden; Masterarbeit: Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Universität Kassel.

Sakulpipatsin, P. (2008) Exergy efficient building design, Doktorarbeit, Technische Universität Delft, ISBN 978-90-6562-175-7.

Sakulpipatsin, P. und Schmidt, D. (2011): Exergy analysis applied to building design.

Schmidt, D. (2004): Methodology for the Modelling of Thermally Activated Building Components in Low Exergy Design.

D. Schmidt, M. Ala-Juusela (2004): Low Exergy Systems for Heating and Colling of Buildings. IPB / VTT Building and Transport. Paper Konferenzbeitrag (Plea2004 - The 1st Conference on Passive and Low Energy Architecture. Eindhoven, The Netherlands, 19 - 22 Sept. 2004)

Schmidt, D., Sager, C., Schurig, M., Torio, H., Kühl, L. (2009): Projektverbund LowEx: Nutzung von regenerativen Energiequellen in Gebäuden durch den Einsatz von Niedrig- Exergiesystemen.

Schmidt, D. und Torio, H. (2009): More sustainable buildings through exergy analysis – Solar thermal and/or ventilation systems.

Schmidt, D., Torio, H., Schurig, M., Kallert, A. (2010): Projektverbund LowEx: Deutsche Beteiligung und Koordinierung des ECBCS Annex 49: Low Exergy Systems for High-Performance Buildings and Communities. Deutsche Fassung Summary Guidebook.

Schleswig Holstein (2014): Die Energiewende im Wärmesektor – Chancen für Kommunen. Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig Holstein. Kiel.

Torio, H., Angelotti, A., Schmidt, D. (2008): Exergy analysis of renewable energy-based systems for buildings: A critical view.

TRAFO 2013: Transformationsstrategien von fossiler zentraler Fernwärmeversorgung zu Netzen mit höheren Anteilen erneuerbarer Energien. IFEU Heidelberg, GEF Leimen, AGFW Frankfurt. ür Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Gefördert vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.

VTT Technical Research Centre of Finlan (Hrsg.) (2003): Heating and Cooling with Focus on Increased Energy Efficiency and Improved Comfort. Guidebook to IEA ECBCS Annex 37 Low Exergy Systems for Heating and Cool-ing of Buildings.

Wolff, D. und Jagnow, K. (2011) Untersuchung von Nah- und Fernwärmenetzen. m A., et al IWU Darmstadt (2013): Akteursbezogene Wirtschaftlichkeitsberechnungen im Bestand, im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz.

Bücher:

Baehr, H. und Kabelac, S. (2012): Thermodynamik - Grundlagen und technische Anwendungen, Berlin. Heidelberg, Springer, 15. Auflage.

Bejan, A., G. Tsatsaronis, and M. J. Moran (1996): Thermal Design and Optimization, John Wiley and Sons, Inc.

Bejan, A. (1997): Advanced Engineering Thermodynamics, New York, USA, John Wiley and Sons

Doetsch, C. und A. Jentsch, A. (2010): ExergyFingerprint - Neues Bewertungswerkzeug für Energieversorgungsszenarien, 2009, überarbeitet 6/2010

Dincer, I. und Rosen, M. A. (2007): Exergy – Energy, Environment and Sustainable Development, Elsevier

Hauser (2008): Energieeffizientes Bauen - Umsetzungsstrategien und Perspektiven.

Hepbasli, A. (2006): A key review on exergetic analysis and assessment of renewable energy resources for a sustainable future

Meggers (2010): Exergy analysis of wastewater heat recovery for optimal LowEx heat pump performance

Pehnt, M. (2010): Exergie-Effizienz Heidelberg, Springer

Moran, M. J. und Shapiro, H. N. (1998): Fundamentals of Engineering Thermodynamics, New York, USA, John Wiley Sons, 3rd Edition

Dissertationen:

Bargel, S. (2010): Entwicklung eines exergetischen Analysemodells zum umfassenden Technologievergleich von Wärmeversorgungssystemen unter Berücksichtigung des Einflusses einer veränderlichen Außentemperatur, Dissertation, Ruhr-Universität Bochum

Jentsch, A. (2010): A novel exergy-based concept of thermodynamic quality and its application to energy system evaluation and process analysis, Dissertation, Technische Universität Berlin, Südwestdeutscher Verlag für Hochschulschriften

Internetseiten:

AGEB (2014): AG Energiebilanzen e.V. - www.ag-energiebilanzen.de/ Intelligent Energy Europe: Typology Approach for Building Stock Energy Assessment, unter Mitarbeit des IWU; www.building-typology.eu (abgerufen am 1.2.2012)

Das Glückstein-Quartier: www.glueckstein-quartier.de (abgerufen am 03.2012)

ECBCS Annex 49. Low Exergy Systems for High-Performance Buildings and Communities: <http://www.annex49.info/background.html> (abgerufen am 28.5.2014)

Exergieausweis Online, Beta-Version 0.9.4 www.exergieausweis.de (abgerufen am 16.10.2013)

EU-Richtlinie 2004/8/EG: RICHTLINIE 2004/8/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 11. Februar 2004 über die Förderung einer am Nutzwärmebedarf orientierten Kraft-Wärme-Kopplung im Energie-Binnenmarkt und zur Änderung der Richtlinie 92/42/EWG: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2004:052:0050:0050:DE:PDF> (abgerufen am 18.3.2013).

Grobe, C. (2013): Architektur- und TGA-Planungsbüro Carsten Grobe Passivhaus

<http://www.passivhaus.de/passivhaus-informationen/qualitaetssicherung/energieausweis.html> (abgerufen am 17.10.2013)

Jentsch, A. (2013): Sektion Referenz auf der Website von Richtvert | Energiesystemberatung <http://www.richtvert.de/referenzen> (abgerufen am 23.10.2013)

Jentsch, A. (2013B): Berechnungsgrundlagen für Exergieausweis Online <http://www.exergieausweis.de/Exergieausweis-Online-Grundlagen.pdf> (abgerufen am 26.10.2013)

Kalkbreite, Genossenschaft: Projektdokumentation (2011). Zürich. www.kalkbreite.net (abgerufen am 28.5.2013)

Projekt REMINING-LowEx: „Redevelopment of European Mining Areas into Sustainable Communities by Integrating Supply and Demand Side based on Low Exergy Principles:

<http://concerto.eu/concerto/concerto-sites-a-projects/sites-con-sites/sites-con-sites-search-by-name/sites-remining-lowex-heerlen.html>

Umweltbundesamt Dessau: Trends der Lufttemperatur in Deutschland

<http://www.umweltbundesamt.de/daten/klimawandel/trends-der-lufttemperatur> (abgerufen am 24.7.2014)

Rechtsgutachten/Normen:

BMVBS - Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2009): Energieeinsparverordnung
DIN – Deutsches Institut für Normung e.V. (2007): DIN V 18599-1 - Energetische Bewertung von Gebäuden (Vornorm)

DIN EN 15316-4-5: Heizungsanlagen in Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Energieanforderungen und Nutzungsgrade der Anlagen - Teil 4-5: Wärmeerzeugung für die Raumheizung, Leistungsdaten und Effizienz von Nah- und Fernwärmesystemen; Deutsche Fassung EN 15316-4-5:2007

DIN V 4701-10 * DIN SPEC 4701-10: 2003-08 Energetische Bewertung heiz- und raumluftechnischer Anlagen - Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung

EU (2004): Richtlinie 2004/8/EG des europäischen Parlaments und Rates über die Förderung einer am Nutzwärmebedarf orientierten Kraft- Wärme- Kopplung im Energiebinnenmarkt und zur Änderung der Richtlinie 92/42/EWG

VDI (2008): VDI 4608 Blatt 2; Energiesysteme Kraft-Wärme-Kopplung – Allokation und Bewertung; Beuth-Verlag 2008

VDI (2014): VDI 4800 Blatt 1, Ressourceneffizienz - Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien (Entwurf: Juli 2014), Einsprüche bis 2014-12-31

AGFW (2014): Arbeitsblatt AGFW FW 309 Teil 6 – 2. Entwurf: Energetische Bewertung von Fernwärme - Bestimmung spezifischer CO₂-Emissionsfaktoren, Mai 2014, Einspruch bis 31.8.2014

Zepf, K.; Ziegler, R.; Zieher, M.; Floß, A. 2012: Forschungsvorhaben Fernwärmemodellstadt Ulm - EnEff: Wärme - Exergetische Optimierung der Fernwärmeversorgung Ulm. Abschlussbericht, Förderkennzeichen 0327447A.)

Vorträge:

IEA Future Buildings Forum Think Tank, 20.-21. März 2007 in Helsinki, Finnland.

BMWi LowEx Symposium, 29. Oktober 2009 in Kassel, Deutschland.

www.enob.info/fileadmin/media/Publikationen/LowEx/LowEx-Tagungsband_10-09.pdf

Annex 49 Conference, 19.-21. Oktober 2010 in München, Deutschland

www.annex49.info/conference/download/Annex_Conference_Reader.pdf

ETH Zürich: Kolloquium „Aktuelle Probleme der Energietechnik“, 23.3. 2013. Vortrag Marcel Wickart, Strategischer Energieberater ewz

http://www.ee.ethz.ch/fileadmin/user_upload/eeh/news_events/conferences/2010_04_27_MarcelWickart_KolloquiumBeitrag.pdf

Zeitschriften:

Alpuche, M.G. et al. (2005): Exergy analysis of air cooling systems in buildings in hot humid climates. In: Applied Thermal Engineering 25 (4) (2005), S. 507-517.

Baehr, H. D. und Schmidt, E. F. (1963): Definition und Berechnung von Brennstoffexergien, In: Zeitschrift für Energietechnik und Energiewirtschaft (BWK) 15 (1963), Nr.8, S. 375-418.

Dijkman, T. J. und R.M.J. Benders (2010): Comparison of renewable fuels based on their land use using energy densities. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 14, Issue 9, 3148-3155

Jansen, S. (2010): Understanding the exergy of cold: theory and practical examples, *Int. J. Exergy*, Vol. 7, No. 6.

Jentsch, A., C. Dötsch, C. Beier und S. Bargel (2009): ExergyFingerprint - Neues Bewertungs-werkzeug für Energieversorgungsszenarien. *EuroHeat&Power* 38. Jg (2009), Heft 4: 38-45.

Mauch, M., Corradini, R., Wiesenmeyer, K. und Schwentzke, M. (2010): Energiewirtschaftliche Tagesfragen 55. Jg (2010) Heft 9

Rosen, M. (2008): Allocating carbon dioxide emissions from cogeneration systems: descriptions of selected output-based methods', *Journal of Cleaner Production* (16), 171–177.

Schüwer, D. (2009): Technologie-Ausblick LowEx-Konzepte. *Sustainable Urban Infrastructure*. Ausgabe München – Wege in eine CO₂-freie Zukunft. (Hrsg.) Siemens AG. 41.

Wepfer, W.J.; Gaggioli, R.A.; Obert, E.F. (1979): Proper evaluation of available energy for HVAC, *Trans. ASHRAE*, Vol. 85, No. 1, pp. 214.

Anhang

13 Annahmen für die Bewertung der Einzelsysteme in Kapitel 5.8

Alle Nutzungsgrade werden Brennwert-bezogen angegeben.

13.1.1 Erdgas-Brennwertkessel

Größe	Wert	Einheit
Thermischer Nutzungsgrad	95%	
Primärenergiefaktor Erdgas	1,1	
Emissionsfaktor Erdgas	0,25	kg/kWh
Raumtemperatur	20	°C
Referenztemperatur	9	°C
Wärmeverluste bei der Speicherung im Haus	0%	
Wärmeverluste im Gebäudenetz	5%	
Hilfsstromanteil in Prozent der erzeugten Wärme	1%	
Primärenergiefaktor Strommix	2,7	
Emissionsfaktor Strom	0,6	kg/kWh

13.1.2 Strom-Nachtspeicherheizung

Größe	Wert	Einheit
Raumtemperatur	20	°C
Referenztemperatur	9	°C
Wärmeverluste bei der Übergabe	1%	
Wärmeverluste bei der Speicherung im Haus	10%	
Wärmeverluste im Gebäudenetz	5%	
Primärenergiefaktor Strommix	2,7	
Emissionsfaktor Strom	0,6	kg/kWh

13.1.3 Holzpellet-Heizkessel

Größe	Wert	Einheit
Thermischer Nutzungsgrad	80%	
Primärenergiefaktor Holz	1,2	
Emissionsfaktor Holz	0,012	kg/kWh
Raumtemperatur	20	°C
Referenztemperatur	9	°C
Wärmeverluste bei der Speicherung im Haus	3%	
Wärmeverluste im Gebäudenetz	5%	
Hilfsstromanteil in Prozent der erzeugten Wärme	1%	
Primärenergiefaktor Strommix	2,7	
Emissionsfaktor Strom	0,6	kg/kWh

13.1.4 Luft-Wärmepumpe

Größe	Wert	Einheit
COP (über alle Systemelemente)	2,5	
Raumtemperatur	20	°C
Referenztemperatur	9	°C
Wärmeverluste bei der Speicherung im Haus	5%	
Wärmeverluste im Gebäudenetz	5%	
Hilfsstromanteil in Prozent der erzeugten Wärme	0%	
Primärenergiefaktor Strommix	2,7	
Emissionsfaktor Strom	0,6	kg/kWh

13.1.5 Erd-Wärmepumpe

Größe	Wert	Einheit
COP (über alle Systemelemente)	3,7	
Raumtemperatur	20	°C
Referenztemperatur	9	°C
Temperatur der Erdwärme	9	°C
Wärmeverluste bei der Speicherung im Haus	5%	
Wärmeverluste im Gebäudenetz	5%	
Hilfsstromanteil in Prozent der erzeugten Wärme	0%	
Primärenergiefaktor Strommix	2,7	
Emissionsfaktor Strom	0,6	kg/kWh

13.1.6 Erdgas-Brennwertkessel mit 40% Solarthermie

Größe	Wert	Einheit
Thermischer Nutzungsgrad	95%	
Primärenergiefaktor Erdgas	1,1	
Emissionsfaktor Erdgas	0,25	kg/kWh
Raumtemperatur	20	°C
Referenztemperatur	9	°C
Wärmeverluste bei der Speicherung im Haus	0%	
Wärmeverluste im Gebäudenetz	5%	
Anteil Solarthermie-Wärme an der Endenergie	40%	
Vorlauf Solarthermie	55	°C
Rücklauf Solarthermie	35	°C
Hilfsstromanteil in Prozent der erzeugten Wärme	2%	
Primärenergiefaktor Strommix	2,7	
Emissionsfaktor Strom	0,6	kg/kWh

13.1.7 Fernwärme aus Steinkohle-KWK (Alt | Dampf)

Größe	Wert	Einheit
Elektrischer Nutzungsgrad des Heizkraftwerks	25%	
Thermischer Nutzungsgrad des Heizkraftwerks	60%	
Primärenergiefaktor Steinkohle	1,1	
Emissionsfaktor Steinkohle	0,34	kg/kWh
Raumtemperatur	20	°C
Referenztemperatur	9	°C
Vorlauftemperatur im Fernwärmenetz	200	°C
Rücklauftemperatur im Fernwärmenetz	95	°C
Wärmeverluste im Fernwärmenetz inkl. vorgelagerter Speicher	28%	
Wärmeverluste bei der Übergabe	2%	
Wärmeverluste bei der Speicherung im Haus	0%	
Wärmeverluste im Gebäudenetz	5%	
Verringerung der Energiequalität auf dem Weg von der Erzeugung zum Verbraucher	1%	
Hilfsstromanteil in Prozent der erzeugten Wärme	3%	
Primärenergiefaktor Strommix	2,7	
Emissionsfaktor Strom	0,6	kg/kWh

13.1.8 Fernwärme aus Steinkohle-KWK (Alt | Wasser)

Größe	Wert	Einheit
Elektrischer Nutzungsgrad des Heizkraftwerks	37%	
Thermischer Nutzungsgrad des Heizkraftwerks	55%	
Primärenergiefaktor Steinkohle	1,1	
Emissionsfaktor Steinkohle	0,34	kg/kWh
Raumtemperatur	20	°C
Referenztemperatur	9	°C
Vorlauftemperatur im Fernwärmenetz	130	°C
Rücklauftemperatur im Fernwärmenetz	90	°C
Wärmeverluste im Fernwärmenetz inkl. vorgelagerter Speicher	23%	
Wärmeverluste bei der Übergabe	2%	
Wärmeverluste bei der Speicherung im Haus	0%	
Wärmeverluste im Gebäudenetz	5%	
Verringerung der Energiequalität auf dem Weg von der Erzeugung zum Verbraucher	1%	
Hilfsstromanteil in Prozent der erzeugten Wärme	4%	
Primärenergiefaktor Strommix	2,7	
Emissionsfaktor Strom	0,6	kg/kWh

13.1.9 Fernwärme aus Erdgas-KWK (Neu | Wasser)

Größe	Wert	Einheit
Elektrischer Nutzungsgrad des Heizkraftwerks	50%	
Thermischer Nutzungsgrad des Heizkraftwerks	35%	
Primärenergiefaktor Erdgas	1,1	
Emissionsfaktor Erdgas	0,25	kg/kWh
Raumtemperatur	20	°C
Referenztemperatur	9	°C
Vorlauftemperatur im Fernwärmenetz	110	°C
Rücklauftemperatur im Fernwärmenetz	60	°C
Wärmeverluste im Fernwärmenetz inkl. vorgelagerter Speicher	18%	
Wärmeverluste bei der Übergabe	2%	
Wärmeverluste bei der Speicherung im Haus	0%	
Wärmeverluste im Gebäudenetz	5%	
Verringerung der Energiequalität auf dem Weg von der Erzeugung zum Verbraucher	1%	
Hilfsstromanteil in Prozent der erzeugten Wärme	3%	
Primärenergiefaktor Strommix	2,7	
Emissionsfaktor Strom	0,6	kg/kWh

13.1.10 Fernwärme aus dem Rücklauf einer Erdgas-KWK (Neu | LowEx)

Größe	Wert	Einheit
Elektrischer Nutzungsgrad des Heizkraftwerks	51%	
Thermischer Nutzungsgrad des Heizkraftwerks (Primäre Fernwärme 110°C/60°C)	25%	
Thermischer Nutzungsgrad des Heizkraftwerks (LowEx Fernwärme aus dem Rücklauf 60°C/40°C)	10%	
Primärenergiefaktor Erdgas	1,1	
Emissionsfaktor Erdgas	0,25	kg/kWh
Raumtemperatur	20	°C
Referenztemperatur	9	°C
Vorlauftemperatur im LowEx-Fernwärmenetz	60	°C
Rücklauftemperatur im LowEx-Fernwärmenetz	40	°C
Wärmeverluste im Fernwärmenetz inkl. vorgelagerter Speicher	13%	
Wärmeverluste bei der Übergabe	2%	
Wärmeverluste bei der Speicherung im Haus	0%	

Wärmeverluste im Gebäudenetz	5%	
Verringerung der Energiequalität auf dem Weg von der Erzeugung zum Verbraucher	1%	
Hilfsstromanteil in Prozent der erzeugten Wärme	3%	
Primärenergiefaktor Strommix	2,7	
Emissionsfaktor Strom	0,6	kg/kWh

13.1.11 Fernwärme aus Abwärme (Industrie | LowEx)

Größe	Wert	Einheit
Raumtemperatur	20	°C
Referenztemperatur	9	°C
Vorlauftemperatur im LowEx-Fernwärmenetz	60	°C
Rücklauftemperatur im LowEx-Fernwärmenetz	40	°C
Wärmeverluste im Fernwärmenetz inkl. vorgelagerter Speicher	23%	
Wärmeverluste bei der Übergabe	2%	
Wärmeverluste bei der Speicherung im Haus	0%	
Wärmeverluste im Gebäudenetz	5%	
Verringerung der Energiequalität auf dem Weg von der Erzeugung zum Verbraucher	1%	
Hilfsstromanteil in Prozent der erzeugten Wärme	3%	
Primärenergiefaktor Strommix	2,7	
Emissionsfaktor Strom	0,6	kg/kWh

13.1.12 Fernwärme aus tiefer Geothermie

Größe	Wert	Einheit
Raumtemperatur	20	°C
Referenztemperatur	9	°C
Vorlauftemperatur im Fernwärmenetz	80	°C
Rücklauftemperatur im LowEx-Fernwärmenetz	60	°C
Wärmeverluste im Fernwärmenetz inkl. vorgelagerter Speicher	20%	
Wärmeverluste bei der Übergabe	2%	
Wärmeverluste bei der Speicherung im Haus	0%	
Wärmeverluste im Gebäudenetz	5%	
Verringerung der Energiequalität auf dem Weg von der Erzeugung zum Verbraucher	1%	

Hilfsstromanteil in Prozent der erzeugten Wärme	4%	
Primärenergiefaktor Strommix	2,7	
Emissionsfaktor Strom	0,6	kg/kWh

13.1.13 Nahwärme aus Erdgas-BHKW

Größe	Wert	Einheit
Elektrischer Nutzungsgrad des Heizkraftwerks	35%	
Thermischer Nutzungsgrad des Heizkraftwerks	50%	
Primärenergiefaktor Erdgas	1,1	
Emissionsfaktor Erdgas	0,25	kg/kWh
Raumtemperatur	20	°C
Referenztemperatur	9	°C
Vorlauftemperatur im LowEx-Fernwärmenetz	90	°C
Rücklauftemperatur im LowEx-Fernwärmenetz	60	°C
Wärmeverluste im Fernwärmenetz inkl. vorgelagerter Speicher	20%	
Wärmeverluste bei der Übergabe	2%	
Wärmeverluste bei der Speicherung im Haus	0%	
Wärmeverluste im Gebäudenetz	5%	
Verringerung der Energiequalität auf dem Weg von der Erzeugung zum Verbraucher	1%	
Hilfsstromanteil in Prozent der erzeugten Wärme	2%	
Primärenergiefaktor Strommix	2,7	
Emissionsfaktor Strom	0,6	kg/kWh

13.1.14 Nahwärme aus Biogas-BHKW

Größe	Wert	Einheit
Elektrischer Nutzungsgrad des Heizkraftwerks	35%	
Thermischer Nutzungsgrad des Heizkraftwerks	50%	
Primärenergiefaktor Biogas (aufgrund von Energieverlusten bei der Wandlung in Biogas)	1,76	
Emissionsfaktor Biogas	0,012	kg/kWh
Raumtemperatur	20	°C
Referenztemperatur	9	°C
Vorlauftemperatur im LowEx-Fernwärmenetz	90	°C
Rücklauftemperatur im LowEx-Fernwärmenetz	60	°C
Wärmeverluste im Fernwärmenetz inkl. vorgelagerter	20%	

Speicher		
Wärmeverluste bei der Übergabe	2%	
Wärmeverluste bei der Speicherung im Haus	0%	
Wärmeverluste im Gebäudenetz	5%	
Verringerung der Energiequalität auf dem Weg von der Erzeugung zum Verbraucher	1%	
Hilfsstromanteil in Prozent der erzeugten Wärme	2%	
Primärenergiefaktor Strommix	2,7	
Emissionsfaktor Strom	0,6	kg/kWh

14 Annahmen für die Berechnung der Exergieausweise

Raumwärme

Größe	Wert	Einheit	Beschreibung	Quelle
Temperatur der Raumwärme	20	°C	Mindesttemperatur welche benötigt wird, um die Raumtemperatur aufrecht zu erhalten	Erfahrungsbasierte Schätzung (Richtvert)

Trinkwarmwasser

Größe	Wert	Einheit	Beschreibung	Quelle
Kaltwassertemperatur	10	°C	Kaltwassertemperatur von der aus das Trinkwarmwasser erwärmt werden muss	Erfahrungsbasierte Schätzung (Richtvert)
Hahnaustrittstemperatur Trinkwarmwasser	43	°C	Nach DIN EN 806-2 empfohlene maximale Vorlauftemperatur	DIN EN 806-2

Biogas

Größe	Wert	Einheit	Beschreibung	Quelle
	0,9	kWh/kWh	Die mit Brennstoffen verbundene Exergie entspricht näherungsweise dem Brennwert.	www.engineeringtoolbox.com/gross-net-heating-values-d_420.html#1%29
	2,03	kWh/kWh	Deutsches Biogas, welches in Erdgasnetze eingespeist wurde. Hauptrohstoff: Mais	www.probas.umweltbundesamt.de (Datensatz: Pipeline\Biomethan-Mais-DE-2005)

Erdgas

Größe	Wert	Einheit	Beschreibung	Quelle
Heizwert / Brennwert	0,9	kWh/kWh	Die mit Brennstoffen verbundene Exergie entspricht näherungsweise dem Brennwert.	http://www.chemie-schule.de/KnowHow/Heizwert

KEV_gesamt (Kumulierter Energieverbrauch - fossil und erneuerbar) für Erdgas	1,16	kWh/ kWh	Erdgas, welches mit der Pipeline angeliefert wird - Daten für Deutschland 2005 - Für die Berechnung wird angenommen, dass dieses Gas aus konventioneller Förderung stammt. Die Werte sind wahrscheinlich nicht für Erdgas aus "Fracking" gültig.	GEMIS 4.6. -Ergebnistabelle (www.gemis.de/files/setup/g46-results_aug2010daten1.xls) (Tabelle: Wärme-end 2005)
--	------	-------------	--	--

Fern- oder Nahwärme

Größe	Wert	Einheit	Beschreibung	Quelle
Relativer Hilfsstrombedarf für den Netzbetrieb	1,5	%	Stromaufwand für den Transport von warmem Wasser in isolierten Fernwärmerohren im Jahresmittel - Bezogen auf die verbrauchte Wärme - Deckung des Stromes durch Strom aus dem Kraftwerkspark Deutschland.	AGFW Arbeitsblatt 309-1, Abschnitt 3.3.
Heizwert / Brennwert	0,9	kWh/ kWh	Die mit Brennstoffen verbundene Exergie entspricht näherungsweise dem Brennwert.	http://www.chemie-schule.de/KnowHow/Heizwert
KEV_gesamt (Kumulierter Energieverbrauch - fossil und erneuerbar) für Erdgas	1,16	kWh/ kWh	Erdgas, welches mit der Pipeline angeliefert wird - Daten für Deutschland 2005 - Für die Berechnung wird angenommen, dass dieses Gas aus konventioneller Förderung stammt. Die Werte sind wahrscheinlich nicht für Erdgas aus "Fracking" gültig.	GEMIS 4.6. - Ergebnistabelle (www.gemis.de/files/setup/g46-results_aug2010daten1.xls) (Tabelle: Wärme-end 2005)
Relative Wärmeverluste über die Fernwärmeleitung	16	%	Wärmeverluste durch den Transport von warmem Wasser in isolierten Rohren im Jahresmittel - Bezogen auf die verbrauchte Wärme	Erfahrungsbasierte Schätzung (Richtvert)
Wärmeverluste dezentraler Wärmespeicher	3	%	Wärmeverluste durch Speicherung von erwärmtem Wasser in isolierten Warmwasserspeichern.	Erfahrungsbasierte Schätzung (Richtvert)

Holz

Größe	Wert	Einheit	Beschreibung	Quelle
Heizwert / Brennwert	0,93	kWh/ kWh	Wert für lufttrockenes Holz - Die mit Brennstoffen verbundene Exergie entspricht näherungsweise dem Brennwert.	http://www.kaminholzwissen.de/holzbrennwerte.php
KEV_gesamt (Kumulierter Energieverbrauch - fossil und erneuerbar) für Holz.	1,11	kWh/ kWh	Angabe für 2005 für Holz aus Kurzumtriebsplantagen bzw. Holzpellets - Scheitholz hat zwar einen geringeren KEV, führt jedoch auch zu einem geringeren Kesselwirkungsgrad, daher kann es in etwa mit dem dargestellten Wert abgebildet werden. Der Kumulierte Energie-Verbrauch (KEV) bezeichnet den Energieverbrauch um eine Einheit Endenergie bereitzustellen.	GEMIS 4.6. -Ergebnistabelle (www.gemis.de/files/setup/g46-results_aug2010daten1.xls) (Tabelle: Wärme-end 2005)

Solarwärme

Größe	Wert	Einheit	Beschreibung	Quelle
Deckungsanteil	60	%	Anteil der Wärme aus Solarthermie - Es wird angenommen, dass der Rest der benötigten Wärme mit Hilfe eines Heizkessels erzeugt wird.	Erfahrungsbasierte Schätzung (Richtvert)
KEV_gesamt (Kumulierter Energieverbrauch - fossil und erneuerbar) für Wärme aus Solarthermie	1,13	kWh/ kWh	Angabe für 2005 - Mittelwert Vakuumröhren und Flachkollektor.	GEMIS 4.6. -Ergebnistabelle (www.gemis.de/files/setup/g46-results_aug2010daten1.xls) (Tabelle: Wärme-end 2005)
Kollektor-Austrittstemperatur	70	°C	Temperatur des durch den Solarkollektor aufgewärmten Wassers im Jahresmittel	Erfahrungsbasierte Schätzung (Richtvert)
Kollektor-Eintrittstemperatur	35	°C	Temperatur des in den Solarkollektor eintretenden Wassers im Jahresmittel	Erfahrungsbasierte Schätzung (Richtvert)

Strommix

Größe	Wert	Einheit	Beschreibung	Quelle
Heizwert / Brennwert	0,96	kWh/ kWh	Die mit Brennstoffen verbundene Exergie entspricht näherungsweise dem Brennwert	Schätzung basierend auf http://www.chemie-schule.de/KnowHow/Heizwert
KEV_gesamt (Kumulierter Energieverbrauch - fossil und erneuerbar) für Endkundenstrom aus dem Kraftwerkspark Deutschland.	2,96	kWh/ kWh	Angabe für 2005 - Der kumulierte Energie-Verbrauch (KEV) bezeichnet den Energieverbrauch um eine Einheit Endenergie bereitzustellen.	GEMIS 4.6. -Ergebnistabelle (www.gemis.de/files/setup/g46-results_aug2010daten1.xls) (Tabelle: STROM-DE 2005)

Abwärme

Größe	Wert	Einheit	Beschreibung	Quelle
Deckungsanteil Abwärme	88	%	Wärmelieferung aus Abwärme als Anteil des Wärmebedarfs.	Erfahrungsbasierte Schätzung (Richtvert)
Jahresnutzungsgrad	90	%	Jahresmittlerer Heizwertbezogener Netto-Nutzungsgrad eines Gasheizkessels bezogen auf die erzeugte Wärme	Erfahrungsbasierte Schätzung (Richtvert)
Relativer Hilfsstrombedarf für den Netzbetrieb	0,5	%	Zusätzlicher Stromaufwand für die Nutzung von Abwärme im Vergleich zur "Entsorgung"	Annahme
Heizwert / Brennwert	0,96	kWh/ kWh	Die mit Brennstoffen verbundene Exergie entspricht näherungsweise dem Brennwert	Schätzung basierend auf http://www.chemie-schule.de/KnowHow/Heizwert

KEV_gesamt (Kumulierter Energieverbrauch - fossil und erneuerbar) für Abwärme	1,02	kWh/ kWh	Annahme, da hierfür keine Daten in GEMIS hinterlegt sind - Der KEV für die Abwärme setzt sich aus der Abwärme und geschätzten Aufwendungen für die Installation der Abwärmenutzungsanlage zusammen.	Annahme (Richtvert)
KEV_gesamt (Kumulierter Energieverbrauch - fossil und erneuerbar) für Endkundenstrom aus dem Kraftwerkspark Deutschland.	2,96	kWh/ kWh	Angabe für 2005 - Der kumulierte Energie-Verbrauch (KEV) bezeichnet den Energieverbrauch um eine Einheit Endenergie bereitzustellen.	GEMIS 4.6. -Ergebnistabelle (www.gemis.de/files/setup/g46-results_aug2010daten1.xls) (Tabelle: STROM-DE 2005)
Temperatur der Abwärme	90	°C	Temperaturniveau des durch Abwärme aufgeheizten Wärmeträgermediums (meist Wasser) bei Austritt aus dem Abwärme-Wärmetauscher	Annahme
Temperatur des Fern- bzw. Nahwärmerücklaufs	50	°C	Temperatur des aufzuheizenden Mediums bei Eintritt in den Abwärme - Wärmetauscher	Annahme
Heizkessel (Effizient)				
Größe	Wert	Einheit	Beschreibung	Quelle
Jahresnutzungsgrad	102	%	Jahresmittlerer Heizwertbezogener Netto-Nutzungsgrad eines Brennkessels bezogen auf die erzeugte Wärme. Dieser offizielle Nutzungsgrad kann über 100 % liegen, da der Brennwert genutzt wird, aber die erzeugte Wärme auf den niedrigeren Heizwert bezogen wird.	Erfahrungsbasierte Schätzung (Richtvert)

Heizkessel (Festbrennstoffe)

Größe	Wert	Einheit	Beschreibung	Quelle
Jahresnutzungsgrad	80	%	Jahresmittlerer Heizwertbezogener Netto-Nutzungsgrad eines modernen Feststoffkessels bezogen auf die erzeugte Wärme	Erfahrungsbasierte Schätzung (Richtvert)

Kraftwerkspark Deutschland

Größe	Wert	Einheit	Beschreibung	Quelle
Heizwert / Brennwert	0,96	kWh/kWh	Die mit Brennstoffen verbundene Exergie entspricht näherungsweise dem Brennwert	Schätzung basierend auf http://www.chemie-schule.de/KnowHow/Heizwert
KEV_gesamt (Kumulierter Energieverbrauch - fossil und erneuerbar) für Endkundenstrom aus dem Kraftwerkspark Deutschland.	2,96	kWh/kWh	Angabe für 2005 - Der kumulierte Energie-Verbrauch (KEV) bezeichnet den Energieverbrauch um eine Einheit Endenergie bereitzustellen.	GEMIS 4.6. -Ergebnistabelle (www.gemis.de/files/setup/g46-results_aug2010daten1.xls) (Tabelle: STROM-DE 2005)

Solarthermie & Erdgas

Größe	Wert	Einheit	Beschreibung	Quelle
Jahresnutzungsgrad	102	%	Jahresmittlerer Heizwertbezogener Netto-Nutzungsgrad eines Brennwertkessels bezogen auf die erzeugte Wärme. Dieser offizielle Nutzungsgrad kann über 100 % liegen, da der Brennwert genutzt wird, aber die erzeugte Wärme auf den niedrigeren Heizwert bezogen wird.	Erfahrungsbasierte Schätzung (Richtvert)
Heizwert / Brennwert	0,9	kWh/kWh	Die mit Brennstoffen verbundene Exergie entspricht näherungsweise dem Brennwert.	http://www.chemie-schule.de/KnowHow/Heizwert

KEV_gesamt (Kumulierter Energieverbrauch - fossil und erneuerbar) für Erdgas	1,16	kWh/kWh	Erdgas, welches mit der Pipeline angeliefert wird - Daten für Deutschland 2005 - Für die Berechnung wird angenommen, dass dieses Gas aus konventioneller Förderung stammt. Die Werte sind wahrscheinlich nicht für Erdgas aus "Fracking" gültig.	GEMIS 4.6. -Ergebnistabelle (www.gemis.de/files/setup/g46-results_aug2010daten1.xls) (Tabelle: Wärme-end 2005)
--	------	---------	--	--

Stadtnetz (Effizient)

Größe	Wert	Einheit	Beschreibung	Quelle
Jahresnutzungsgrad elektrisch	37	%	Jahresmittlerer Heizwertbezogener elektrischer Nettonutzungsgrad der Heizkraftwerke des Stadtnetzes bezogen auf die erzeugte Wärme	Erfahrungsbasierte Schätzung (Richtvert)
Jahresnutzungsgrad Heizkessel	90	%	Jahresmittlerer Heizwertbezogener Nettonutzungsgrad eines Gas-Heizwerks bezogen auf die erzeugte Wärme.	Erfahrungsbasierte Schätzung (Richtvert)
Jahresnutzungsgrad thermisch	50	%	Jahresmittlerer Heizwertbezogener thermischer Nettonutzungsgrad des an das Fernwärmenetz angeschlossenen Kraftwerksparks frei Netzanschluss	Erfahrungsbasierte Schätzung (Richtvert)
Heizwert / Brennwert	0,96	kWh/kWh	Die mit Brennstoffen verbundene Exergie entspricht näherungsweise dem Brennwert	Schätzung basierend auf http://www.chemie-schule.de/KnowHow/Heizwert
KEV_gesamt (Kumulierter Energieverbrauch - fossil und erneuerbar) für Endkundenstrom aus dem Kraftwerkspark Deutschland.	2,96	kWh/kWh	Angabe für 2005 - Der kumulierte Energie-Verbrauch (KEV) bezeichnet den Energieverbrauch um eine Einheit Endenergie bereitzustellen.	GEMIS 4.6. -Ergebnistabelle (www.gemis.de/files/setup/g46-results_aug2010daten1.xls) (Tabelle: STROM-DE 2005)

Wärmelieferung aus Spitzenlastkessel	12	%	Wärmelieferung aus Spitzenlastkessel als Anteil des Wärmebedarfs - Es wird Erdgas als Brennstoff eingesetzt.	Erfahrungsbasierte Schätzung (Richtvert)
Jahresmittlere Rücklauftemperatur im Wärmenetz	50	°C	Jahresmittlere Rücklauftemperatur im Fernwärmenetz	Erfahrungsbasierte Schätzung (Richtvert)
Jahresmittlere Vorlauftemperatur im Wärmenetz	100	°C	Jahresmittlere Vorlauftemperatur im Fernwärmenetz	Erfahrungsbasierte Schätzung (Richtvert)

Wärmepumpe (Effizient)

Größe	Wert	Einheit	Beschreibung	Quelle
Mittlere Jahresarbeitszahl	3,5		Mittlere Jahresarbeitszahl des Wärmepumpensystems unter Berücksichtigung von Hilfsströmen, Elektrischer Direktheizung und Speicherverlusten	AUER, Falk und SCHOTE, Herbert (2007): Nicht jede Wärmepumpe trägt zum Klimaschutz bei.(ecotec-energiesparhaus.de/Daten/WP-Bericht-2006-07.pdf)
Temperatur der Wärmequelle	10	°C	Temperatur der Wärmequelle im Jahresmittel	Erfahrungsbasierte Schätzung (Richtvert)