

REA: Ressourcenexergieanalyse

**Berechnungsleitfaden
für Energiesysteme
einschließlich
Fernwärme und Fernkälte**

Juni 2023

© AGFW, Frankfurt am Main

Autor:

Dr. Andrej Jentsch

Telefon +49 69 6304-291

E-Mail a.jentsch@agfw.org

Herausgeber:

AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V.

Stresemannallee 30

60596 Frankfurt am Main

Telefon +49 69 6304-293

Telefax +49 69 6304-455

E-Mail info@agfw.de

Internet www.agfw.de

Jede Art der Vervielfältigung, auch auszugsweise, ist nur mit Genehmigung des Autors gestattet.

Vertrieb:

AGFW-Projektgesellschaft für Rationalisierung, Information und Standardisierung mbH

Stresemannallee 30

60596 Frankfurt am Main

Telefon +49 69 6304-416

Telefax +49 69 6304-391

E-Mail info@agfw.de

Internet www.agfw.de

Haftungsausschluss:

Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung ist dieser Berechnungsleitfaden nicht Teil des offiziellen normativen Regelwerks des AGFW. Er soll in Forschung und Entwicklung und als Grundlage für normative Veröffentlichungen verwendet werden. Das Dokument wurde mit größtmöglicher Gewissenhaftigkeit erstellt. Eine Haftung für die Richtigkeit der hier dargestellten Angaben ist dennoch ausgeschlossen.

Inhalt	Seite
Einleitung	7
1 Anwendungsbereich	9
2 Normative Verweisungen	9
3 Begriffe	9
4 Symbole und Abkürzungen	10
5 Bilanzgrenzen und Berechnungsschritte	13
6 Definitionen	14
6.1 Energiebedarf / Energieversorgungsziel	14
6.2 Energieversorgungssystem	14
6.3 Vorkette.....	14
6.4 Energiesystem	15
6.5 Exergie von Energieflüssen	15
6.6 Abwärme und Koppelproduktion	16
6.7 Ressourcenexergie	16
6.8 Ressourcenexergieverbrauch	17
6.9 Ressourcenexergiefaktor.....	18
6.10 Nutzexergiebedarf.....	19
6.11 Ressourcenexergieeffizienz.....	20
7 Bilanzgrenzen	20
8 Berechnungsgrundlagen für Energiesysteme	22
8.1 Grundlegende Gleichungen.....	22
8.2 Ressourcenexergieverbrauch	24
8.3 Ressourcenexergiefaktor.....	25
8.4 Nutzexergiebedarf.....	26
8.5 Ressourcenexergieeffizienz.....	27
9 Erläuterungen zu Berechnungsannahmen	29
9.1 Gewichtungsfaktoren der Vorkette.....	29
9.2 Netzstrom.....	30
9.3 Ökostrom	30
9.4 Eigenstrom.....	30
9.5 Kernkraft.....	30
9.6 Abwärme und Koppelproduktion	31
9.7 Nutzungsgrade und Effizienzen.....	31
9.8 Temperaturen für die Berechnung von Exergie	32
9.9 Vergleichbarkeit	32

10	Vereinfachungen	33
10.1	Hintergrund.....	33
10.2	Allgemein.....	34
10.3	Energiequalität	35
10.4	Verwendung des KEA und des KEV in der REA.....	35
10.4.1	Brennstoffe und Strom	36
10.4.2	Thermische Energie.....	37
10.5	Exergieeffizienz	37
11	Ressourcenexergieanalyse von Energiesystemen	39
11.1	Allgemein.....	39
11.2	Stromerzeugung.....	39
11.2.1	Allgemein.....	39
11.2.2	Brennstoffe	40
11.2.3	Solarstrahlung, Strömungen und Windkraft	41
11.3	Wärmeerzeugung	42
11.3.1	Allgemein.....	42
11.3.2	Heizkessel	42
11.3.3	Wärmetauscher mit Abwärme, Solarthermie oder Geothermie.....	44
11.3.4	Wärmepumpen.....	45
11.4	Kälteerzeugung.....	47
11.4.1	Direkte Kühlung	48
11.4.2	Kältemaschinen	49
11.4.3	Tiefkühlanlagen.....	51
11.5	Synthetische Brennstoffe	53
11.6	Koppelproduktion	54
11.6.1	Allgemein.....	54
11.6.2	Kraft-Wärme-Kopplung.....	54
11.6.3	Wärme-Kälte-Kopplung.....	57
11.7	Universelle Gleichungen	61
	Tabellen	64
	Abbildungen	65
	Literaturverzeichnis	67
	Anhang A Gewichtungsfaktoren	69
A.1	Allgemeines	69
A.2	Anpassungen von Gewichtungsfaktoren an REA.....	70
A.3	LCA-basierte Standard-Gewichtungsfaktoren	71

Anhang B	Beispielanalyse eines einfachen Energiesystems mit REA (Referenzbeispiel)	79
B.1	Berechnungsannahmen und Formelzeichen für das Referenzbeispiel	79
B.2	Berechnungsannahmen und Formelzeichen für das Referenzbeispiel	80
B.3	Carnotfaktor des Wärmebedarfs	81
B.4	Nutzexergiebedarf des Versorgungsziels	82
B.5	Wärme aus einem individuellen Erdgaskessel (R1)	82
B.6	Kälte aus einer individuellen Kältemaschine (R2)	83
B.7	Stromverbrauch aus dem Netz	83
B.8	Gesamtsystem	84
Anhang C	Beispielanalyse eines komplexen Energiesystems mit REA (Komplexbeispiel)	86
C.1	Berechnungsannahmen und Formelzeichen für das Komplexbeispiel	87
C.2	Carnotfaktoren für das Energiesystem	90
C.2.1	Carnotfaktor des Bedarfs	90
C.2.2	Carnotfaktor der Fernwärmeversorgung frei Wärmeerzeuger	90
C.2.3	Carnotfaktor der Wärme aus Tiefengeothermie KWK (A3)	91
C.2.4	Carnotfaktor der Fernkälte	91
C.3	Nutzexergiebedarf des Versorgungsziels	92
C.4	Fernwärme aus einem Kessel mit grünem Wasserstoff aus Windkraft (A1)	93
C.5	Fernwärme aus industrieller Abwärme (A2)	93
C.6	Fernwärme aus Tiefengeothermie Kraft-Wärme-Kopplung (A3)	94
C.6.1	Wärme	94
C.6.2	Strom	95
C.7	Fernwärme und Fernkälte aus einer Großwärmepumpe mit Wärme-Kälte-Kopplung und Strom aus Photovoltaik (A4)	97
C.7.1	Allgemein	97
C.7.2	Kälteentzug, als Grundlage für die Allokation	97
C.7.3	Wärme	98
C.7.4	Kälte	98
C.8	Fernkälte aus direkter Kühlung mit Flusswasser (A5)	99
C.9	Hilfsstrom des Erzeugerparks (A6)	100
C.10	Stromverbrauch aus dem Stromnetz (17)	101
C.11	Gesamtsystem des Komplexbeispiels	102
C.11.1	Wärme	102
C.11.2	Kälte	102
C.11.3	Strom	103
C.11.4	Gesamt	103
Anhang D	Vergleich von Versorgungs- und Energiesystemen mit der REA	105

D.1	Allgemeines	105
D.2	Vergleich von Energiesystemen mit der REA.....	105
D.3	Wärme	106
D.4	Kälte.....	106
D.5	Strom.....	107
D.6	Auswertung.....	108
Anhang E Herleitungen.....		110

Einleitung

Das zeitnahe Erreichen von Klimaneutralität ist das zentrale Ziel der Energiewende. Eine realistische und zielführende Bewertung von Energiesystemen ist dafür eine wichtige Grundlage.

Mit zunehmender Nutzung nicht-fossiler Quellen werden Probleme mit bestehenden Bewertungssystemen für Energieprodukte und Energieverbraucher relevanter. Zu nennen sind dabei insbesondere die Folgenden:

1. Nicht-erneuerbare Primärenergiefaktoren, berücksichtigen die Klimawirksamkeit nicht angemessen. So werden z. B. Erdgas und Steinkohle gleich bewertet. Weiterhin erlauben Sie keine Differenzierung von erneuerbaren Energieversorgungssystemen.
2. Gesamtprimärenergiefaktoren sind für die Bewertung der Gesamteffizienz meist nicht geeignet. Energie aus Solarthermie, Abwärme, Photovoltaik und Erdgas werden annähernd gleich bewertet.
3. Treibhausgasemissionsfaktoren können keinen Beitrag leisten, um das „Efficiency-first“ Prinzip wirksam für treibhausgasarme Energiesysteme umzusetzen. So würde, trotz wesentlich größerer Ineffizienz, die Verbrennung grünen Wasserstoffs in Kesseln der Nutzung von grünem Strom in Wärmepumpen nahezu gleichgestellt.
4. Die Energiequellenkennzahl „Anteil erneuerbarer Energien“ ist in einigen Fällen irreführend. Auch Systeme mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien können wesentlich zu ökologischen Schäden beitragen, z. B. bei Nutzung von Palmöl aus ehemaligen Regenwaldgebieten.

Eine fundierte Lösung dieser Probleme ist die Kombination zweier, unabhängiger, realitätsnaher Indikatoren.

Die häufig verwendeten nicht-erneuerbaren Primärenergiefaktoren können durch realistische Treibhausgasemissionsfaktoren ersetzt werden. Diese erlauben allerdings nur eine Einschätzung der direkten Emissionen.

Die ganzheitliche Umsetzung des „Efficiency-first“ Prinzips wird erst durch eine zusätzliche Bewertung des Ressourcenexergieverbrauchs möglich. Die physikalische Größe Exergie in Kombination mit geeigneten Bilanzgrenzen bietet dafür eine optimale Grundlage.

Überdies führt ein reduzierter Ressourcenexergieverbrauch zu verringerten indirekten Treibhausgasemissionen. Dieser Effekt entsteht durch die verbrauchsorientierte Versorgung, welche üblicherweise von Energiesystemen erwartet wird. Denn wenn Verbrauch immer gedeckt werden muss und treibhausgasneutrale Quellen stets maximal genutzt werden, dann führt jede Verschwendung an Energieressourcen zu einem erhöhten Einsatz fossiler Rohstoffe. Das wiederum erzeugt indirekte Treibhausgasemissionen aufgrund von Ressourcenverschwendung.

Dieser Berechnungsleitfaden ist die Dokumentation und Erweiterung der Ressourcenexergieanalyse (REA), welche seit 2010 bereits in diversen Forschungs- und Praxisprojekten erfolgreich angewendet wurde.

Die REA erlaubt es Ressourcenexergieverbräuche einfach und physikalisch fundiert zu bestimmen und so Ressourcenverschwendung und indirekte Treibhausgasemissionen zu minimieren.

Darüber hinaus bietet die REA die Möglichkeit Wärme, Kälte und Strom mithilfe von Ressourcenexerriefaktoren zu charakterisieren.

Zusammen mit der Treibhausgasemissionsanalyse stellt die REA eine fortschrittliche Alternative zur etablierten Primärenergiebewertung, dar.

Dieser Berechnungsleitfaden baut auf der Nomenklatur und den Konventionen der Arbeitsblattreihe AGFW FW 309 „Energetische Bewertung von Fernwärme und Fernkälte“ auf.

Der Berechnungsleitfaden geht über den Anwendungsbereich der AGFW FW 309 hinaus, in dem er auch die Grundlagen für die Bewertung von Nicht-Fernwärmesystemen legt. Damit soll ein widerspruchsfreier Vergleich aller Technologiekombinationen, die mit Fernwärme, Fernkälte und gekoppelter Stromproduktion in Wettbewerb stehen, in Hinblick auf Effizienz und Ressourcenschonung ermöglicht werden.

1 Anwendungsbereich

Dieser Berechnungsleitfaden gilt für die Anwendung auf Prozesse, deren Funktion es ist, einen oder mehrere energetische Bedarfe zu decken.

Systeme, welche als primäre Produkte Stoffströme bereitstellen, fallen nicht in den Anwendungsbereich dieses Berechnungsleitfadens.

Dieser Berechnungsleitfaden gilt für die Bestimmung von Ressourcenexerriefaktoren (REFs), Ressourcenexerriefverbräuchen (REVs) und Ressourcenexerriefeffizienzen (REEs) von Strom-, Wärme- und Kälteversorgungssystemen.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

AGFW FW 309-6 „Energetische Bewertung von Fernwärme und Fernkälte – Emissionsfaktoren nach Arbeitswert- und Carnotmethode“

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

3.1 Allokationsfaktor

α

Kennzahl zwischen 0 und 1, die die Produktanteile an den Eingangs- oder Ausgangsströmen der einer Koppelproduktion beschreibt.

3.2 Gewichtungsfaktor

f_{we}

Ressourcenexerriefaktor, Primärenerriefaktor oder Emissionsfaktor

Anmerkung 1 zum Begriff: In DIN EN ISO 52000-1:2018 ist der Gewichtungsfaktor ein Oberbegriff für Primärenerriefaktor, Emissionsfaktor, Kostenfaktor und sonstige zusätzliche Faktoren zur Gewichtung von Energiemengen. [1]

Anmerkung 2 zum Begriff: In diesem Berechnungsleitfaden wird er vorrangig für den Ressourcenexerriefaktor verwendet.

3.3 Nutzungsgrad

η

Faktor, welcher den nutzbaren Anteil eines Energieaufwandes beschreibt

Anmerkung 1 zum Begriff: Basis der Betrachtung sind Energiemengen, wobei der Nutzungsgrad selbst einheitenlos ist (Nutzen bezogen auf Aufwand). Prozesse sind die Übergabe/Regelung, die Verteilung, die Speicherung sowie die Erzeugung von Energiemengen. [2]

3.4 Abwärme

Wärme, die in einem Prozess entsteht, dessen Hauptziel die Erzeugung eines Produktes oder die Erbringung einer Dienstleistung (inkl. Abfallentsorgung) ist

Beispiele: Raffinerien, Stahlproduktion und -verarbeitung, chemische Industrie, Rechenzentren, Elektrolyseure, Wäschereien, Kühllhäuser, Entsorgungssysteme (z. B. Thermische Abfallbehandlung, Abwasser) [1]

3.5 Vorkette

Aufwendungen zur Gewinnung, Aufbereitung, Umwandlung und Transport vom Ort der Gewinnung direkt speicherbarer Primärenergie bis zur Grenze des betrachteten Systems

4 Symbole und Abkürzungen

Tabelle 1 - Symbole

Symbol	Größe	Einheit
α	Allokationsfaktor	-
γ	Arbeitszahl, energetisch	-
Δ	Differenz	-
W	Elektrische Energie	J, Wh
E	Energie allgemein	J, Wh
X	Exergie allgemein	J, Wh
f	Faktor	-
ϕ	Anteil (Energie)	
η	Nutzungsgrad, energetisch oder Energieeffizienz	-
ξ	Nutzungsgrad, exergetisch oder Exergieeffizienz	-

Symbol	Größe	Einheit
Σ	Summe	-
Q	Thermische Energie	J, Wh
T	Thermodynamische Temperatur	K
ω	Anteil (Strom)	

Tabelle 2 – Indizes

Index	Benennung
0	Referenzzustand für Exergieberechnungen
a	Luft (en: air)
aux	Hilfs- (en: auxiliary)
avg	Durchschnitt (en: average)
C	Carnot
cd	Kältelieferung (en: cooling delivery)
CED	Kumulierter Energieaufwand (en: cumulated energy demand)
CExD	Kumulierter Exergieaufwand (en: cumulated exergy demand)
ch	Kältemaschine (en: chiller)
CO ₂ eq	Kohlendioxidäquivalent
com	Komplex (en: complex)
d	Bedarf (en: demand)
dc	Tiefkühlung (en: deep cooling)
dr	Antriebs- (en: driving)
ds	Direkt speicherbar
e	Außen- (en: external)
el	Elektrisch
f	Brennstoff-bezogen (en: fuel-related)
fin	Endenergie-bezogen (en: related to final energy)
hd	Wärmelieferung (en: heat delivery)
HHV	Brennwert (en: higher heating value)
in	Zugeführt (en: inlet)
l	Verluste (en: losses)
LHV	Heizwert (en: lower heating value)
max	Maximal

Index	Benennung
min	Minimal
mn	Mittlere (en: mean)
nren	Nicht-erneuerbar (en: non-renewable)
ns	Nicht-speicherbar
nt	Nicht-thermisch
out	Abgegeben
P	Primärenergie
pc	Phasenwechsel (en: phase change)
pm	Strommix (en: power mix)
pr	Erzeugt, produziert
R	Ressourcen
ref	Referenz
rf	Rücklauf (en: return flow)
s	Speicher
sf	Vorlauf (en: supply flow)
syf	Synthetischer Kraftstoff (en: synthetic fuel)
t	Transport
T0	bei Referenztemperatur
tg	Ziel- (en: target)
th	Thermisch
ts	Thermische Quellen (en: thermal sources)
wi	Wind
y	Index, Zählvariable ohne festen Bezug zur gezählten Einheit
z	Index, Zählvariable ohne festen Bezug zur gezählten Einheit

Tabelle 3 – Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
CEENE	Kumulierte Exergieentnahme aus natürlichen Umgebungen (en: cumulated exergy extraction from the natural environment)
CExC	Kumulierter Exergieverbrauch (en: cumulated exergy consumption)
CExD	Kumulierter Exergiebedarf (en: cumulated exergy demand)
FW	Fernwärme
HHV	Brennwert (en: higher heating value)
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KEV	Kumulierter Energieverbrauch
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LCA	Lebenszyklusanalyse (en: life cycle analysis)
LHV	Heizwert (en: lower heating value)
REA	Ressourcenexergieanalyse
NEB	Nutzexergiebedarf
RE	Ressourcenexergie
REE	Ressourcenexergieeffizienz
REF	Ressourcenexergiefaktor
REV	Ressourcenexergieverbrauch
THG	Treibhausgas
WKK	Wärme-Kälte-Kopplung

5 Bilanzgrenzen und Berechnungsschritte

Die Bilanzgrenze wird durch Messgeräte festgelegt. Stromzähler, die die Bilanzgrenze definieren, müssen nicht Übergabezähler zum Stromnetz der öffentlichen Versorgung sein. Eine visuelle Darstellung der Bilanzgrenzen findet sich in Bild 1 in Kapitel 7.

Benachbarte Energieversorgungssysteme für thermische Energie dürfen nur dann als ein einziges Energieversorgungssystem bewertet werden, wenn zwischen allen Systemkomponenten eine thermische Verbindung besteht, z. B. durch das Wärmeträgermedium selbst oder Bauteile wie Wärmeübertrager.

Thermisch verbundene Energieversorgungssysteme dürfen nur dann in eigenständige Teilsysteme aufgeteilt und einzeln bewertet werden, wenn die Energie an der Bilanzgrenze mit einem Messgerät vollständig erfasst wird.

Alle im Folgenden dargestellten Bewertungsmethoden sind unabhängig vom gewählten Berechnungszeitschritt anwendbar und benötigen als Eingangsdaten die Energieflüsse, die die Bilanzgrenze überschreiten, und deren Gewichtungsfaktoren. Es wird davon ausgegangen, dass die für die Berechnung relevanten Daten sich im betrachteten Zeitschritt nicht ändern. D. h. für den betrachteten Zeitschritt wird von einem stationären Prozess ausgegangen.

Zur Berechnung von Jahres-Gewichtungsfaktoren müssen die Eingangsdaten einen zusammenhängenden Zeitraum von mindestens einem vollständigen Jahr umfassen.

Neue und bestehende Energieversorgungssysteme, die umgebaut wurden oder umgebaut werden sollen und noch nicht entsprechend den künftigen Bedingungen betrieben werden, dürfen auch unter Verwendung von Planungsdaten bewertet werden.

6 Definitionen

6.1 Energiebedarf / Energieversorgungsziel

Der Energiebedarf bezeichnet die Menge an eingesetzter Energie, welche ohne weitere Energieverluste zur Deckung eines bestehenden Bedarfs verwendet wird. Das Objekt, welches den Energiebedarf festlegt, ist das Energieversorgungsziel, z. B. ein Haus, ein Quartier oder eine Gemeinde.

6.2 Energieversorgungssystem

Ein Energieversorgungssystem stellt auf Basis von einem oder mehreren Eingangsströmen durch Transport und ggf. Umwandlung Nutzenergie bereit, die einen oder mehrere Energiebedarfe deckt. Ein Energieversorgungssystem kann dabei eine einzelne technische Anlage oder eine Kombination von technischen Anlagen sein.

6.3 Vorkette

Als Vorkette werden alle Prozessschritte zusammengefasst, welche die Bereitstellung der im Energieversorgungssystem eingesetzten ersten direkt speicherbaren Energieströme ermöglichen.

Für Brennstoffe beinhaltet sie die Aufwendungen für Extraktion, Speicherung und Transport. Aufwendungen für den Bau von Kraftwerken müssen für Brennstoff- und Stromnutzende Energiewandler nicht berücksichtigt werden. Die zu erwartenden Änderungen durch die Berücksichtigung von Infrastruktur für Brennstoffnutzende Systeme liegen maximal im Bereich der Variation der Gewichtungsfaktoren für die Brennstoffe und sind somit als grundsätzlich vernachlässigbar anzusehen [3].

Bei Stromerzeugung aus volatilen Quellen und der Nutzung von Geothermie und Solarthermie, sind die Aufwendungen für den Bau der entsprechenden Energiewandlungsanlagen berücksichtigt, da diese nicht direkt speicherbare Energie in direkt speicherbare umwandeln.

Nur bei der Verwendung von unvermeidbaren Abfällen und Abwärme wird den Gewichtungsfaktoren der Energieströme kein Anteil an der Vorkette zugeschlagen.

6.4 Energiesystem

Als Energiesystem wird eine Prozesskette bezeichnet, welche aus Energieversorgungsziel, Energieversorgungssystem und den damit verbundenen Vorketten besteht.

6.5 Exergie von Energieflüssen

Die mit einem Energiefluss verbundene Exergie ist die maximale Arbeit, die durch die Anwendung eines idealen thermodynamischen Prozesses erzielt werden kann, um den Strom mit einer klar definierten Referenzumgebung ins Gleichgewicht zu bringen [4].

Die thermodynamischen Eigenschaften der Referenzumgebung wie Temperatur, Druck und chemische Zusammensetzung spiegeln Eigenschaften der Umgebung, die sich beim Austausch von Energie oder Masse mit dem betrachteten Energie- oder Stofffluss nicht messbar ändern.

Zum besseren Verständnis kann die physikalische Zustandsgröße Exergie als ein Produkt aus Energie und „Energiequalität“ beschrieben werden [5].

Alle nicht-thermischen Energieträger wie Brennstoffe oder Elektrizität haben eine Energiequalität von 100 %¹, was bedeutet, dass sie theoretisch vollständig in Elektrizität oder Arbeit umgewandelt werden können.

Thermische Energieflüsse haben eine Energiequalität, die unter 100 % liegt. Bei Wärmeströmen oberhalb der Umgebungstemperatur (Referenztemperatur) bedeutet eine höhere Temperatur eine höhere Energiequalität. Für Wärmeströme unterhalb der Referenztemperatur bedeutet eine niedrigere Temperatur eine höhere Energiequalität [5].

Exergie ist eine Eigenschaft des Systems von Referenzumgebung und des betrachteten Energieflusses. Damit ist sie keine Eigenschaft, die ausschließlich von den betrachteten Energieflüssen abhängt, sondern sie wird mit diesen verknüpft [5].

¹ Bei Brennstoffen ist das Verhältnis von Exergie und Brennwert häufig nicht genau 100 %. Genau genommen muss die tatsächlich nutzbare Energie eines Stoffflusses über die Transformationsenergie [2] bestimmt werden. Darauf wird jedoch im Rahmen der praktischen REA aus Gründen der Vereinfachung und aufgrund der verhältnismäßig großen Unsicherheit bei den Gewichtungsfaktoren verzichtet.

Vereinfacht kann dennoch von Exergie eines Energieflusses gesprochen werden.

Die Exergie von geschlossenen Systemen wird für die Energiesystemanalyse nicht betrachtet. Sie unterscheidet sich von der Exergie von Stoff- und Energieflüssen wie die innere Energie von der Enthalpie.

Für die Energiesystemanalyse kann in den meisten Fällen auf eine Betrachtung der Exergie von Masseströmen verzichtet werden. In diesem Fall werden Brennstoffströme, auf Basis ihrer chemischen oder nuklearen Exergie, vereinfacht als Energieflüsse betrachtet.

6.6 Abwärme und Koppelproduktion

Es existieren unterschiedliche Definitionen von Abwärme. Im Kontext der REA wird die Wärme, die ein technisches System, welches nicht für die Wärmenutzung gedacht ist, an seine Umgebung abgibt. Dabei darf die Abwärmenutzung die Menge und Qualität des Hauptprodukts nicht reduzieren. Bei der Nutzung von Abwärme werden keine Vorkettenverluste berücksichtigt.

Technische Systeme, die optimiert wurden, um Wärme zusammen mit anderen Produkten bereitzustellen, werden für die REA als Systeme der Koppelproduktion angesehen. Die Wärme aus solchen Systemen ist unterschiedlich von Abwärme zu bewerten, da angemessene Teile der Verluste des Gesamtsystems der Vorkette der Wärmeerzeugung zugeschlagen werden.

6.7 Ressourcenexergie

Unter einer Ressource wird im allgemeinen Sprachgebrauch ein natürlich vorhandener Bestand von etwas verstanden, der für einen bestimmten Zweck, besonders zur Ernährung der Menschen und zur wirtschaftlichen Produktion, [ständig] benötigt wird [6]. Ressourcenexergie (RE) ist die mit diesem Bestand verknüpfte Exergie.

Als Eingangsströme an RE werden nur Energieflüsse berücksichtigt, welche ohne weitere Wandlung oder Übertragung in der vorliegenden Form direkt speicherbar sind. Ressourcen können in der betrachteten Form einen Bestand bilden.

Energieflüsse, die für das globale technische Energiesystem verloren sind, wenn sie nicht direkt genutzt werden, wie solare Strahlung, kinetische Energie von Wind- und Wasserströmungen sowie Wärme aus Geothermie und Abwärme, stellen keinen Bestand dar und sind daher auch nicht als Ressourcen anzusehen.

In diesen Fällen, in denen die Primärenergie nicht ohne Umwandlung oder Übertragung an ein technisches System speicherbar ist, ist die erste direkt, ohne Wandlung und Übertragung speicherbare Sekundärenergie als Ressource anzusehen.

Das bedeutet, dass bei der Stromerzeugung aus solarer Strahlung oder aus kinetischer Energie von Wind und Laufwasser, der erzeugte Strom als Ressource betrachtet wird.

Bei solarthermischen Anlagen wird das damit erzeugte Warmwasser auf einem bestimmten Temperaturniveau als Ressource angesehen.

Die Ressource bei der Strom- und Wärmeerzeugung aus Abwärme und Geothermie, ist die Wärme nach Übertragung an ein technisches System (z. B. einen Wasserkreislauf). Dabei wird Abwärme analog zu Geothermie betrachtet, mit dem Unterschied, dass der Aufwand, um sie an ein technisches System zu übertragen, meist geringer ist. Die Notwendigkeit der Abgabe der Abwärme an die Umgebung, erlaubt es diese bilanziell aus der Umwelt zu entnehmen und macht diese somit zu einer quasi-natürlichen Energiequelle.

Wasser in Stauseen stellt eine künstlich erzeugte Ressource dar, da die Aufstauung von Wasser einen Teil seiner ursprünglichen potenziellen Energie, z. B. Wasser in Gebirgen, bewahrt. Dementsprechend müssen Verluste bei der Wandlung der potenziellen Energie in Strom für die Bestimmung der RE angemessen berücksichtigt werden.

Somit stellen natürliche Brennstoffe die einzigen in der Natur vorkommenden Ressourcen für das Energiesystem dar, da sie ohne Übertragung an ein technisches System in der vorliegenden Form direkt speicherbar oder bereits gespeichert sind. Das schließt fossile, biogene und nukleare Brennstoffe mit ein.

Die RE bezeichnet im Kontext der Energiesystemanalyse die Exergie der Energieflüsse, welche der natürlichen Umwelt entnommen werden und direkt ohne Wandlung und Übertragung speicherbar sind, sowie der durch Wandlung oder Übertragung erzeugten Energieflüsse, die direkt speicherbar sind.

6.8 Ressourcenexergieverbrauch

Der Ressourcenexergieverbrauch (REV) ist ein Maß für die Ressourcenexergie, die in einem Energiesystem (z. B. ein Gebäude mit seinen Vorketten) eingesetzt wird. Seine Maßeinheit ist Joule (J) oder Wattstunden (Wh).

REVs beinhalten neben der Exergie der Ressource auch Anteile an REVs, welche durch den Bau und ggf. auch das Recycling der erforderlichen Extraktionsanlagen, Übertrager und Energiewandler verursacht wurden. Die Betrachtung des REVs von Energiewandlungsanlagen ist dabei nur bei Anlagen zwingend notwendig, die nicht direkt speicherbare Energieströme in direkt speicherbare Energieströme wandeln.

Aufgrund der großen Herkunftsunterschiede bei den REVs von Brennstoffen, können die verhältnismäßig geringen Aufwände für die Erstellung von Brennstoffnutzenden Energiewandlungsanlagen meist vernachlässigt werden [3].

Der REV wird auf Basis von Systemeigenschaften, wie Energieeffizienzen, Temperaturen und Energiebedarfen, sowie auf Basis von Daten für die Charakterisierung der Vorketten der eingesetzten Energieflüsse berechnet (z. B. aus Anhang A).

Das vorliegende Dokument zeigt auf, wie der REV für Energieversorgungssysteme berechnet wird.

Ein Vergleich verschiedener Kombinationen von Energieversorgungssystemen und Versorgungszielen auf Basis des REV ermöglicht die bewusste Auswahl ressourcenschonender Gesamtsysteme.

6.9 Ressourcenexergiefaktor

Der Ressourcenexergiefaktor (REF) ist ein Maß für die eingesetzte Ressourcenexergie, um einen betrachteten Energiefluss bereitzustellen. Als Verhältnis von Exergie zu Energie ist er einheitenlos. Der REF lässt sich als Funktion des REV berechnen.

Für Energieflüsse berücksichtigt der REF nicht nur Energiemengen, sondern auch deren Energiequalität.

Während der REV hilft, Energiesysteme zu vergleichen, ist der REF ein Maß für den Vergleich von Versorgungsströmen. In Anhang B bis Anhang D werden die Unterschiede anhand von Beispielen illustriert.

REFs können auf Grundlage verschiedener exergetischer Vorkettenfaktoren bestimmt werden. Letztere werden kontinuierlich weiterentwickelt, sodass grundsätzlich verschiedene Faktoren als Berechnungsgrundlage für REF infrage kommen können, z. B. kumulierter Exergieaufwand (CExD) [7] oder die kumulierte Exergieentnahme aus natürlichen Umgebungen (CEENE) [8]. Dabei ist allerdings zu beachten, dass viele exergetische Charakterisierungsfaktoren wie CExDs oder die CEENEs nicht nur direkt speicherbare Exergie berücksichtigen und somit zumindest teilweise in REFs umgerechnet werden müssen.

Anhang A stellt eine Übersicht bereits auf Basis von CExDs umgerechneter REFs bereit, welche als Grundlage für die REA genutzt werden können. Die dort dargestellten Werte sind streng genommen für Deutschland gültig. Grundsätzlich sind sie jedoch aufgrund der Ähnlichkeit der Versorgungsketten sowie der starken ursprungsabhängigen Unterschiede bei Brennstoff- und anderen REFs international einsetzbar. Davon ausgenommen sind die REFs für Netzstrom.

Länderspezifische CExDs, auf deren Basis REFs berechnet werden, können über Dienstleister [9] aus Lebenszyklusdatenbanken z. B. ecoinvent bezogen werden. Für Netzstrom lässt sich der REF aber auch über den kumulierten Energieverbrauch für den nationalen Strommix abschätzen, da er diesem in etwa entspricht.

Für vereinfachte Berechnungsverfahren ist eine Abschätzung der REFs von in ein Energieversorgungssystem eingehenden Energieflüssen mithilfe exergetischer Vorkettenfaktoren, wie dem kumulierten Energieaufwand (KEA) grundsätzlich möglich. Durch die in Anhang A aufgeführten REF, kann auf diese Vereinfachung im Rahmen der Energiesystemanalyse in den meisten Fällen verzichtet werden.

Prinzipiell kann der REF neben der Bewertung von Energieströmen auch zur Bewertung von nicht energetischen Stoffströmen eingesetzt werden. Dafür sind allerdings detaillierte Auswertungen und ggf. Anpassungen von Lebenszyklusanalysedaten notwendig.

6.10 Nutzexergiebedarf

Für die Berechnung des Nutzexergiebedarfs (NEB) wird die minimal erforderliche Exergiemenge, mit der die Aufgabe theoretisch bewältigt werden könnte, als Bedarf betrachtet. Diese kann auch als Zielexergiemenge bezeichnet werden.

Für nicht-thermische Bedarfe entspricht der Nutzexergiebedarf dem Nutzenergiebedarf. Für Wärmebedarfe ergibt sich der NEB aus dem Nutzenergiebedarf multipliziert mit dem Carnotfaktor (siehe Formel (3)) der entsprechenden Zieltemperatur (z. B. für Raumheizung: 20 °C).

Für Kältebedarfe ergibt sich der NEB aus dem Nutzenergiebedarf multipliziert mit dem Absolutwert des Carnotfaktors der Zieltemperatur des Bedarfs (z. B. für Tiefkühlung: -18 °C).

Für Wärmebedarfe unterhalb der Referenztemperatur und Kältebedarfe oberhalb der Referenztemperatur lässt sich kein Nutzexergiebedarf festlegen, da diese Bedarfe grundsätzlich durch Wärmeübertragung aus der Umwelt gedeckt werden könnten, ohne dass dafür technische Maßnahmen erforderlich sind. Technische Maßnahmen werden in diesen Fällen ergriffen, um den Wärmeaustausch zu beschleunigen.

Der Bezug auf die Zieltemperatur bei der Berechnung von NEB stellt sicher, dass alle auftretenden Exergievernichtungen berücksichtigt und somit keine Verbesserungspotenziale übersehen werden.

Es ist zu beachten, dass alle Bedarfe meist reduziert werden können, da beispielsweise im Falle der Raumwärmerversorgung der eigentliche „Bedarf“ lediglich die thermische Behaglichkeit der Bewohner des umbauten Raumes ist, die auch auf andere Weise als durch die Beheizung des gesamten Wohnraums gedeckt werden könnte.

Für eine realistische thermodynamische Modellierung von Gebäuden, wird der Bedarf durch die Exergie angenähert, die minimal erforderlich ist, um die betrachteten Gebäude auf 20 °C zu halten, und Wasser von einer Kaltwassertemperatur von etwa 10 °C auf ausreichend heißes Wasser von 43 °C zu erwärmen [10].

Der Strombedarf wird für die REA ausgehend auf dem Stromverbrauch des Nutzers zur Deckung seiner Bedürfnisse modelliert (Beleuchtung, Waschen, Unterhaltung etc.). Sowohl die Bedürfnisse als auch die Hilfsmittel zu deren Deckung können jedoch sehr unterschiedlich sein (z. B. Geschirrspüler oder Waschbecken). Damit erlaubt es die REA auch Suffizienz, d. h. Einsparungen durch reduzierte Bedarfe zu berücksichtigen.

6.11 Ressourcenexergieeffizienz

Die Ressourcenexergieeffizienz (REE) kann zur Bewertung des Grades der thermodynamischen Perfektion eines Energieversorgungssystems verwendet werden. Sie drückt aus, wie nahe das betrachtete Energieversorgungssystem inklusive Vorkette an einem idealen, verlustfreien Prozess liegt. Da verlustfreie Systeme in der Realität nicht möglich sind, liegt die REE immer unter 100 %.

REE ist gleich null, für Fälle, in denen ein System einen ohnehin natürlich ablaufenden Prozess, wie die Abkühlung von heißem Wasser oberhalb der Referenztemperatur beschleunigen soll. REE kann nicht negativ werden. Damit kann REE auch theoretisch nur Werte zwischen 0 % und 100 % annehmen.

Die REE wird von den Zieltemperaturen des NEB beeinflusst, ist jedoch keine Funktion der Systemgröße. Sie ist eine zusätzliche Information, die den REV und den REF ergänzen, aber nicht ersetzen kann.

7 Bilanzgrenzen

Jedes Energiesystem besteht aus den drei Teilen Vorkette (B), Energieversorgungssystem (C) und Versorgungsziel (D) (siehe Bild 1). Die Flüsse (1 – 7) stellen Exergieflüsse dar. Die in diesem Dokument beschriebene Ressourcenexergieanalyse (REA) zielt darauf ab, aus der Kenntnis des bedarfsdeckenden Ausgangsflusses 4 und verschiedener Daten zu den Systemteilen (B-D) den REV von Eingangsfluss 1 und davon abgeleitete Größen zu berechnen.

Eingangsfluss 6 kommt nur bei Einsatz von Wärmepumpen vor und stellt einen Wärmefluss aus der Umgebung oder von Abwärme dar. Ausgangsfluss 7 kommt nur im Falle von Koppelproduktion vor. Für den Fall, dass Ausgangsfluss 4 ein Wärmefluss ist, ist Ausgangsfluss 7 meist ein elektrischer Fluss.

Im Fall von nicht-thermischen Nutzexergiebedarfen, wie elektrischem Strom, ist das Versorgungsziel der REA das Ende der Zuleitung zum Verbraucher.

Bei thermischen Nutzexergiebedarfen ist das Versorgungsziel ein Raum oder Objekt, welches auf einer bestimmten Zieltemperatur gehalten oder auf eine solche gebracht werden soll.

Exergieverluste aus dem Bilanzraum (A) sind nicht dargestellt.

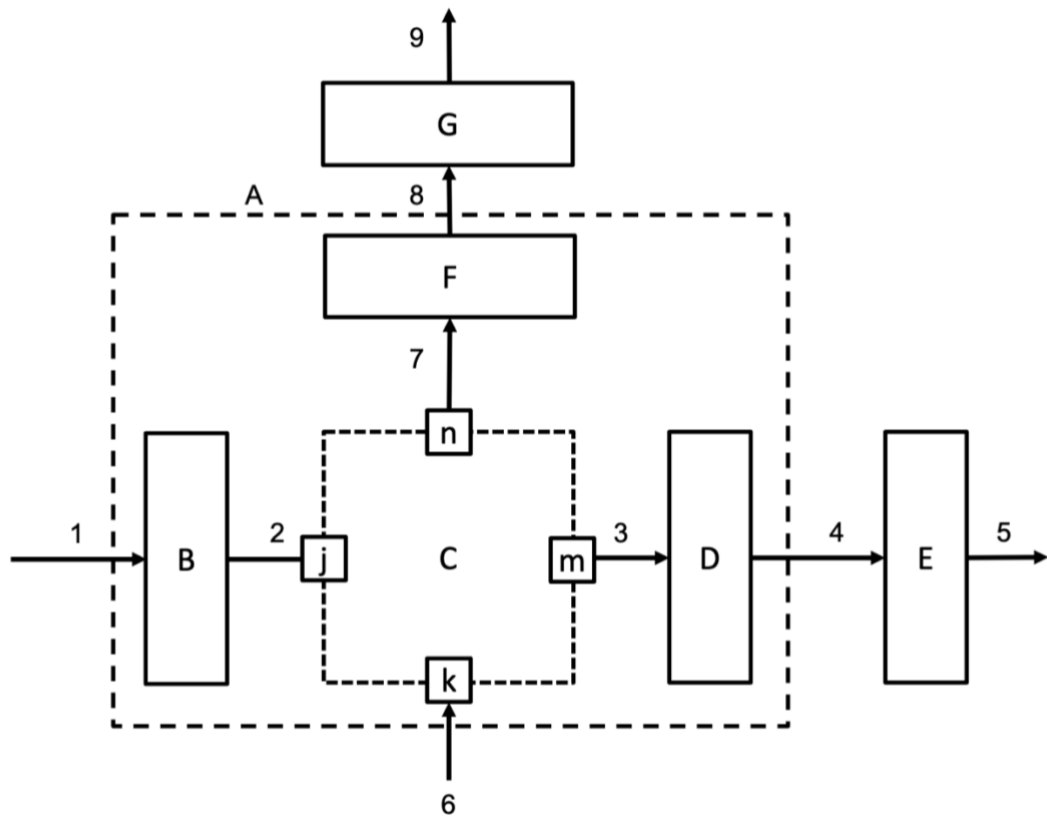


Bild 1 – Bilanzgrenze der Ressourcenexergieanalyse

Legende

A	Bilanzgrenze	1	Ressourcenexergieverbrauch
B	Vorkette (Förderung, Transport, Verluste)	2	Exergiezufuhr an C
C	Energieversorgungssystem (z. B. Kessel)	3	Exergiezufuhr an D
D	Versorgungsziel (z. B. Gebäudevolumen)	4	Nutzexergiebedarf (für Wärmeströme: bei Zieltemperatur)
E	Grenze zur Umwelt (z. B. Wand)	5	Exergieverluste vom Versorgungsziel an die Umgebung
F	Versorgungsziel für ein Koppelprodukt (z. B. Kühlraum)	6	Thermische Exergiezufuhr aus der Umgebung (nur bei einigen Wärmepumpen und Kältemaschinen)
G	Grenze zur Umwelt (z. B. Wand)	7	Exergieabgabe durch ein Koppelprodukt (nur bei Koppelproduktion)
j, k	Messgeräte für den Eingang in C	8	Nutzexergiebedarf, der mit dem Koppelprodukt gedeckt wird
m, n	Messgeräte für den Ausgang aus C	9	Exergieverlust an die Umgebung

Das Energieversorgungssystem (Element C in Bild 1) wird als Blackbox betrachtet, welches über die

Schnittstellen, d. h. Flüsse 2, 3, 6 und 7 charakterisiert wird. Es kann für die Wärmeversorgung aus einer einzelnen individuellen Heizungsanlage bestehen oder einer Kombination von diversen Energiewandlungsanlagen, wie Wärmepumpen, KWK-Anlagen und Abwärmenutzung sowie einem Fernwärmenetz. Ausführliche Beispiele für Energieversorgungssysteme finden sich in Anhang B und Anhang C.

Die Berechnung des REV (Fluss 1 in Bild 1) benötigt als Eingangsdaten nur die Exergieflüsse, die in das Versorgungssystem eingehen und deren Gewichtungsfaktoren zur Charakterisierung der Vorkette (Komponente B in Bild 1). Sind entsprechende Prozessdaten, wie Effizienzen etc. bekannt, kann die Messung an einer einzigen Messstelle (Element j oder m in Bild 1) genügen, um den REV (Fluss 1 in Bild 1) zu bestimmen.

8 Berechnungsgrundlagen für Energiesysteme

8.1 Grundlegende Gleichungen

Viele der folgenden Gleichungen sind bereits in anderen Publikationen vorgeschlagen und beschrieben worden [5], [11]. Sie sind hier zum Zwecke der Verwendung für die Ressourcenexergieanalyse zusammengefasst und in entsprechender Nomenklatur dargestellt.

Die Basis für die Bestimmung der Exergie von Wärmeströmen ist der Carnot-Kreisprozess. Der Carnot-Kreisprozess ist ein thermodynamisch ideales Verfahren zur Erzeugung von Arbeit aus Wärme. Er arbeitet zwischen zwei Wärmereservoirs mit konstanter Temperatur.

Für die Wärmeübertragung bei wechselnder Temperatur bleibt der Carnot-Kreisprozess anwendbar, wenn mit der durchschnittlichen thermodynamischen Temperatur der Wärmeübertragung gerechnet wird. Sie ermöglicht es, den Wärmeübergang bei wechselnder Temperatur wie den Wärmeübergang bei konstanter Temperatur zu betrachten. Im Folgenden ist eine Formel angegeben, welche für inkompressible Medien ohne Phasenwechsel gültig ist².

$$T_{mn} = \frac{T_{sf} - T_{rf}}{\ln\left(\frac{T_{sf}}{T_{rf}}\right)} \quad (1)$$

Dabei ist

T_{mn} Mitteltemperatur der Wärmeübertragung in Kelvin [K]

T_{sf} Vorlauftemperatur aus dem Wärmeübertrager auf der Seite des Wärme- oder Kälteverteilsystems in Kelvin [K]

² Allgemeinere Formeln für die thermodynamische Mitteltemperatur finden sich in [11].

T_{rf} Rücklauf­temperatur in den Wärmeüber­trager auf der Seite des Wärme- oder Kältever­teilsystems in Kelvin [K]

Die Referenztemperatur für die Ermittlung der Exergie von Wärmeströmen entspricht für die meisten Energiesysteme an Land der durchschnittlichen Luftaußentemperatur in Kelvin [K].

$$T_0 = T_{a,e,avg} \quad (2)$$

Dabei ist

T_0 Referenztemperatur zur Exergieberechnung

$T_{a,e,avg}$ Durchschnittliche Luftaußentemperatur in Kelvin [K]

Die Mitteltemperatur der Wärmeübertragung und die Referenztemperatur sind die Grundlage zur Berechnung des Carnotfaktors, einer Schlüsselgröße für die exergetische Bewertung von Wärmeströmen.

$$f_c = 1 - \frac{T_0}{T_{mn}} \quad (3)$$

Dabei ist

f_c Carnotfaktor

T_0 Referenztemperatur zur Exergieberechnung in Kelvin [K]

T_{mn} Mitteltemperatur der Wärmeübertragung in Kelvin [K]

Auf Basis des Carnotfaktors wird der mit einem Wärmestrom verknüpfte Exergiefluss – vereinfacht bezeichnet als: Exergie des Wärmestroms – berechnet.

$$X_{th} = Q \cdot f_c \quad (4)$$

Dabei ist

X_{th} Exergie des Wärmestroms

Q Energie des Wärmestroms

f_c Carnotfaktor

Bei einem Wärmestrom unterhalb der Luftaußentemperatur kann Energie erzeugt werden, indem Wärme aus der Umgebung zur Erzeugung von Arbeit genutzt wird. Der Carnotfaktor für diese Wärmeströme ist negativ. Das bedeutet, dass der Exergiefluss die entgegengesetzte Richtung des betrachteten Wärmestroms hat [2]. Das negative Vorzeichen muss in Exergiebilanzen entsprechend

berücksichtigt werden. D. h. wenn in einem Kühlprozess dem Versorgungsziel unterhalb der Außentemperatur Wärme entzogen wird, wird dem Versorgungsziel des Kühlprozesses Exergie hinzugefügt.

Die Menge der Exergie eines Wärmestroms unterhalb der Umgebungstemperatur entspricht dem Absolutwert der entsprechenden Exergie.

Die Exergie eines elektrischen Stroms entspricht der Energie des elektrischen Stroms.

$$X_{el} = E_{el} \quad (5)$$

Dabei ist

X_{el} Exergie des elektrischen Energieflusses

E_{el} Energiemenge des elektrischen Energieflusses

Die mit einem Brennstofffluss verbundene Exergie – vereinfacht als Exergie eines Brennstoffflusses – berechnet sich auf Basis der thermodynamischen Stoffeigenschaften des Brennstoffflusses. Ist keine spezifische Brennstoffexergie bekannt, kann diese über Gleichung (24) näherungsweise bestimmt werden.

8.2 Ressourcenexergieverbrauch

Der Ressourcenexergieverbrauch (REV) eines Energieflusses ist die Summe aller für dessen Bereitstellung eingesetzten direkt speicherbaren Exergieflüsse, die entweder direkt aus der Umwelt bzw. aus Abwärmequellen entnommen oder aus nicht direkt speicherbaren Exergieflüssen erzeugt wurden. So setzt sich etwa der REV eines Wärmestroms aus den zu seiner Erzeugung eingesetzten, direkt speicherbaren Energieflüssen zusammen.

$$X_R = \sum_1^y X_{ds,in,y} \quad (6)$$

Dabei ist

X_R Ressourcenexergieverbrauch eines betrachteten Energieflusses

$X_{ds,in,y}$ Direkt speicherbarer Exergiefluss des Energieflusses y

Der REV kann auch auf Basis von REF der entsprechend betrachteten Energieflüsse berechnet werden.

$$X_R = f_R \cdot E \quad (7)$$

Dabei ist

X_R	Ressourcenexergieverbrauch eines Energieflusses
f_R	Energiebezogener Ressourcenexergiefaktor des betrachteten Energieflusses
E	Energiefluss

Der gesamte REV eines Energiesystems, lässt sich durch die Summe aller zur Bedarfsdeckung eingesetzten Ressourcenexergieflüsse bestimmen. Beispielsweise ergibt sich der REV einer Gebäudeenergieversorgung aus der Summe der REVs der dafür genutzten Wärme- und Kälteflüsse, sowie der elektrischen Energieflüsse. Überdies kann bei Verfügbarkeit entsprechender Daten auch der REV für die Gebäudeherstellung und -entsorgung berücksichtigt werden, um den REV für das gesamte Gebäudesystem zu ermitteln.

$$X_{R,sys} = \sum_1^y X_{R,in,y} \quad (8)$$

Dabei ist

$X_{R,sys}$	Ressourcenexergieverbrauch eines Energiesystems
$X_{R,in,y}$	Ressourcenexergieverbrauch eines eingehenden Energieflusses y

8.3 Ressourcenexergiefaktor

Der Ressourcenexergiefaktor (REF) ist ein Gewichtungsfaktor zur Charakterisierung eines Energieflusses. Er ergibt sich aus dem Verhältnis des REV und der Energiemenge des betrachteten Energieflusses.

Ein dimensionsloser REF lässt sich für jeden Energiefluss bestimmen.

$$f_R = \frac{X_R}{E} \quad (9)$$

Dabei ist

f_R	Ressourcenexergiefaktor des betrachteten Energieflusses
X_R	Ressourcenexergieverbrauch des betrachteten Energieflusses
E	Betrachteter Energiefluss

Wenn mehrere Systeme genutzt werden, um einen Energiefluss bereitzustellen, können auf Grundlage von Gleichung (8) mittlere REFs $f_{R,avg}$ bestimmt werden, in denen die Summe der REVs

eines Energieversorgungssystems oder einer Vorkette auf den betrachteten Energiefluss bezogen wird.

$$f_{R,avg} = \frac{\sum_1^y X_{R,in,y}}{E} \quad (10)$$

Dabei ist

$f_{R,avg}$ Mittlerer Ressourcenexergetorfaktor des betrachteten Energieflusses

$X_{R,in,y}$ Ressourcenexergeterverbrauch des eingehenden Energieflusses y

E Betrachteter Energiefluss

8.4 Nutzexergetiebedarf

Für alle nicht-thermischen Exergetiebedarfe ist der Nutzexergetiebedarf gleich dem Nutzenergetiebedarf. Dies kann z. B. der Stromverbrauch der aktuellen Geräte sein.

$$X_{u,d,el} = P_d \quad (11)$$

Dabei ist

$X_{u,d,el}$ Nutzexergetiebedarf der Stromversorgung

P_d Elektrischer Nutzenergetiebedarf

In dem seltenen Fall, dass Brennstoffe als Nutzenergetie betrachtet werden, kann er durch ihren Brennwert entsprechend Gleichung (21) angenähert werden. Idealerweise werden allerdings noch die Verhältnisse von spezifischer Exergetie zu Brennwert aus Anhang A berücksichtigt.

Der Nutzexergetiebedarf (NEB) von Wärmeströmen wird auf Grundlage der minimal erforderlichen Exergetieflüsse berechnet. Bei Wärmeströmen oberhalb der Referenztemperatur muss die Zieltemperatur für die gewünschte Erwärmung bekannt sein. Im Fall der Raumerwärmung entspricht diese Temperatur der gewünschten Raumtemperatur.

$$X_{u,d,hd} = f_{c,hd,tg} \cdot Q_{d,hd} \quad (12)$$

Dabei ist

$X_{u,d,hd}$ Nutzexergetiebedarf der Wärmeversorgung

$f_{c,hd,tg}$ Carnotfaktor von Wärme mit Zieltemperatur

$Q_{d,hd}$ Wärmebedarf

Bei Wärmeströmen unterhalb der Referenztemperatur muss die theoretisch maximal mögliche Temperatur für die gewünschte Abkühlung bekannt sein. Im Fall der Raumkühlung entspricht diese Temperatur der Zieltemperatur des Raumes.

Für Kühlung auf Temperaturen unterhalb der Referenztemperatur wird der Carnotfaktor negativ. Das negative Vorzeichen des Carnotfaktors muss dabei zwar in Exergiebilanzen Berücksichtigung finden, wird für die Bestimmung des NEB jedoch nicht berücksichtigt³.

$$X_{u,d,cd} = |f_{C,cd,tg}| \cdot Q_{d,cd} \quad (13)$$

Dabei ist

$X_{u,d,cd}$	Nutzexergiebedarf der Kälteversorgung
$f_{C,cd,tg}$	Carnotfaktor von Kälte mit Zieltemperatur
$Q_{d,cd}$	Kältebedarf

8.5 Ressourcenexergieeffizienz

Exergieeffizienz ist das Verhältnis der abgegebenen Exergie zur eingesetzten Exergie. Sie wird auf Basis der Absolutbeträge der entsprechenden Exergieflüsse berechnet.

$$\xi = \frac{|X_{out}|}{|X_{in}|} \quad (14)$$

Dabei ist

ξ	Exergieeffizienz
X_{out}	Exergie der abgegebenen Energieflüsse
X_{in}	Exergie der eingesetzten Energieflüsse

REE ist das Verhältnis der Summe des betrachteten Nutzexergiebedarfs zur Summe des dadurch verursachten REV.

³ Für sehr niedrige Temperaturen unter $\frac{T_0}{2}$ (z.B. - 137 °C) nimmt der Carnotfaktor Werte von unter -1 an. Dies ist allerdings meist nur für industrielle Systeme (z.B. Luftverflüssigung) relevant. Die Energiequalität bleibt dennoch unter 100 %, wie bereits erwähnt. Die genauen Zusammenhänge zwischen Exergie, Energie und Energiequalität sind in [5] dargestellt.

$$\xi_R = \frac{\sum_1^y |X_{u,d,out}|_y}{\sum_1^z |X_{R,in}|_z} \quad (15)$$

Dabei ist

ξ_R	Ressourcenexergieeffizienz
$X_{u,d,out}$	Nutzexergie des Bedarfs
$X_{R,in}$	Ressourcenexergieverbrauch

Wurde ein ausgehender, aber nicht genutzter Exergiefluss von einem technischen Energieversorgungssystem aus anderen Exergieflüssen durch Wandlung erzeugt, stellt er einen Verlust dar und muss nicht in der REE berücksichtigt werden. Wird etwa Abwärme erzeugt und über Kühlanlagen an die Umwelt abgegeben, so ist diese Abwärme kein Produktstrom.

Werden mehrere Produkte in einem Energiesystem gekoppelt erzeugt, so muss die eingesetzte RE vor Beurteilung der REE entsprechend der in Abschnitt 0 dargestellten Regeln auf die erzeugten Produkte aufgeteilt werden.

Ist der REF bekannt, so lässt sich die REE thermischer Bedarfe wie folgt berechnen:

$$\xi_{R,th} = \frac{|f_{C,d}|}{f_{R,avg}} \quad (16)$$

Dabei ist

$\xi_{R,th}$	Ressourcenexergieeffizienz (thermisch)
$f_{C,d}$	Carnotfaktor des Bedarfs
$f_{R,avg}$	Mittlerer Ressourcenexergiefaktor der eingesetzten Energieflüsse

Für elektrische Bedarfe lässt sich die REE berechnen als:

$$\xi_{R,el} = \frac{1}{f_{R,avg}} \quad (17)$$

Dabei ist

$\xi_{R,el}$	Ressourcenexergieeffizienz (elektrisch)
$f_{R,avg}$	Mittlerer Ressourcenexergiefaktor der eingesetzten Energieflüsse

Diese Formel gilt analog auch für die REE der Erzeugung von synthetischen Brennstoffen.

9 Erläuterungen zu Berechnungsannahmen

9.1 Gewichtungsfaktoren der Vorkette

Gewichtungsfaktoren der Vorkette fassen die Aufwände zusammen, welche in der Vorkette anfallen, um die in ein Energieversorgungssystem eingehenden Energieflüsse zu erzeugen.

Der wesentliche Unterschied zwischen REFs und anderen exergetischen Gewichtungsfaktoren liegt darin, dass REF nur direkt speicherbare Exergieflüsse berücksichtigen. Sind keine REF bekannt, so können sie auf Basis anderer Gewichtungsfaktoren abgeschätzt werden.

Dabei sind exergetische Gewichtungsfaktoren der Vorkette besser geeignet als energetische Gewichtungsfaktoren, da sie einerseits die Energiequalität und andererseits auch die Exergie von Materialaufwänden berücksichtigen. Falls möglich, sollten somit exergetische Gewichtungsfaktoren als Grundlage für die Festlegung von REFs verwendet werden.

Die R REFs verschiedener Energieflüsse sind in Anhang A für Deutschland 2022 tabelliert.

Idealerweise werden REFs auf Basis des kumuliertem Exergiebedarfs (CExD) [7] bestimmt. Dieser entspricht dabei dem kumulierten Exergieverbrauch (CExC) [12]. Er kann definiert werden als die Summe aller Exergieflüsse, welche eingesetzt wurden, um einen betrachteten Exergiefluss zu erzeugen. Im CExD sind die thermische, chemische, mechanische und nutzbare nukleare Exergie aller eingesetzten Masseströme, sowie die kinetische, die potenzielle, die elektromagnetische und die thermische Exergie aller eingesetzten Energieflüsse enthalten. Dabei wird allerdings nicht zwischen direkt speicherbarer und nicht direkt speicherbarer Exergie unterschieden.

Ebenso wird häufig Transitexergie als Exergieaufwand berücksichtigt, was eine Korrektur erfordert, da REF keine Transitexergie berücksichtigen. Dabei werden als Transitexergie die Exergieflüsse bezeichnet, die unverändert durch das Energiesystem fließen, wie die chemische Exergie von Wasser⁴. Dementsprechend müssen einige Anpassungen vorgenommen werden, um den CExD für die REA nutzbar zu machen.

Sind keine detaillierten Angaben zu Exergiearten des CExD verfügbar, sollte der REF besser über den KEA (kumulierten Energieaufwand) angenähert werden, da hier Transitexergie definitionsbedingt nicht berücksichtigt wird und somit nur noch eine Korrektur für die Speicherbarkeit und ggf. Verhältnisse von spezifischer Exergie zu Brennwert erforderlich ist.

⁴ Detaillierte, nachvollziehbare Umrechnungen von CExC in der REA finden sich in der dieses Dokument begleitenden Exceltabelle zu LCA Daten [3].

9.2 Netzstrom

Wenn unbekannt ist, aus welcher Quelle verwendeter Strom kommt, so sind REFs der Vorkette für den aktuellen Netzstrommix zur Bewertung anzusetzen. Der Wert für den Netzstrommix wird über den Betrachtungszeitraum der Bewertung gemittelt, d. h. jährliche Mittelwerte für jahres-scharfe Analysen, monatliche Mittelwerte für monatsgenaue Analysen und so weiter.

Verluste im Stromnetz sind in den Gewichtungsfaktoren für den Netzstrom bereits berücksichtigt, es sei denn dies wird in der Beschreibung der Gewichtungsfaktoren explizit ausgeschlossen.

9.3 Ökostrom

Als Ökostrom wird im allgemeinen Strom aus erneuerbaren Energien bezeichnet. Allerdings ist üblicherweise nicht sichergestellt, dass die meist niedrigen REVs des Ökostroms nicht gleichzeitig im allgemeinen Netzmix berücksichtigt werden oder für Verbraucher von Nicht-Ökostrom nicht zu einer vernachlässigten Erhöhung der REFs führen.

Power Purchase Agreements (PPA) von Ökostrom sind nicht ausreichend erforscht, um einen dem Verbrauch entsprechende zusätzliche Erzeugung ressourcenexergieschonenden Stroms zu gewährleisten [13]. Um eine Doppelzählung von Ressourcenexergieersparungen auszuschließen und eine vollständige Zusätzlichkeit der Ressourcenexergieersparungen durch Anlagen mit geringem REF sicherzustellen, wird für die REA daher Ökostrom und auch Strom aus PPA wie Netzstrom betrachtet.

Ökostrom kann für die REA somit nur angenommen werden, wenn Ökostromerzeuger ihren Strom direkt an die Verbraucher liefern, ohne dabei den Strom über das öffentliche Stromnetz zu leiten.

9.4 Eigenstrom

Strom, welcher ohne vorherige Einspeisung in das allgemeine Netz im betrachteten Energiesystem eingesetzt wird, soll für die REA als Eigenstrom bezeichnet werden. Nur Eigenstrom darf für REA mit vom Netzstrom abweichenden Gewichtungsfaktoren charakterisiert werden. Dabei müssen ggf. Verluste im Eigenstromnetz durch Speicherung und Transport mitberücksichtigt werden.

Einige Anlagen erzeugen sowohl Eigenstrom als auch Strom für das öffentliche Netz, z. B. private PV Anlagen. In diesem Fall darf nur der als Eigenstrom genutzte Anteil der Erzeugung mit vom Netz abweichenden Gewichtungsfaktoren charakterisiert werden.

9.5 Kernkraft

Strom und Wärme aus Kernkraft können mit der REA bewertet werden. In Hinblick auf die Berechnungsgleichungen für REVs, REE und REFs werden Kernbrennstoffe analog zu chemischen Brennstoffen behandelt. Einige REFs für Kernbrennstoffe finden sich in Anhang A.

9.6 Abwärme und Koppelproduktion

Im Kontext der REA wird Abwärme als Wärme einer bestimmten Temperatur angesehen, die von technischen Systemen an die Umwelt abgegeben werden muss, damit diese funktionieren können. Dabei ist ein Betrieb des Prozesses ohne Abwärmeerzeugung nicht möglich. Beispiele für Abwärmequellen sind Industrieprozesse, Rechenzentren, aber auch Abwasserkanäle.

Abwärme ist klar von Koppelproduktion abzugrenzen. Koppelproduktion, im Kontext der REA, bezeichnet die Erzeugung mindestens zweier gewünschter Produkte durch einen gemeinsamen Prozess. Dabei wurden Anpassungen vorgenommen, um alle Produkte möglichst nutzbar zu machen. Beispielsweise wird in ein Heizkraftwerk auf eine höhere Temperatur der Wärmeabgabe ausgelegt als ein Kondensationskraftwerk.

Koppelproduktion ist auch daran erkennbar, dass der entsprechende Prozess Wärme auf einem niedrigeren Temperaturniveau abgibt, sollte nur ein Produkt genutzt werden. So wird unter anderem die Temperatur der Wärmeübertragung meist abgesenkt, wenn Heizkraftwerke, die auch in Kraft-Wärme-Kopplung betrieben werden können, im Kondensationsbetrieb laufen.

9.7 Nutzungsgrade und Effizienzen

Grundsätzlich wird immer die mittlere Effizienz über den Betrachtungszeitraum als Berechnungsgröße im Rahmen der REA verwendet. D. h. in einer monatlichen Analyse werden Monatsmittelwerte verwendet und in einer jährlichen Betrachtung Jahresmittelwerte.

Die mittlere Energieeffizienz über den Betrachtungszeitraum wird in diesem Dokument als Nutzungsgrad oder als Effizienz bezeichnet.

Energetische Nutzungsgrade für Brennstoffe für die REA sind grundsätzlich Brennwert-bezogen. Sollen für die Berechnung anderweitig publizierte, tabellierte energetische Nutzungsgrade verwendet werden, so ist davon auszugehen, dass diese sich auf den Heizwert beziehen, soweit nicht explizit anders dargestellt. Bei Verwendung solcher Heizwert-bezogenen Nutzungsgrade im Rahmen der REA müssen die Nutzungsgrade entsprechend umgerechnet werden.

$$\eta = \eta_{HHV} = \eta_{LHV} \cdot \frac{LHV}{HHV} \quad (18)$$

Dabei ist

η_{HHV}	Brennwert-bezogener Nutzungsgrad
η_{LHV}	Heizwert-bezogener Nutzungsgrad
LHV	Heizwert
HHV	Brennwert

9.8 Temperaturen für die Berechnung von Exergie

In diversen Energiesystemen erfordert die REA, Temperaturen als Grundlage der Exergieanalyse festzulegen.

Gelegentlich wird argumentiert, dass innere Prozesstemperaturen genutzt werden müssen. Dies ist jedoch unplausibel, da die mit Wärme verknüpfte Exergie erst nach Abgabe an das Wärmeversorgungssystem von diesem genutzt werden kann. Innere Prozesstemperaturen können hingegen gut von dem wärmeerzeugenden Prozess, z. B. zur Erhöhung von Wirkungsgraden genutzt werden.

Dieser Zusammenhang lässt sich gut am Beispiel eines BHKW mit Abwärmenutzung verdeutlichen. Würde die hohe Temperatur des Abgases direkt in einer ORC Anlage zur zusätzlichen Stromerzeugung genutzt, würde sich die elektrische Effizienz des BHKW-Systems erhöhen. Wird auf eine elektrische Zusatzerzeugung hingegen verzichtet und wird die Wärme mit Exergieverlusten durch Wärmeübertragung an ein Wärmetransportsystem abgegeben, so steht dem Wärmetransportsystem nur die Temperatur nach der Wärmeübertragung zur Verfügung und daher nur die Exergie, die mit dieser Temperatur verknüpft ist.

Daher nutzt die REA die Festlegung, dass für die Bestimmung der Exergie von Wärme stets die Temperaturen nach der Übertragung an das Wärmesystem (z. B. den Heizungskreislauf oder die Fernwärme) genutzt werden sollen. Dies folgt der Logik, dass ein System nur für die Verluste „verantwortlich“ gemacht werden kann, die in ihm selbst auftreten. Dadurch entsteht eine verbesserte Anreizwirkung, Abwärme möglichst exergieeffizient zu nutzen. Überdies wird so, eine Berechnung der RE auf Basis bekannter Temperaturen des Wärmeversorgungssystems möglich⁵.

Als Konsequenz dieser Festlegung werden die Exergieverluste der Wärmeübertragung in Koppelprozessen dem nicht-thermischen Produkt zugeschlagen, welches in nahezu allen Fällen auch der Grund für den Aufbau des Prozesses ist.

9.9 Vergleichbarkeit

Für die REA sind grundsätzlich alle Energiesysteme vergleichbar, welche für den Nutzer eine gleichartige Funktion erfüllen. Dabei können die Bedürfnisse der Nutzer sehr unterschiedlich sein, ohne die Vergleichbarkeit einzuschränken. So erlaubt es die REA unter anderem den REV eines Nutzers in einer Hütte ohne Strom im Wald mit dem eines Nutzers in einem auf 24 °C geheizten Schloss zu vergleichen. Dadurch werden können alle Einflussmöglichkeiten auf den REV, wie Suffizienz, Effizienz und Reduktion, in der REA konsistent berücksichtigt werden.

⁵ Dies ist der Fall, da innere Prozesstemperaturen in einem Koppelprozess häufig nicht bekannt sind, während Vor- und Rücklauftemperaturen der Wärmeversorgung meist gemessen werden.

Vergleichbarkeit bedeutet in diesem Fall, dass eine Berechnung von Ressourcenexergieeinsparungen sinnvoll ist.

Systeme, welche unterschiedliche Funktionen erfüllen, sollten mit der REA nicht verglichen werden, um Einsparungen zu berechnen. Dennoch können grundsätzlich auch diese Ressourcenverbräuche verglichen werden, um z. B. ein besseres Verständnis für Zusammenhänge zu entwickeln, um Einsparbemühungen zu priorisieren oder um über den sinnvollsten Einsatz von begrenzten Ressourcen zu entscheiden. So kann unter anderem der REV für die Bereitstellung von Nahrungsmitteln mit dem REV für die Gebäudeheizung verglichen werden, um Erkenntnisse darüber zu gewinnen, in welchem Bereich Einsparungen den persönlichen REV effektiver senken.

10 Vereinfachungen

10.1 Hintergrund

Eine hilfreiche Vereinfachung in der Kommunikation der Ressourcenexergieanalyse gegenüber Laien besteht darin, das Wort Exergie wegzulassen. Daher kann es sinnvoll sein, von Ressourcenanalyse statt von Ressourcenexergieanalyse und von Ressourcenverbrauch, statt von REV zu sprechen. Der Begriff Exergie sollte jedoch von den Anwendern der REA hinreichend gut verstanden werden, da sonst Fehler bei der Anwendung wahrscheinlicher werden.

Anhang A listet diverse REFs auf. Weiterhin sind weitere REFs für einige Infrastrukturen über die zu diesem Leitfaden gehörende Exceltabelle verfügbar [3]. Ebenso ist es in der Regel schwierig, genaue Exergiedaten zu erhalten, wie z. B. die Werte des kumulierten Exergieverbrauchs für Lieferketten von Materialien und Energie. Das bedeutet, dass genaue Daten für den Exergieverbrauch beim Bau eines Systems und dessen Recycling häufig nicht bekannt sind.

Häufig sind somit die meisten Grundannahmen der REA mit erheblichen Unsicherheiten behaftet, da genaue Daten oft nicht ausreichend zur Verfügung stehen. Die Verwendung gut begründeter Näherungen und Vereinfachungen für eine vereinfachte REA ist notwendig, um die Anwendung der REA auch in Fällen zu ermöglichen, in denen zuverlässige Exergie-Daten fehlen.

Eine vereinfachte REA, die auf Nicht-Exergie-Daten basiert, unterschätzt den REV, da die verbrauchte Materialexergie auf diese Weise nicht berücksichtigt werden kann. Daher sollten, im Falle von Unsicherheiten, alle Vereinfachungen so vorgenommen werden, dass der REV eher über- als unterschätzt wird.

Dennoch kann eine vereinfachte REA viele Vorteile einer auf exergetischen Faktoren basierenden REA bieten, da sie durch physikalisch korrekte Berücksichtigung der Energiequalität bereits wesentlich umfassender ist als eine Primärenergieanalyse.

10.2 Allgemein

Die folgenden beiden Vereinfachungen für die Durchschnittstemperatur sollten nur für vorläufige Schätzungen verwendet werden. Sie sind keine thermodynamischen, sondern arithmetische Näherungen. Für die endgültigen Berechnungen sollte Gleichung (1) verwendet werden.

$$T_{mn} \approx \frac{T_{sf} + T_{rf}}{2} \quad (19)$$

Dabei ist

T_{mn}	Mitteltemperatur der Wärmeübertragung ohne Phasenwechsel in Kelvin [K]
T_{sf}	Vorlauftemperatur aus dem Wärmeübertrager auf der Seite des Wärme- oder Kälteverteilsystems in Kelvin [K]
T_{rf}	Rücklauftemperatur in den Wärmeübertrager auf der Seite des Wärme- oder Kälteverteilsystems in Kelvin [K]

Wird Wärme vorrangig im Zusammenhang mit Phasenwechsel des Mediums übertragen, also Verdampfung, Kondensation, Schmelzen, Einfrieren, kann die Mitteltemperatur über die entsprechende Phasenwechseltemperatur angenähert werden.

$$T_{mn} \approx T_{pc} \quad (20)$$

Dabei ist

T_{mn}	Mitteltemperatur der Wärmeübertragung bei Phasenwechsel in Kelvin [K]
T_{pc}	Temperatur des Phasenwechsels in Kelvin [K]

Die Exergie von Brennstoffen lässt sich über deren Brennwert annähern [11], falls keine Angaben zur jeweils spezifischen Exergie (siehe Anhang A) vorhanden sind.

$$X_f \approx E_{HHV} \quad (21)$$

Dabei ist

X_f	Exergie des Brennstoffs
E_{HHV}	Brennwertenergie des Brennstoffs

Energie von Brennstoffen in Gleichungen zur Bestimmung der Energieeffizienz wird meist über den Heizwert der Brennstoffe bestimmt. Bei der Angabe von Energiemengen von Brennstoffen kann daher davon ausgegangen werden, dass es sich um Heizwert-basierte Werte handelt, es sei denn ein expliziter Brennwert-Bezug wird hergestellt.

$$E_f = E_{LHV} \quad (22)$$

Dabei ist

E_f	Energie des Brennstoffs
E_{LHV}	Heizwertenergie des Brennstoffs

10.3 Energiequalität

Exergie kann als Produkt aus Energie und Energiequalität verstanden werden. Die Energiequalität für alle Arten von Flüssen wurde in [5] hergeleitet.

Bei Energieströmen kann sie vereinfacht als das Verhältnis zwischen Exergie und Energie eines Energiestroms bezeichnet werden. Die Energiequalität kann nie höher als 100 % sein.

Bei nicht thermischen Energieströmen ist die Energiequalität gleich 100 %.

Bei Wärmeströmen ist die Energiequalität geringer als 100 %.

Die Energiequalität von Wärme entspricht dem Carnotfaktor (siehe Gleichung (3)).

Die Energiequalität von Kälte bis maximal $\frac{T_0}{2}$ Temperaturunterschied zur Referenztemperatur T_0 kann mit dem Absolutwert des Carnotfaktors angenähert werden.

Alternativ zu Gleichung (3) kann der Absolutwert des Carnotfaktors auch aus dem Verhältnis von Exergie und Energie bestimmt werden:

$$|f_c| = \frac{|X_{th}|}{E_{th}} \quad (23)$$

Dabei ist

f_c	Carnotfaktor (vereinfachte Energiequalität) des Wärmestroms
X_{th}	Exergie des betrachteten Wärmestroms
E_{th}	Energie des betrachteten Wärmestroms

10.4 Verwendung des KEA und des KEV in der REA

REFs für Energieträger sind in Anhang A aufgeführt und können auf Basis von LCA Daten bestimmt werden (CExD). Falls diese Quellen die nötigen Daten nicht bereitstellen, lässt sich der REV für Energieflüsse und Flüsse von Brennstoffen über die Verwendung von kumulierten Energieverbräuchen (KEV) oder kumulierten Energieaufwänden (KEA) annähern [7]. Diese sind häufig leichter zugänglich (z. B. in kostenfreien nationalen Datenbanken [14]) als CExD-Werte für

die Berechnung von REF, die meist käuflich erworben werden müssen. Die Annäherungen innerhalb einer Analyse dürfen dann jeweils entweder nur den KEV oder die KEA verwenden.

Grundsätzlich sollte dem umfassenderen KEA der Vorzug vor dem KEV gegeben werden, um die Differenz zu den entsprechenden REF zu minimieren. Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass der KEA für die Annäherung verwendet wird. Strom und Brennstoffe sind bei der Annäherung unterschiedlich von thermischen Energieflüssen zu betrachten.

10.4.1 Brennstoffe und Strom

Für elektrischen Strom entspricht die Exergie der Energie.

Für Brennstoffe lässt sich die nicht-chemische Exergie üblicherweise vernachlässigen, sodass auf Basis der Gleichungen (21) und (22) folgende Vereinfachung für die Bestimmung der Brennstoffexergie festgelegt werden kann.

$$X_f \approx E_f \cdot \frac{E_{HHV}}{E_{LHV}} \quad (24)$$

Dabei ist

X_f	Exergie des Brennstoffs
E_f	Energie des Brennstoffs
E_{HHV}	Brennwert des Brennstoffs
E_{LHV}	Heizwert des Brennstoffs

Der REV für Brennstoffe und Strom lässt mithilfe des KEA vereinfacht, wie folgt darstellen:

$$X_{R,nt} \approx E_{ds,nt} \cdot f_{CED} \quad (25)$$

Dabei ist

$X_{R,nt}$	Ressourcenexergieverbrauch des nicht-thermischen Energieflusses
$E_{ds,nt}$	Energie des direkt speicherbaren, nicht-thermischen Energieflusses
f_{CED}	Spezifischer kumulierter Energieaufwand

10.4.2 Thermische Energie

Für direkt speicherbare, thermische Energieflüsse, wie Wärme aus Tiefengeothermie, Solarthermie, und Abwärme ist zu beachten, dass die Exergie des Wärmestroms sich wesentlich von dessen Energie unterscheidet.

Für unvermeidbare Abwärme ist eine Berücksichtigung der Vorketten nicht notwendig, da diese Aufwände alle dem Hauptprozess zugeschlagen werden. Die RE der Abwärme entspricht der Exergie des aus der Abwärme erzeugten direkt speicherbaren Wärmestroms entsprechend Formel (4).

Für andere thermische Quellen ist eine Berücksichtigung der Vorketten (z. B. Bohrungen, Kollektoren) erforderlich. Hier kann für den Fall, dass keine REFs (z. B. in Anhang A) vorhanden sind, eine Abschätzung des REV mithilfe des KEA vorgenommen werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass in dem KEA alle Vorkettenaufwendungen eine Energiequalität von 100 % aufweisen. Für die betrachtete Wärme selbst muss allerdings die spezifische Energie durch die Exergie ersetzt werden.

$$X_{R,th} \approx E_{ds,th} \cdot (f_{CED} - 1 + |f_C|) \quad (26)$$

Dabei ist

$X_{R,th}$	Ressourcenexergieverbrauch des thermischen Energieflusses
$E_{ds,th}$	Energie des direkt speicherbaren, thermischen Energieflusses
f_{CED}	Spezifischer kumulierter Energieaufwand
f_C	Carnotfaktor des thermischen Energieflusses

10.5 Exergieeffizienz

Zur Berechnung der REE müssen häufig mehrere Eingangsströme berücksichtigt werden. Eine vereinfachte Berechnung auf Basis einzelner bekannter Exergieeffizienzen ist dabei meist nicht möglich. Stattdessen müssen die Nutzexergiebedarfe der Summe aller REVs gegenübergestellt werden, entsprechend Gleichung (15).

Gelegentlich ist es hilfreich, neben der REE eines Gesamtsystems auch Exergieeffizienzen von Systemteilen bestimmen zu können. Diese lässt sich vereinfacht mithilfe der entsprechenden Energieeffizienz bestimmen.

Die Exergieeffizienz der Stromerzeugung aus Brennstoffen ohne Koppelproduktion kann wie folgt abgeschätzt werden:

$$\xi_{el,f} \approx \eta_{el,f} \quad (27)$$

Dabei ist

- $\xi_{el,f}$ Exergieeffizienz der ungekoppelten Stromerzeugung aus Brennstoffen
- $\eta_{el,f}$ (Brennwert-bezogene) Energieeffizienz der ungekoppelten Stromerzeugung aus Brennstoffen

Die Exergieeffizienz von Heizkesseln, welche mit Brennstoffen betrieben werden, kann ebenfalls vereinfacht dargestellt werden.

$$\xi_{th,f} \approx \eta_{th,f} \cdot f_{C,d} \quad (28)$$

Dabei ist

- $\xi_{th,f}$ Exergieeffizienz der Wärmeerzeugung mit Heizkesseln aus Brennstoffen
- $\eta_{th,f}$ Brennwert-bezogene Energieeffizienz der Wärmeerzeugung mit Heizkesseln aus Brennstoffen
- $f_{C,th}$ Carnotfaktor der verbrauchten Wärme bei Zieltemperatur

Werden thermische Quellen zur ungekoppelten Stromerzeugung eingesetzt, ist die Exergieeffizienz abhängig vom Carnotfaktor der Wärmequelle.

$$\xi_{el,ts} \approx \frac{\eta_{el,ts}}{f_{C,ts}} \quad (29)$$

Dabei ist

- $\xi_{el,ts}$ Exergieeffizienz der ungekoppelten Stromerzeugung aus thermischen Quellen
- $\eta_{el,ts}$ Energieeffizienz der ungekoppelten Stromerzeugung aus thermischen Quellen
- $f_{C,ts}$ Carnotfaktor der Wärme aus der thermischen Quelle

Wird Wärme ungekoppelt mithilfe eines Wärmeübertragers aus thermischen Quellen erzeugt, so ergibt sich die Exergieeffizienz der Wärmeübertragung vereinfacht zu:

$$\xi_{th,ts} \approx \eta_{th,ts} \cdot \frac{f_{C,d}}{f_{C,ts}} \quad (30)$$

Dabei ist

- $\xi_{th,ts}$ Exergieeffizienz der ungekoppelten Wärmeerzeugung aus thermischen Quellen

$\eta_{th,ts}$	Energieeffizienz der ungekoppelten Wärmerzeugung aus thermischen Quellen
$f_{c,d}$	Carnotfaktor der bereitgestellten Wärme bei Zieltemperatur
$f_{c,ts}$	Carnotfaktor der Wärme aus der thermischen Quelle

Die Exergieeffizienz ist bei Erzeugung von Kühlung oberhalb der Referenztemperatur und bei Erzeugung von Wärme unterhalb der Referenztemperatur gleich null. Diese Prozesse stellen keinen nützlichen Exergiestrom bereit, sondern beschleunigen lediglich den natürlich stattfindenden Wärmeaustausch.

11 Ressourcenexergieanalyse von Energiesystemen

11.1 Allgemein

Im Folgenden sind Formeln für die Berechnung von Ressourcenexergieverbräuchen (REVs) für die Produkte verschiedener Energieversorgungssysteme aufgeführt.

Einige Ressourcenexerriefaktoren (REFs) sind in Anhang A aufgeführt. Weitere REFs können auf Basis von REVs mithilfe der in Abschnitt 8.3 dargestellten Formeln berechnet werden.

Für die Abschnitte 11.2 bis 11.4.4 wird davon ausgegangen, dass jeweils nur ein Produkt aus einer Art von Endenergiestrom erzeugt wird.

Universelle Gleichungen zur Berechnung des REVs von Energiesystemen finden sich in Abschnitt 11.7

11.2 Stromerzeugung

11.2.1 Allgemein

Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über den REV von elektrischen Energieflüssen, welche mithilfe von Stromerzeugern produziert werden.

Netzstrom wird entsprechend den Erläuterungen in Abschnitt 9.2 behandelt. Beispiele für die Berechnung des REV durch Netzstrombezug finden sich in den Anhängen B.7 und C.10.

11.2.2 Brennstoffe

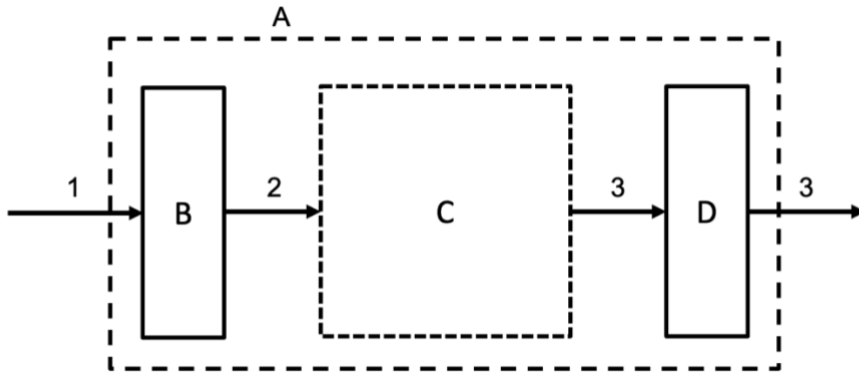


Bild 2 – Bilanzgrenze der Ressourcenexergieanalyse für Deckung von Strombedarfen aus Brennstoffen

Legende

- | | | | |
|---|---|---|--|
| A | Bilanzgrenze | 1 | Ressourcenexergieverbrauch |
| B | Vorkette (Förderung, Transport, Verluste) | 2 | Exergiezufuhr an C |
| C | Energieversorgungssystem (z. B. Kraftwerk) | 3 | Nutzexergiebedarf des Versorgungsziels |
| D | Versorgungsziel
(z. B. Ende der Stromleitung zum Elektrogerät) | | |

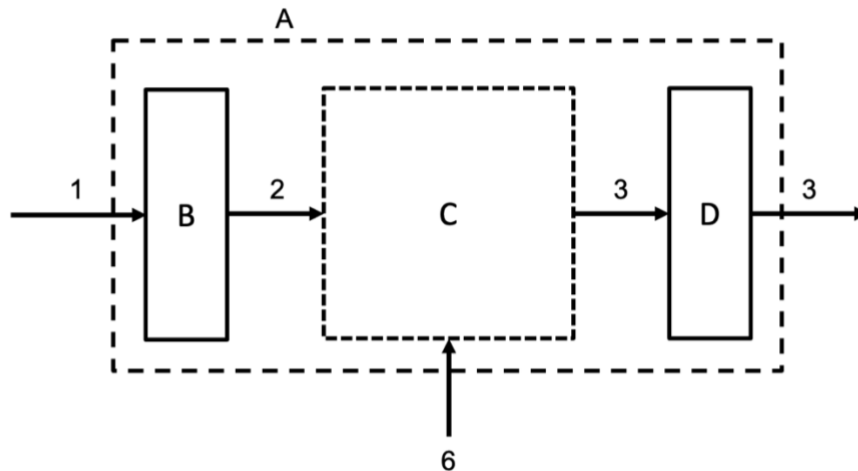
$$X_{R,el,f} = (W_d + W_{l,s} + W_{l,t}) \cdot \frac{f_{R,f,in}}{\eta_{el}} \tag{31}$$

Dabei ist

- $X_{R,el,f}$ Ressourcenexergieverbrauch der Stromerzeugung aus Brennstoffen
- W_d Gedeckter Strombedarf
- $W_{l,s}$ Stromverluste durch Speicherung
- $W_{l,t}$ Stromverluste durch Transport
- $f_{R,f,in}$ Ressourcenexergiefaktor des eingesetzten Brennstoffs
- η_{el} Elektrische Energieeffizienz des Stromerzeugers (Brennwert-bezogen)

Die elektrische Exergieeffizienz des Stromerzeugers kann in Ermangelung tabellierter exergetischer Angaben auf Basis von Formel (27) für Brennstoffe abgeschätzt werden. Wie in Abschnitt 6.3 dargestellt, kann bei Brennstoffnutzenden Kraftwerken die graue Energie für den Aufbau des Energiewandlers vernachlässigt werden [11] [15].

11.2.3 Solarstrahlung, Strömungen und Windkraft



**Bild 3 – Bilanzgrenze der Ressourcenexergieanalyse
für Deckung von Strombedarfen aus nicht direkt speicherbaren Energieströmen
(Sonne, Wind, Strömung)**

Legende

A	Bilanzgrenze	1	Ressourcenexergieverbrauch für die Herstellung der Energiewandler (z. B. Windräder oder Photovoltaik)
B	Herstellung der Energiewandler	2	Exergiezufuhr an C
C	Energieversorgungssystem (z. B. Photovoltaik, Windkraft)	3	Nutzexergiebedarf
D	Versorgungsziel (z. B. Ende der Stromleitung zum Elektrogerät)	6	Ressourcenexergieverbrauch aus nicht direkt speicherbaren Quellen (z. B. Solarstrahlung, Wind), welcher in Form von direkt speicherbarer Exergie (z. B. Strom) wieder abgegeben wird

Solarstrahlung und Strömungsenergie sind nicht ohne Wandlung speicherbar. Daher wird die erste direkt speicherbare Energie, welche mithilfe von Solarstrahlung oder Strömungsenergie erzeugt wird – z. B. elektrischer Strom –, als Ressource betrachtet.

Der Nutzungsgrad der Wandlung von Sonne, Wind oder Wasserströmungen in Strom ist nur für die Bewertung und den Vergleich der entsprechenden spezifischen Wandlungstechnologien, wie Photovoltaik-Paneele, relevant und muss für die Bestimmung des REV nicht berücksichtigt werden. Die Verluste bei der Wandlung von nicht-direkt speicherbaren in direkt speicherbare Energieformen werden somit in der REA nicht berücksichtigt. Die Aufwendungen für den Bau der

Konversionsanlagen fließen jedoch in die REA ein, da angenommen wird, dass diese als Ressourcen (z. B. Erze, Brennstoffe) zu betrachten sind.

Für Strom aus Solarstrahlung, Windkraft und Strömungen berücksichtigt der REV die Energiemenge des erzeugten Stroms als auch die auf den Betrieb umgelegten REVs für die Herstellung und Transport der Energiewandler, d. h. Photovoltaik-Paneele, Windräder und Laufwasserturbinen.

$$X_{R,el,ns} = (W_d + W_{l,s} + W_{l,t}) \cdot f_{R,el,ns} \tag{32}$$

Dabei ist

- $X_{R,el,ns}$ Ressourcenexergieverbrauch der Stromversorgung aus nicht-speicherbaren Quellen
- W_d Gedeckter Strombedarf
- $W_{l,s}$ Stromverluste durch Speicherung
- $W_{l,t}$ Stromverluste durch Transport
- $f_{R,el,ns}$ Ressourcenexergiefaktor des Stroms aus volatiler erneuerbarer Erzeugung

11.3 Wärmeerzeugung

11.3.1 Allgemein

Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über Formeln für den REV von Wärmeströmen, welche von Wärmeerzeugern bereitgestellt werden.

11.3.2 Heizkessel

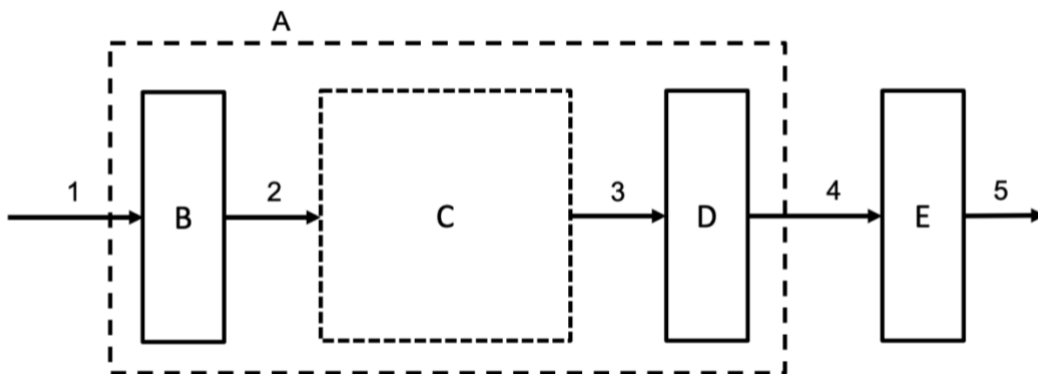


Bild 4 - Bilanzgrenze der Ressourcenexergieanalyse für die Deckung eines Wärmebedarfs durch einen Heizkessel

Legende

- A Bilanzgrenze
- 1 Ressourcenexergieverbrauch

B	Vorkette (Förderung, Transport, Verluste)	2	Exergiezufuhr an C
C	Energieversorgungssystem (z. B. Kessel)	3	Exergiezufuhr an D
D	Versorgungsziel (z. B. Gebäudevolumen)	4	Nutzexergiebedarf (für Wärmeströme: bei Zieltemperatur)
E	Grenze zur Umwelt (z. B. Wand)	5	Exergieverluste vom Versorgungsziel an die Umgebung

Als Heizkessel werden an dieser Stelle Energieversorgungssysteme verstanden, welche Wärme durch Wandlung aus anderen Energieformen, z. B. Strom oder Brennstoffen erzeugen. Wie in Abschnitt 6.3 dargestellt, kann bei Brennstoff- und Stromnutzenden Anlagen die graue Energie für den Aufbau des Energiewandlers vernachlässigt werden.

$$X_{R,th} = (Q_d + Q_{l,s} + Q_{l,t}) \cdot \frac{f_R}{\eta_{th}} \quad (33)$$

Dabei ist

$X_{R,th}$	Ressourcenexergieverbrauch der Wärmeversorgung mit Heizkesseln
Q_d	Gedeckter Wärmebedarf
$Q_{l,s}$	Wärmeverluste durch Speicherung
$Q_{l,t}$	Wärmeverluste durch Transport
f_R	Ressourcenexergiefaktor des eingesetzten Endenergieträgers
η_{th}	(Brennwert-bezogene) thermische Energieeffizienz des Wärmeerzeugers

11.3.4 Wärmetauscher mit Abwärme, Solarthermie oder Geothermie

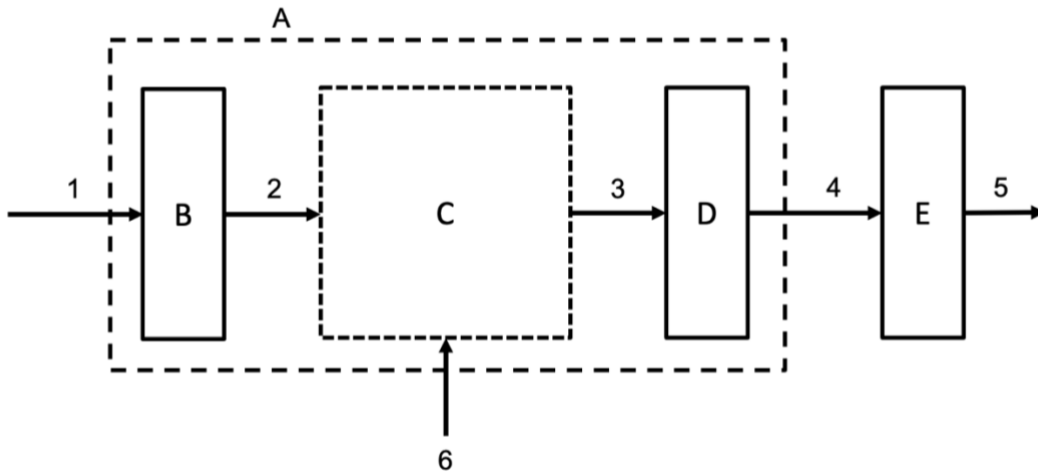


Bild 5 – Bilanzgrenze der Ressourcenexergieanalyse für die Deckung eines Wärmebedarfs durch thermische Quellen

Legende

A	Bilanzgrenze	1	Ressourcenexergieverbrauch für die Herstellung der Wärmeübertragungssysteme (z. B. Solarthermieanlagen, Wärmetauscher)
B	Vorkette (Förderung, Transport, Verluste)	2	Exergiezufuhr an C
C	Energieversorgungssystem (z. B. Wärmetauscher, Solarthermieanlage)	3	Exergiezufuhr an D
D	Versorgungsziel (z. B. Gebäudevolumen)	4	Nutzexergiebedarf (für Wärmeströme: bei Zieltemperatur)
E	Grenze zur Umwelt (z. B. Wand)	5	Exergieverluste vom Versorgungsziel an die Umgebung
		6	Ressourcenexergieverbrauch aus nicht ohne Wärmeübertragung speicherbaren Quellen (z. B. Solarwärme, Abwärme), welcher in Form von direkt speicherbarer Energie (z. B. heißes Wasser im Fernwärmesystem) wieder abgegeben wird

Solarstrahlung und Strömungsenergie von Wind und Wasser sind nicht ohne Wandlung speicherbar. Ebenso ist Wärme aus Geothermie nicht ohne Übertragung speicherbar, sondern wird letztlich an das Weltall abgegeben.

Daher wird die Wärme, welche mithilfe von Solarstrahlung, Geothermie und Strömungsenergie von Wind und Wasser erzeugt wird, als Ressource betrachtet.

Für Wärme aus Solarstrahlung, Geothermie und Strömungen von Wind und Wasser berücksichtigt der REV die Energiemenge der erzeugten Wärme, deren Energiequalität und die auf den Betrieb umgelegten REVs für die Herstellung und den Transport der Energiewandler, z. B. Solarthermische Kollektoren und Wärmetauscher.

$$X_{R,ts} = (Q_d + Q_{l,s} + Q_{l,t}) \cdot f_{R,ts} \quad (34)$$

Dabei ist

$X_{R,ts}$	Ressourcenexergieverbrauch der Wärmeversorgung aus thermischen Quellen
Q_d	Gedeckter Wärmebedarf
$Q_{l,s}$	Wärmeverluste durch Speicherung
$Q_{l,t}$	Wärmeverluste durch Transport
$f_{R,ts}$	Ressourcenexergiefaktor der thermischen Quelle

Mithilfe der Formeln (9) und (26) lässt sich der REV der Wärme auf Basis energetischer oder üblicher exergetischer Kennzahlen abschätzen.

11.3.5 Wärmepumpen

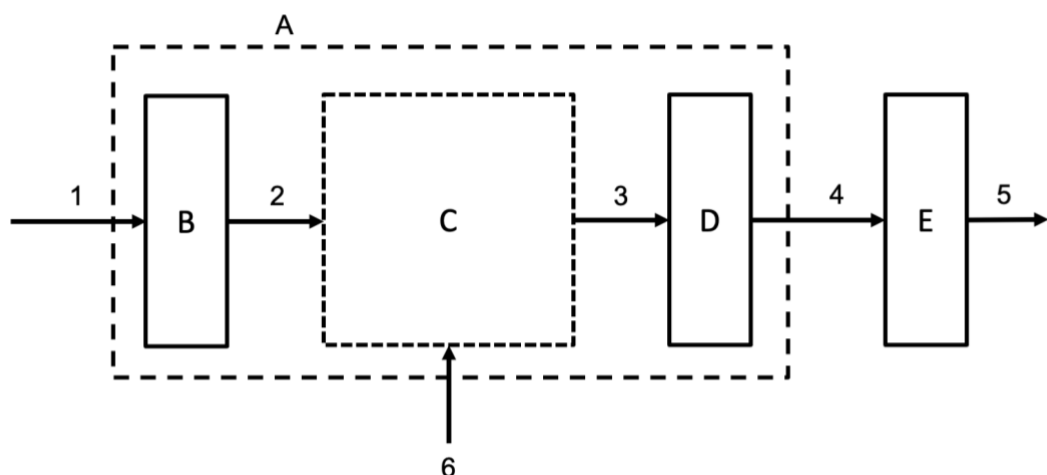


Bild 6 – Bilanzgrenze der Ressourcenexergieanalyse für die Deckung eines Wärmebedarfs durch Wärmepumpen mit einer Wärmequellentemperatur oberhalb der Referenztemperatur

Legende

A	Bilanzgrenze	1	Ressourcenexergieverbrauch für die Herstellung der Energiewandler und die Erzeugung der Antriebsenergie
B	Vorkette (Förderung, Transport, Verluste)	2	Exergiezufuhr an C

C	Energieversorgungssystem (z. B. Wärmepumpe)	3	Exergiezufuhr an D
D	Versorgungsziel (z. B. Gebäudevolumen)	4	Nutzexergiebedarf (für Wärmeströme: bei Zieltemperatur)
E	Grenze zur Umwelt (z. B. Wand)	5	Exergieverluste vom Versorgungsziel an die Umgebung Ressourcenexergieverbrauch der von der Wärmepumpe
		6	aufgenommenen Wärme, welche im Wärmepumpensystem bereitsteht

Der REV der Wärmeversorgung mithilfe von Wärmepumpen setzt sich zusammen aus der RE für den Bau und der RE für den Betrieb. Die für den Betrieb benötigte RE setzt sich dabei aus der eingesetzten RE für den Antrieb, z. B. für elektrischen Strom und aus der RE der eingesetzten Wärme zusammen.

Gleichung (35) gilt ausschließlich für Wärmepumpen, die nicht zur Kühlung genutzt werden. Wird neben der Wärme auch Kühlung mithilfe einer Wärmepumpe erzeugt, so gelten die unter Abschnitt 11.6.3 dargestellten Regeln. Wird die Wärme nicht genutzt, sondern nur Kühlung erzeugt, gelten die Berechnungsgleichungen für Kältemaschinen in Abschnitt 11.4.3.

Wie in Abschnitt 6.3 dargestellt, kann bei Anlagen, die wesentlich vom Einsatz von Strom abhängen, die graue Energie für den Aufbau des Energiewandlers vernachlässigt werden.

Häufig wird die Menge der von der Wärmepumpe aufgenommenen Wärme nicht gemessen. Um dennoch eine Bewertung dieser Wärme vornehmen zu können, kann die Wärmemenge, welche seitens der Wärmequelle in die Wärmepumpe eingebracht wird, mithilfe einer Energiebilanz an der Anlage bestimmt werden. Dabei wird angenommen, dass mindestens so viel Wärme von der Wärmequelle aufgenommen wird, wie nötig ist, um die Energiebilanz zu erfüllen. Mit dieser Festlegung kann der REV für Wärme aus einer Wärmepumpe auf Basis der Herleitungen in Anhang E, wie folgt definiert werden:

$$X_{R, hp} = (Q_d + Q_{l,s} + Q_{l,t}) \cdot \left(\frac{f_{R, dr}}{\gamma_{hp}} + f_{C, ts} \cdot \left(1 - \frac{1}{\gamma_{hp}} \right) \right) \quad (35)$$

Dabei ist

$X_{R, hp}$	Ressourcenexergieverbrauch der Wärmeversorgung mit einer Wärmepumpe
Q_d	Gedeckter Wärmebedarf
$Q_{l,s}$	Wärmeverluste durch Speicherung

$Q_{l,t}$	Wärmeverluste durch Transport
$f_{R,dr}$	Ressourcenexergiefaktor der Antriebsenergie
γ_{hp}	Arbeitszahl der Wärmepumpe im betrachteten Zeitschritt
$f_{C,ts}$	Carnotfaktor der thermischen Quelle

Für Wärmepumpen, die mit Solarthermie, Wärme aus Strömungsenergie, Geothermie oder Abwärme angetrieben werden, lässt sich mithilfe der Formeln (9) und (26) der Faktor $f_{R,in}$ auf Basis energetischer oder exergetischer Kennzahlen bestimmen.

Wird die Antriebswärme für eine thermische Wärmepumpe aus einer KWK-Anlage erzeugt, so muss der REV der KWK-Wärme entsprechend Abschnitt 0 berücksichtigt werden.

11.4 Kälteerzeugung

Bei der Kälteerzeugung ist der Carnotfaktor von entzogener Wärme unterhalb der Umgebungstemperatur negativ. Das heißt, ein Exergiefluss wird an das gekühlte Medium durch den Wärmeentzug übertragen.

Kälteerzeugung bei oder oberhalb der Referenztemperatur stellt keinen exergetischen Bedarf dar, da damit ein ohnehin bei Kontakt mit der Referenzumgebung ablaufender Prozess der Abkühlung beschleunigt wird. Die REE solcher Prozesse ist in diesem Fall stets gleich null. Dennoch kann ein REV für diese Aufgaben berechnet werden.

Verluste an bereitgestellter Kälte entstehen durch unerwünschten Wärmeeintrag in das Kühlmedium. Im Folgenden sollen diese unerwünschten Wärmeeinträge als Kälteverluste bezeichnet werden ($Q_{cd,l}$).

11.4.2 Direkte Kühlung

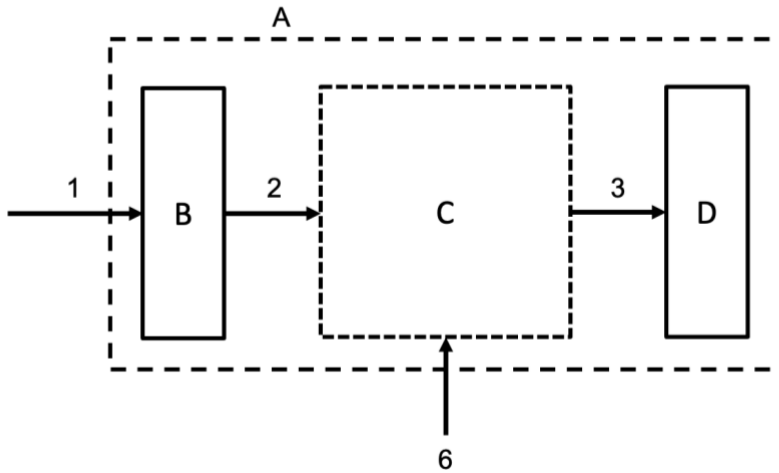


Bild 7 – Bilanzgrenze der Ressourcenexergieanalyse für die Deckung eines Kältebedarfs oberhalb der Referenztemperatur durch direkte Kühlung mithilfe einer „Kältequelle“ mit einer Temperatur unterhalb der Referenztemperatur

Legende

- | | | | |
|---|--|---|--|
| A | Bilanzgrenze | 1 | Ressourcenexergieverbrauch für Hilfsstromerzeugung |
| B | Vorkette der Hilfsstromerzeugung (Förderung, Transport, Verluste) | 2 | Exergiezufuhr durch Hilfsstrom an C |
| C | Energieversorgungssystem (z. B. Leitungen mit Wärmetauscher und Pumpe) | 3 | Exergiezufuhr an D durch Entzug eines Wärmestroms unterhalb der Referenztemperatur |
| D | Versorgungsziel (z. B. Gebäudevolumen) | 6 | Ressourcenexergieverbrauch durch Abgabe eines Wärmestroms unterhalb der Referenztemperatur an eine „Kältequelle“ |

Unter direkter Kühlung wird Kühlung mithilfe thermischer Quellen verstanden, deren Temperatur niedriger ist als die Temperatur des Bedarfs. Dazu zählt Kühlung mit Nachtluft oder mit See-, Fluss- und Meerwasser oder natürlichem Eis.

Direkte Kühlung ist analog zu Abwärme zu betrachten, da auch hier eine Ressource genutzt wird, die in speicherbarer Form in der Umgebung des Bedarfs vorliegt. Aus diesem Grund kann auch in diesem Fall auf eine Berücksichtigung des REV's für die Herstellung von Leitungen und Wärmetauschern verzichtet werden.

$$X_{R,ts} = (Q_{cd,d} + Q_{cd,l,s} + Q_{cd,l,t}) \cdot |f_{R,ts}| \tag{36}$$

Dabei ist

$X_{R,ts}$	Ressourcenexergieverbrauch der Kälteversorgung aus direkter Kühlung
$Q_{co,d}$	Gedeckter Kältebedarf
$Q_{co,l,s}$	Kälteverluste bzw. Wärmeeintrag durch Speicherung
$Q_{co,l,t}$	Kälteverluste bzw. Wärmeeintrag durch Transport
$f_{R,ts}$	Ressourcenexergiefaktor der thermischen Quelle

Mithilfe der Formeln (9) und (26) lässt sich der REV der Kälte auf Basis energetischer oder üblicher exergetischer Gewichtungsfaktoren für Wärme bestimmen.

Direkte Kühlung geht häufig mit einem signifikanten Verbrauch an Hilfsstrom einher. Der REV für dessen Herstellung ist entsprechend zu berücksichtigen, was aber separat geschehen kann.

11.4.3 Kältemaschinen

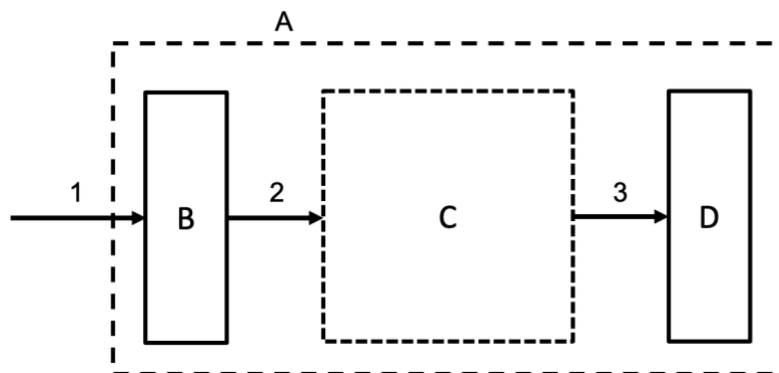


Bild 8 – Bilanzgrenze der Ressourcenexergieanalyse für die Deckung eines Kältebedarfs oberhalb der Referenztemperatur durch eine Kältemaschine die einen Wärmestrom unterhalb der Referenztemperatur aufnimmt

Legende

A	Bilanzgrenze	Ressourcenexergieverbrauch für Erzeugung der Antriebsenergie und der Herstellung der Kältemaschine
B	Vorkette der Antriebsenergie und der Herstellung (Förderung, Transport, Verluste)	2 Exergiezufuhr durch Antriebsenergie an C
C	Energieversorgungssystem (z. B. Kältemaschine)	3 Exergiezufuhr an D durch Entzug eines Wärmestroms unterhalb der Referenztemperatur
D	Versorgungsziel (z. B. Gebäudevolumen)	

In der REA sind Kältemaschinen sind Kühlsysteme, welche einem Ziel Wärme entziehen und Wärme oberhalb der Referenztemperatur abgeben.

Der REV der Kälteversorgung mithilfe von Kältemaschinen setzt sich zusammen aus den REVs für Bau und Betrieb. Die für den Betrieb benötigte RE berücksichtigt dabei nur die RE für den Antrieb, z. B. für elektrischen Strom. Eine Berücksichtigung der von der Kältemaschine aufgenommenen Wärme findet nicht statt, da diese einen Bedarf darstellt und somit nicht in einer Verbrauchsgröße berücksichtigt wird. Die folgende Formel gilt für alle Fälle, in denen die warme Seite der Kältemaschine nicht genutzt wird. Wird die warme Seite genutzt, wird die Anlage zu einer Anlage mit Wärme-Kälte-Kopplung und ist entsprechend Kapitel 11.6.3 zu bewerten.

$$X_{R,ch} = (Q_{cd,d} + Q_{cd,l,s} + Q_{cd,l,t}) \cdot \frac{f_{R,dr}}{\gamma_{ch}} \quad (37)$$

Dabei ist

$X_{R,ch}$	Ressourcenexergieverbrauch der Kälteversorgung mit einer Kältemaschine
$Q_{cd,d}$	Gedeckter Kältebedarf
$Q_{cd,l,s}$	Kälteverluste bzw. Wärmeeintrag durch Speicherung
$Q_{cd,l,t}$	Kälteverluste bzw. Wärmeeintrag durch Transport
$f_{R,dr}$	Ressourcenexergiefaktor der Antriebsenergie
γ_{ch}	Arbeitszahl der Kältemaschine im betrachteten Zeitschritt

11.4.5 Tiefkühlanlagen

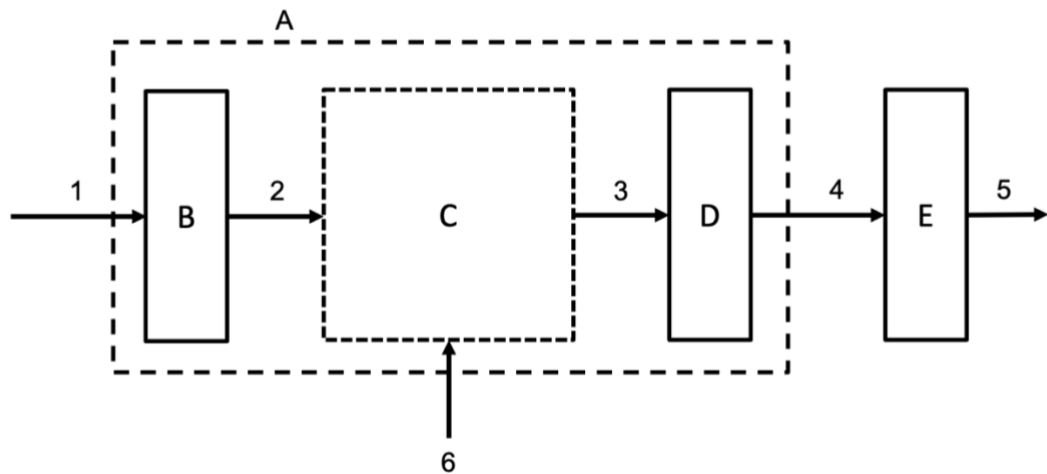


Bild 9 – Bilanzgrenze der Ressourcenexergieanalyse für die Deckung eines Kältebedarfs durch eine Tiefkühlanlage mit einer Wärmesenktemperatur und einer Zieltemperatur unterhalb der Referenztemperatur

Legende

A	Bilanzgrenze	1	Ressourcenexergieverbrauch für die Herstellung der Antriebsenergie
B	Herstellung (Förderung, Transport, Verluste)	2	Exergiezufuhr an C
C	Energieversorgungssystem (z. B. Tiefkühlanlage)	3	Exergiezufuhr an D
D	Versorgungsziel (z. B. Tiefkühlcontainer)	4	Nutzexergiebedarf durch die Extraktion von Wärme unterhalb der Referenztemperatur
E	Grenze zur Umwelt (z. B. isolierte Wand)	6	Ressourcenexergieverbrauch der von der Tiefkühlanlage abgegebenen Wärme unterhalb der Referenztemperatur

In der REA sind Tiefkühlanlagen Kühlsysteme, welche einem Versorgungsziel Wärme entziehen und Wärme unterhalb der Referenztemperatur abgeben. Solche Anlagen können nur betrieben werden, wenn weitere Anlagen Kälte unterhalb der Referenztemperatur erzeugen oder ein Kältereservoir natürlicherweise vorliegt, z. B. Eis oder Schnee an einem Tag mit Temperaturen über 0 °C.

Aufgrund des negativen Carnotfaktors von Wärme unterhalb der Referenztemperatur ist der in Tiefkühlanlagen abgegebene Wärmestrom als eingehender Exergiefluss in der exergetischen Anlagenbilanz und daher auch bei der Berechnung des REV zu berücksichtigen.

Der REV der Kälteversorgung mithilfe von Tiefkühlanlagen setzt sich zusammen aus den REs für Bau und Betrieb. Die für den Betrieb benötigte RE berücksichtigt dabei die RE für den Antrieb, z. B. für elektrischen Strom und die RE für die unterhalb der Referenztemperatur abgegebene Wärme, welche einen exergetischen Eingangsstrom darstellt. Die von der Tiefkühlanlage aufgenommene Wärme wird nicht berücksichtigt, da sie einen Bedarf darstellt und daher nicht in einer Verbrauchsvariablen berücksichtigt wird.

Die folgende Gleichung (38) gilt für alle Fälle einer Tiefkühlmaschine. Unterhalb der Referenztemperatur ist die Erwärmung lediglich eine Beschleunigung eines natürlich auftretenden Prozesses. Daher wird auch ein kombiniertes Wärme- und Kältesystem, das unterhalb der Referenztemperatur arbeitet, effektiv als Tiefkühlmaschine betrachtet.

Häufig wird die Menge der von der Tiefkühlanlage abgegebenen Wärme nicht gemessen. Um dennoch eine Bewertung dieser Wärme vornehmen zu können, kann die Wärmemenge, welche an die Wärmesenke unterhalb der Referenztemperatur abgegeben wird, mithilfe einer Energiebilanz an der Anlage bestimmt werden. Dabei gilt, dass mindestens so viel Wärme von der Wärmesenke aufgenommen wird, wie nötig ist, um die Energiebilanz der Anlage zu erfüllen. Mit dieser Festlegung kann der REV für Kälte aus einer Tiefkühlanlage auf Basis der Herleitungen in Anhang E, wie folgt definiert werden:

$$X_{R,dc} = (Q_{cd,d} + Q_{cd,l,s} + Q_{cd,l,t}) \cdot \left(\frac{f_{R,dr}}{\gamma_{dc}} + |f_{C,th}| \cdot \left(1 + \frac{1}{\gamma_{dc}} \right) \right) \quad (38)$$

Dabei ist

$X_{R,dc}$	Ressourcenexergieverbrauch der Kälteversorgung mit einer Tiefkühlanlage
$Q_{cd,d}$	Gedeckter Kältebedarf
$Q_{cd,l,s}$	Kälteverluste durch Speicherung
$Q_{cd,l,t}$	Kälteverluste durch Transport
$f_{R,dr}$	Ressourcenexergetischer Faktor der Antriebsenergie
γ_{dc}	Arbeitszahl der Tiefkühlanlage im betrachteten Zeitschritt
$f_{C,th}$	Carnotfaktor der abgegebenen Wärme

11.5 Synthetische Brennstoffe

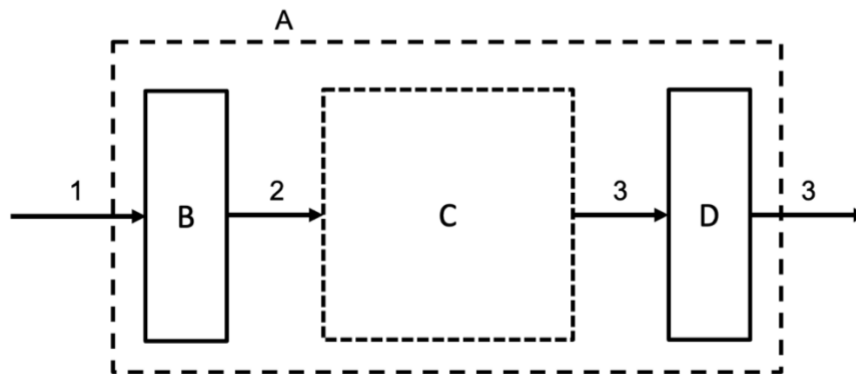


Bild 10 – Bilanzgrenze der Ressourcenexergieanalyse für die Erzeugung von synthetischen Brennstoffen

Legende

A	Bilanzgrenze	1	Ressourcenexergieverbrauch
B	Vorkette (Förderung, Transport, Verluste)	2	Exergiezufuhr an C
C	Energieversorgungssystem (z. B. Elektrolyseur)	3	Nutzexergiebedarf (z. B. Wasserstoff)
D	Versorgungsziel (z. B. Ende der Wasserstoffleitung)		

Wie elektrische Energie sind auch Brennstoffe Energieträger mit einer Energiequalität von 100 %. D. h. sie könnten theoretisch zu 100 % in elektrischen Strom gewandelt werden [5]. Der REV für Ihre Erzeugung ergibt sich aus dem Verbrauch der notwendigen Infrastruktur und dem Verbrauch an RE für den Betrieb der entsprechenden Erzeugungsanlagen.

$$X_{R,syf} = (E_d + E_{l,s} + E_{l,t}) \cdot \frac{f_{R,in}}{\eta_{syf}} \quad (39)$$

Dabei ist

$X_{R,syf}$	Ressourcenexergieverbrauch des synthetischen Brennstoffs
E_d	Energiebedarf
$E_{l,s}$	Energieverluste durch Speicherung
$E_{l,t}$	Energieverluste durch Transport
$f_{R,in}$	Ressourcenexergiefaktor der eingesetzten direkt speicherbaren Ressource

η_{syf} (Brennwert-bezogene) energetische Energieeffizienz der Erzeugungsanlage für synthetischen Brennstoff

Wird unvermeidbare Abwärme der Produktion synthetischer Brennstoffe genutzt, so gelten für die Bewertung der Abwärme die in Abschnitt 11.3.3 dargestellten Gleichungen. Die Bestimmung des REV des synthetischen Brennstoffs bleibt dadurch gegenüber Gleichung (39) unverändert.

Wird die Produktion von synthetischen Brennstoffen angepasst, um Wärme mit einer im Vergleich zu unvermeidbarer Abwärme erhöhten Temperatur auszukoppeln, so müssen REVs der synthetischen Brennstoffe als auch die der Wärme auf Basis der universellen Gleichungen für Koppelprodukte in Abschnitt 11.7 berechnet werden.

11.6 Koppelproduktion

11.6.1 Allgemein

In diesem Abschnitt werden die Regeln für die Bestimmung der REVs von häufigen Sonderfällen der Koppelproduktion, wie Kraft-Wärme-Kopplung und Wärme-Kälte-Kopplung beschrieben. Die entsprechenden Gleichungen stellen Sonderformen der in Abschnitt 11.7 dargestellten universellen Gleichungen dar. In diesem Abschnitt nicht beschriebene Formen der Koppelproduktion können auf Basis der entsprechenden universellen Gleichungen bestimmt werden.

11.6.2 Kraft-Wärme-Kopplung

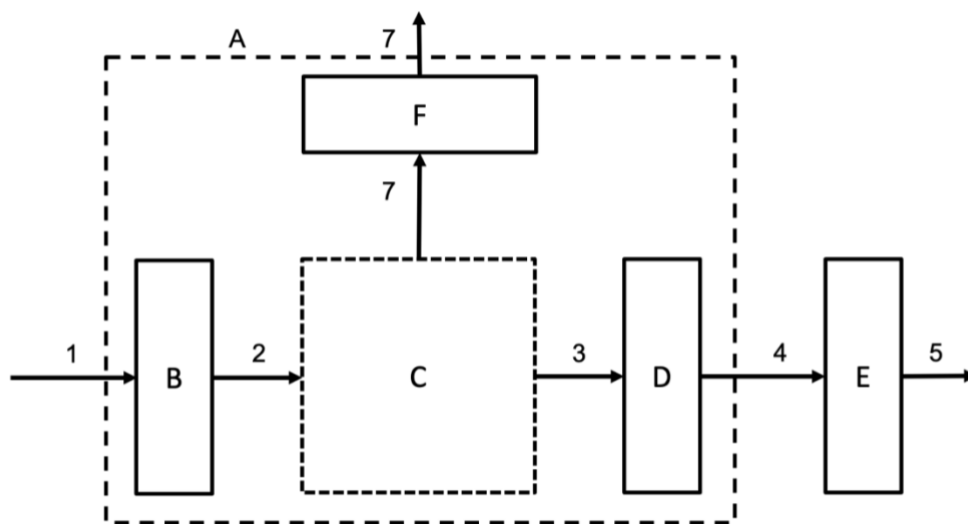


Bild 11 - Bilanzgrenze der Ressourcenexergieanalyse für die Deckung eines Wärmebedarfs durch Kraft-Wärme-Kopplung

Legende

- | | | |
|---|--|--|
| A | Bilanzgrenze | Ressourcenexergieverbrauch für die Herstellung der |
| 1 | Energiewandler und die Bereitstellung der Betriebsenergie (z. B. Biogas oder Wärme aus Tiefengeothermie) | |

B	Vorkette (Förderung, Transport, Verluste)	2	Exergiezufuhr an C
C	Energieversorgungssystem (z. B. KWK-Anlage)	3	Exergiezufuhr an D
D	Versorgungsziel (z. B. Gebäudevolumen)	4	Nutzexergiebedarf (für Wärmeströme: bei Zieltemperatur)
E	Grenze zur Umwelt (z. B. Wand)	5	Exergieverluste vom Versorgungsziel an die Umgebung
F	Versorgungsziel des Koppelprodukts (e. g. Ende einer Stromleitung)	7	Koppelprodukt (z. B. elektrischer Strom), dessen Menge vom Versorgungssystem und dem gelieferten Nutzenergiebedarf (z. B. Heizung) abhängt

Die folgenden Formeln sind nur für KWK-Anlagen gültig, die im KWK Modus betrieben werden und jeweils nur einen Wärmestrom und elektrischen Strom erzeugen.

Ein Schlüsselement bei der Berechnung von REVs für KWK-Anlagen ist der Allokationsfaktor. Der Allokationsfaktor für Strom ordnet einen Teil der in der KWK-Anlage verwendeten Ressourcen dem Strom zu. Der Allokationsfaktor für Wärme ordnet einen Teil der in der KWK-Anlage verwendeten Ressourcen der erzeugten Wärme zu. Er wird auch für die Aufteilung der Emissionen der KWK-Anlage auf Strom und Wärme verwendet.

Die Aufteilung von Brennstoffen oder Wärmeströmen auf Strom und Wärme aus Anlagen der Kraft-Wärme-Kopplung erfolgt entsprechend der Carnotmethode wie in AGFW FW 309-6 [16] dargestellt. Der Allokationsfaktor, der sich daraus ergibt, lässt sich wie folgt für den Strom darstellen:

$$\alpha_{el} = \frac{\eta_{el}}{\eta_{el} + \eta_{th} \cdot f_C} \quad (40)$$

Dabei ist

α_{el}	Allokationsfaktor des elektrischen Stroms
η_{el}	Elektrische Energieeffizienz der KWK-Anlage
η_{th}	Thermische Energieeffizienz der KWK-Anlage
f_C	Carnotfaktor der Wärme, die an das Wärmenetz übertragen wurde

Für die Wärme gilt entsprechend:

$$\alpha_{th} = \frac{\eta_{th} \cdot f_C}{\eta_{el} + \eta_{th} \cdot f_C} \quad (41)$$

Dabei ist

α_{th}	Allokationsfaktor der erzeugten Wärme
η_{el}	Elektrische Energieeffizienz der KWK-Anlage
η_{th}	Thermische Energieeffizienz der KWK-Anlage
f_C	Carnotfaktor der Wärme, die an das Wärmenetz übertragen wurde

Dabei gilt:

$$\alpha_{th} + \alpha_{el} = 1 \quad (42)$$

Mit

α_{th}	Allokationsfaktor der erzeugten Wärme
α_{el}	Allokationsfaktor des erzeugten Stroms

Für den REV des KWK-Stroms gilt:

$$X_{R,el} = (W_d + W_{l,s} + W_{l,t}) \cdot \alpha_{el} \cdot \frac{f_{R,in}}{\eta_{el}} \quad (43)$$

Dabei ist

$X_{R,el}$	Ressourcenexergieverbrauch der Stromversorgung aus Kraft-Wärme-Kopplung
W_d	Durch die KWK-Anlage im KWK-Betrieb gedeckter Strombedarf ⁶
$W_{l,s}$	Stromverluste durch Speicherung
$W_{l,t}$	Stromverluste durch Transport
α_{el}	Allokationsfaktor des elektrischen Stroms
$f_{R,in}$	Ressourcenexergiefaktor des eingesetzten Brennstoffs oder Wärmestroms
η_{el}	(Brennwert-bezogene) elektrische Energieeffizienz der KWK-Anlage

⁶ Für die Versorgung von Wärme- und Strombedarfen wird nur in seltenen Ausnahmefällen ausschließlich eine KWK-Anlage eingesetzt. Meist kommen auch Spitzenlasterzeuger zum Einsatz. Die Formeln beziehen sich daher nur auf den Anteil der Wärme oder des Stroms am Bedarf, der aus der KWK-Anlage gedeckt wird.

Für den von der KWK-Anlage erzeugten Wärmestrom gilt:

$$X_{R,th} = (Q_d + Q_{l,s} + Q_{l,t}) \cdot \alpha_{th} \cdot \frac{f_{R,in}}{\eta_{th}} \quad (44)$$

Dabei ist

$X_{R,th}$	Ressourcenexergieverbrauch der Wärmeversorgung aus Kraft-Wärme-Kopplung
Q_d	Durch die KWK-Anlage im KWK-Betrieb gedeckter Wärmebedarf
$Q_{l,s}$	Wärmeverluste durch Speicherung
$Q_{l,t}$	Wärmeverluste durch Transport
α_{th}	Allokationsfaktor der KWK-Wärme
$f_{R,in}$	Ressourcenexergiefaktor des eingesetzten Brennstoffs oder Wärmestroms
η_{th}	(Brennwert-bezogene) thermische Energieeffizienz der KWK-Anlage

11.6.3 Wärme-Kälte-Kopplung

Decken sowohl die warme als auch die kalte Seite einer Wärmepumpe einen Bedarf, so wird dies als Wärme-Kälte-Kopplung (WKK) bezeichnet. Für die Bewertung mithilfe der REA werden drei Fälle unterschieden.

1. Für den Fall, dass die von der WKK-Anlage bereitgestellte Temperatur der Kühlung oberhalb der Referenztemperatur liegt, z. B. in Serverräumen, kann dem Kältestrom kein Produktexergiestrom mehr zugeordnet werden.

In diesem Fall wird der gesamte REV der WKK-Anlage der Wärme zugeordnet. Die „Kühlung“ wird damit frei von REV. Seitens der Wärme muss allerdings der aufgenommene Wärmestrom als Ressourceneinsatz in Form von Abwärme berücksichtigt werden, da sonst die Exergiebilanz nicht vollständig ist. Eine solche WKK-Anlage wird wie eine Wärmepumpe mit Abwärmenutzung bewertet (siehe Abschnitt 11.3.5).

2. Für den Fall, dass mit einer WKK-Anlage unterhalb der Referenztemperatur geheizt wird, z. B. Expansionsventile, kann dem Wärmestrom kein Produktexergiestrom mehr zugeordnet werden.

In diesem Fall wird der gesamte REV der Kälte zugeordnet. Der „Heiz“-Wärmestrom unterhalb der Referenztemperatur muss für die Vollständigkeit der Exergiebilanz als REV für freie Kühlung berücksichtigt werden. Eine solche WKK-Anlage wird wie eine Tiefkühlanlage bewertet (siehe Abschnitt 11.4.4).

3. Liegt der Wärmebedarf oberhalb und der Kältebedarf unterhalb der Referenztemperatur, ist eine Allokation des REV auf Wärme und Kälte notwendig.

Es gibt mehrere Möglichkeiten den Gesamt-REV der WKK-Anlage zu bestimmen. Die einfachste ist, indem zuerst der Gesamt-REV ohne Allokation bestimmt wird. Das Ergebnis kann anschließend auf beide Produkte alloziert werden.

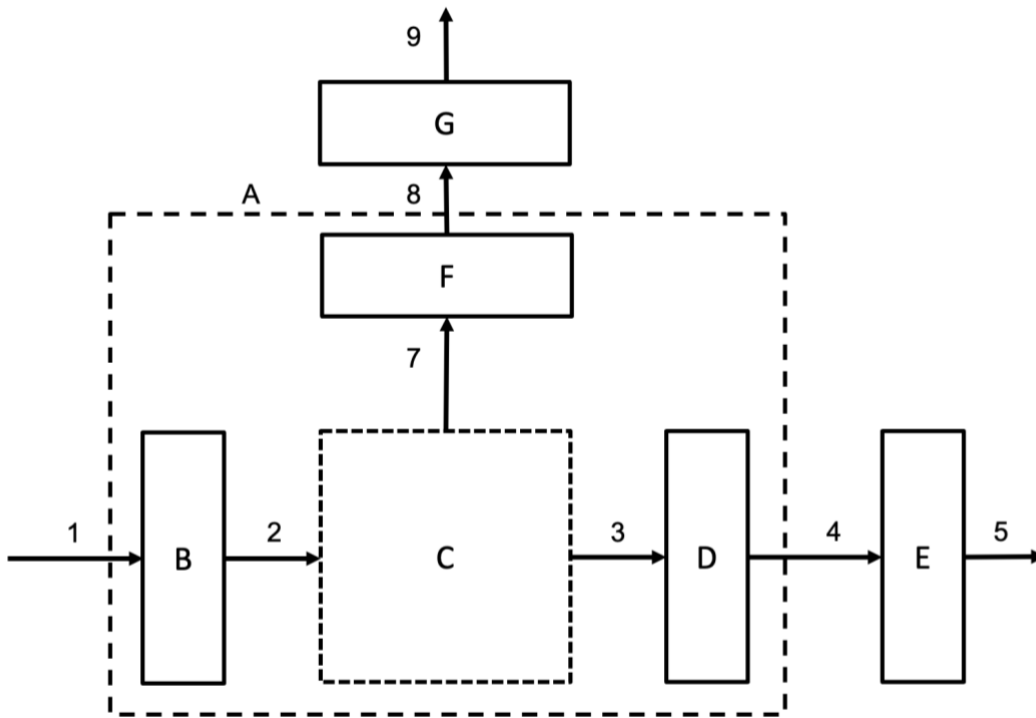


Bild 12 - Bilanzgrenze der Ressourcenexergieanalyse für die Deckung eines Wärme- und Kältebedarfs durch eine WKK-Anlage mit einer Heizungszieltemperatur oberhalb und einer Kühlzieltemperatur unterhalb der Referenztemperatur

Legende

A	Bilanzgrenze	Ressourcenexergieverbrauch für die Herstellung der
		1 Energiewandler und die Erzeugung der Antriebsenergie (z. B. Strom)
B	Vorkette (Förderung, Transport, Verluste)	2 Exergiezufuhr an C
C	Energieversorgungssystem (z. B. WKK-Anlage)	3 Exergiezufuhr an D
D	Versorgungsziel: Wärme (z. B. Raumheizung)	4 Nutzexergiebedarf: Wärme (für Wärmeströme: bei Zieltemperatur)
E	Grenze zur Umwelt (z. B. isolierte Wand)	5 Exergieverluste vom Versorgungsziel an die Umgebung
F	Versorgungsziel: Kälte (z. B. Kühlraum)	7 Exergiezufuhr an F

- G Grenze zur Umwelt (z. B. isolierte Wand)
- 8 Nutzexergiebedarf: Kälte (für Wärmeströme: bei Zieltemperatur)
- 9 Exergieverluste vom Versorgungsziel an die Umgebung

Der REV des WKK-Gesamtsystems für Wärmeproduktion oberhalb und Kälteproduktion unterhalb der Referenztemperatur ergibt sich als:

$$X_{R,sys} = (Q_{d,hd} + Q_{l,s,hd} + Q_{l,t,hd}) \cdot \frac{f_{R,in}}{\gamma_{hd}} \quad (45)$$

Dabei ist

$X_{R,sys}$	Ressourcenexergieverbrauch des Gesamtsystems zur Wärme-Kälte-Kopplung
$Q_{d,hd}$	Gedeckter Wärmebedarf
$Q_{l,s,hd}$	Wärmeverluste durch Speicherung
$Q_{l,t,hd}$	Wärmeverluste durch Transport
$f_{R,in}$	Ressourcenexerriefaktor der Antriebsenergie
γ_{hd}	Wärme-bezogene Arbeitszahl

Der REV des Gesamtsystems für Wärmeproduktion oberhalb und Kälteproduktion unterhalb der Referenztemperatur kann analog auch auf Basis von Werten für die kalte Seite berechnet werden⁷:

$$X_{R,sys} = (Q_{d,cd} + Q_{l,s,cd} + Q_{l,t,cd}) \cdot \frac{f_{R,in}}{\gamma_{cd}} \quad (46)$$

Dabei ist

$X_{R,sys}$	Ressourcenexergieverbrauch des Gesamtsystems zur Wärme-Kälte-Kopplung
$Q_{d,cd}$	Gedeckter Kältebedarf
$Q_{l,s,cd}$	Kälteverluste durch Speicherung

⁷ Theoretisch ließe sich der Ressourcenexergieverbrauch des Gesamtsystems auch auf Basis von Kälte und Wärme berechnen. Allerdings würden dann Energieströme unterschiedlicher Energiequalität addiert werden, was ein grundlegendes Verständnis der Berechnung und des Prozesses erschwert.

$Q_{l,t,cd}$	Kälteverluste durch Transport
$f_{R,in}$	Ressourcenexergiefaktor der Antriebsenergie
γ_{cd}	Kälte-bezogene Arbeitszahl

Für den Fall, dass die Temperatur des Wärmestroms oberhalb und die Temperatur des Kältestroms unterhalb der Referenztemperatur ist, wird die Carnotmethode zur Allokation der Antriebsenergie auf Wärme und Kälte angewendet werden. Die Allokationsfaktoren einer solchen WKK-Anlage ergeben sich für die Wärme als:

$$\alpha_{hd} = \frac{\gamma_{hd} \cdot f_{C,hd}}{\gamma_{hd} \cdot f_{C,hd} + \gamma_{cd} \cdot f_{C,cd}} \quad (47)$$

Dabei ist

α_{hd}	Allokationsfaktor der Wärme
γ_{hd}	Wärme-bezogene Arbeitszahl der WKK-Anlage
$f_{C,hd}$	Carnotfaktor der Wärme, die an das Wärmenetz übertragen wurde
γ_{cd}	Kälte-bezogene Arbeitszahl der WKK-Anlage
$f_{C,cd}$	Carnotfaktor der Kälte, die dem Kältenetz zugeführt wurde

Für die Kälte gilt entsprechend:

$$\alpha_{cd} = \frac{\gamma_{cd} \cdot f_{C,cd}}{\gamma_{hd} \cdot f_{C,hd} + \gamma_{cd} \cdot f_{C,cd}} \quad (48)$$

Dabei ist

α_{cd}	Allokationsfaktor der Kälte
γ_{hd}	Wärme-bezogene Arbeitszahl der WKK-Anlage
$f_{C,hd}$	Carnotfaktor der Wärme, die an das Wärmenetz übertragen wurde
γ_{cd}	Kälte-bezogene Arbeitszahl der WKK-Anlage
$f_{C,cd}$	Carnotfaktor der Kälte, die dem Kältenetz zugeführt wurde

Gleichzeitig gilt:

$$\alpha_{hd} + \alpha_{cd} = 1 \quad (49)$$

Mit

α_{hd} Allokationsfaktor der erzeugten Wärme

α_{cd} Allokationsfaktor der erzeugten Kälte

Der REV der Wärmebereitstellung aus einer WKK-Anlage mit Wärmeproduktion oberhalb und Kälteerzeugung unterhalb der Referenztemperatur ergibt sich somit zu:

$$X_{R,hd} = \alpha_{hd} \cdot X_{R,sys} \quad (50)$$

Dabei ist

$X_{R,hd}$ Ressourcenexergieverbrauch der Wärmeversorgung aus Wärme-Kälte-Kopplung

$X_{R,sys}$ Ressourcenexergieverbrauch des Gesamtsystems zur Wärme-Kälte-Kopplung

α_{hd} Allokationsfaktor der Wärmebereitstellung

Der REV der kalten Seite für Wärmeproduktion oberhalb und Kälteproduktion unterhalb der Referenztemperatur ergibt sich somit als:

$$X_{R,cd} = \alpha_{cd} \cdot X_{R,sys} \quad (51)$$

Dabei ist

$X_{R,cd}$ Ressourcenexergieverbrauch der Kälteversorgung aus Wärme-Kälte-Kopplung

$X_{R,sys}$ Ressourcenexergieverbrauch des Gesamtsystems zur Wärme-Kälte-Kopplung

α_{cd} Allokationsfaktor der Kältebereitstellung

REFs können nach Bestimmung der REVs entsprechend Abschnitt 8.3 berechnet werden.

11.7 Universelle Gleichungen

Der gesamte REV eines Energiesystems ergibt sich aus der Summe der REVs für die Versorgung mit einzelnen Energieprodukten (siehe Formel 8).

Der REV der durch ein Energiesystem zur Bereitstellung eines Produkts verursacht wird, lässt sich im Allgemeinen mithilfe der folgenden Gleichung berechnen.

$$X_{R,y} = (E_{d,y} + E_{l,s,y} + E_{l,t,y}) \cdot \sum_1^z \left(\phi_z \cdot \alpha_{y,z} \cdot \frac{f_{R,in,z}}{\eta_{y,z}} \right) \quad (52)$$

Dabei ist

- $X_{R,y}$ Ressourcenexergieverbrauch des Produkts y
- $E_{d,y}$ Energetischer Bedarf des Versorgungsziels an Produkt y
- $E_{l,s,y}$ Energieverluste durch
Speicherung des Produkts y
- $E_{l,t,y}$ Energieverluste durch Transport des Produkts y
- ϕ_z Endenergieanteil des Energiestroms z der in das Versorgungssystem eingeht
- $\alpha_{y,z}$ Allokationsfaktor des Produkts y bei Erzeugung aus dem Eingangsstrom z
- $f_{R,in,z}$ Ressourcenexergiefaktor des eingehenden Energieflusses z
- $\eta_{y,z}$ Energieeffizienz der Erzeugung des Produkts y aus dem Eingangsstrom z

Der entsprechende Allokationsfaktor eines Produkts ergibt sich gemäß der verallgemeinerten Carnotmethode zu:

$$\alpha_y = \frac{X_{pr,y}}{\sum_1^z X_{pr,z}} \quad (53)$$

Dabei ist

- α_y Allokationsfaktor des Produkts y
- $X_{pr,y}$ Exergie des Produktstroms y
- $X_{pr,z}$ Exergie des Produktstroms z

Die Summe aller Allokationsfaktoren ist gleich eins. Dementsprechend ist für Erzeuger ohne Koppelproduktion der Allokationsfaktor auch gleich eins.

Der Endenergieanteil einer in das Versorgungssystem eingehenden Endenergie berechnet sich zu:

$$\phi_z = \frac{E_{fin,z}}{\sum_1^x E_{fin,x}} \quad (54)$$

Dabei ist

ϕ_z Endenergieanteil des Energiestroms z der in das Versorgungssystem eingeht

$E_{fin,z}$ Endenergie des Versorgungsstroms z

$E_{fin,x}$ Endenergie des Versorgungsstroms x

Die Exergie thermischer Produktströme wird stets auf Grundlage der Temperaturen auf der Wärmenetzseite der Wärmeübertrager der Erzeugungsanlagen bestimmt.

Für Erzeuger, welche nur einen Endenergiefluss nutzen, sind die Endenergieanteile gleich eins.

Wird ein Produkt aus mehreren Endenergieflüssen ohne Koppelproduktion erzeugt, so addieren sich die entsprechenden REVs entsprechend Formel (52). Der Allokationsfaktor ist dabei gleich eins.

Für Wärmepumpen, Kältemaschinen, Tiefkühlanlagen und WKK-Anlagen muss Formel (52) angepasst werden. Statt des Nutzungsgrades wird für den Anteil des REV der aus dem Stromverbrauch resultiert, die Arbeitszahl genutzt. Wärmepumpen nutzen allerdings stets nicht nur Antriebsenergie, sondern auch Wärmeenergie, welche im REV berücksichtigt werden muss. Analog muss auch die Wärmeabgabe unterhalb der Referenztemperatur als REV berücksichtigt werden.

Für die Bewertung von Produkten aus Koppelproduktion wird die vom Gesamtsystem verbrauchte RE grundsätzlich entsprechend einer allgemeinen Form der Carnotmethode – siehe Formel (53) – aufgeteilt.

Eine Allokation der Eingangsströme auf gekoppelt erzeugte Produktströme, ermöglicht den Vergleich solcher Produktströme mit ähnlichen Produktströmen aus ungekoppelter Produktion. Die häufigsten Arten von Koppelproduktion (KWK und WKK) sind bereits in Abschnitt 11.6 beschrieben.

Generell sollte die REA so vorgenommen werden, dass jede Anlage einzeln bewertet wird, d. h. als Koppelproduktion wird nur berücksichtigt, was in einer Anlage produziert wird.

Gelegentlich sind allerdings zu wenige Daten vorhanden, um Einzelanlagen innerhalb eines Energiesystems zu bewerten. Werden also mehrere Einzelanlagen zusammengeschaltet, um innerhalb einer Blackbox mehrere Produkte gekoppelt zu produzieren, so können diese Einzelanlagen so bewertet werden, als ob sie eine Anlage mit Koppelproduktion sind.

In diesem Fall müssten die Ressourcenverbräuche der Eingangsflüsse aufsummiert und entsprechend der Produktexergie auf die Produkte aufgeteilt werden (siehe Formel (52) und (53)). Ein solches Vorgehen ist nur zulässig, wenn eine Betrachtung Einzelanlagen nicht möglich ist. Die Ergebnisse stellen in diesem Fall eine fundierte Näherung dar, weichen aber ggf. von den Ergebnissen für die REVs ab, welche auf Basis der Betrachtung der Einzelanlagen ermittelt, werden könnten.

Tabellen

Tabelle 1 – Symbole	10
Tabelle 2 – Indizes	11
Tabelle 3 – Abkürzungen.....	13
Tabelle 4 – Standard-Gewichtungsfaktoren für Brennstoffe (Arithmetische Mittelwerte).....	71
Tabelle 5 – Standard-Gewichtungsfaktoren für Wärme	72
Tabelle 6 – Standard-Gewichtungsfaktoren für Strom.....	73
Tabelle 7 – Standard-Gewichtungsfaktoren für Kälte	73
Tabelle 8 – Standard-Gewichtungsfaktoren aus der LCA-Datenbank	74
Tabelle 9 – Übersicht der Energiebedarfsannahmen für das Referenzbeispiel	80
Tabelle 10 – Annahmen für die energetischen Nutzungsgrade im Referenzbeispiel	80
Tabelle 11 – Annahmen für die Temperaturen im Referenzbeispiel.....	81
Tabelle 12 – Annahmen für den Hilfsstrombedarf im Referenzbeispiel	81
Tabelle 13 – Übersicht der Energiebedarfsannahmen für das Komplexbeispiel.....	87
Tabelle 14 – Annahmen für die energetischen Nutzungsgrade für das Komplexbeispiel.....	88
Tabelle 15 – Annahmen für die Temperaturen für das Komplexbeispiel	89
Tabelle 16 – Annahmen für den Hilfsstromverbrauch für das Komplexbeispiel	89
Tabelle 17 – Annahmen für die Anteile an der bereitgestellten thermischen Energie für das Komplexbeispiel.....	90
Tabelle 18 – Energiebedarfe der verglichenen Energiesysteme	105
Tabelle 19 – Annahmen und Ergebnisse der REA für die betrachteten Beispiele in Anhang B (Referenzbeispiel) und Anhang C (Komplexbeispiel)	108
Tabelle 20 – Zusammenfassung der Einsparungen des Komplexbeispiels aus Anhang C gegenüber dem Referenzbeispiel aus Anhang B.....	108

Abbildungen

Bild 1 – Bilanzgrenze der Ressourcenexergieanalyse.....	21
Bild 2 – Bilanzgrenze der Ressourcenexergieanalyse für Deckung von Strombedarfen aus Brennstoffen.....	40
Bild 3 – Bilanzgrenze der Ressourcenexergieanalyse für Deckung von Strombedarfen aus nicht direkt speicherbaren Energieströmen (Sonne, Wind, Strömung)	41
Bild 4 – Bilanzgrenze der Ressourcenexergieanalyse für die Deckung eines Wärmebedarfs durch einen Heizkessel	42
Bild 5 – Bilanzgrenze der Ressourcenexergieanalyse für die Deckung eines Wärmebedarfs durch thermische Quellen	44
Bild 6 – Bilanzgrenze der Ressourcenexergieanalyse für die Deckung eines Wärmebedarfs durch Wärmepumpen mit einer Wärmequellentemperatur oberhalb der Referenztemperatur.....	45
Bild 7 – Bilanzgrenze der Ressourcenexergieanalyse für die Deckung eines Kältebedarfs oberhalb der Referenztemperatur durch direkte Kühlung mit Hilfe einer „Kältequelle“ mit einer Temperatur unterhalb der Referenztemperatur.....	48
Bild 8 – Bilanzgrenze der Ressourcenexergieanalyse für die Deckung eines Kältebedarfs oberhalb der Referenztemperatur durch eine Kältemaschine mit die einen Wärmestrom unterhalb der Referenztemperatur aufnimmt	49
Bild 9 – Bilanzgrenze der Ressourcenexergieanalyse für die Deckung eines Kältebedarfs durch eine Tiefkühlanlage mit einer Wärmesenktemperatur und einer Zieltemperatur unterhalb der Referenztemperatur	51
Bild 10 – Bilanzgrenze der Ressourcenexergieanalyse für die Erzeugung von synthetischen Brennstoffen.....	53
Bild 11 – Bilanzgrenze der Ressourcenexergieanalyse für die Deckung eines Wärmebedarfs durch Kraft-Wärme-Kopplung	54
Bild 12 – Bilanzgrenze der Ressourcenexergieanalyse für die Deckung eines Wärme- und Kältebedarfs durch eine WKK-Anlage mit einer Heizungszieltemperatur oberhalb und einer Kühlzieltemperatur unterhalb der Referenztemperatur	58

Bild 13 – Fließbilder für Energie (E) und Exergie (X) für das Energiesystem „Referenzbeispiel“ 79

Bild 14 – Fließbilder für Energie (E) und Exergie (X) für das Komplexbeispiel 86

Literaturverzeichnis

- [1] AGFW, „Arbeitsblatt AGFW FW 309 Teil 1: Energetische Bewertung von Fernwärme - Bestimmung spezifischer Primärenergiefaktoren von Wärme- und Kälteversorgungssystemen.“ 2021.
- [2] DIN, „DIN 18599 2010: Beiblatt 1“. 2010.
- [3] ESU und Jentsch, Andrej, „Microsoft Excel calculation sheet: 2023_REA_LCA_summary.xlsx“. 2023.
- [4] Z. Rant, „Exergie - ein neues Wort für technische Arbeitsfähigkeit“, *Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens*, Bd. 1, Nr. 22, 1956.
- [5] A. Jentsch, *A novel exergy-based concept of thermodynamic quality Development of a novel thermodynamic concept and its application to energy system evaluation and process analysis*. Saarbrücken: Suedwestdeutscher Verlag fuer Hochschulschriften, 2010. doi: 10.14279/depositonce-2399.
- [6] „Ressource“, *Duden*. Dudenverlag. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Ressource>
- [7] M. Boesch, S. Hellweg, M. Huijbregts, und R. Frischknecht, „Applying Cumulative Exergy Demand (CExD) indicators to the ecoinvent database“, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Bd. 12, S. 181–190, Mai 2007, doi: 10.1065/lca2006.11.282.
- [8] J. Dewulf u. a., „Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment (CEENE): a comprehensive Life Cycle Impact Assessment method for resource accounting“, *Environ. Sci. Technol.*, Bd. 41, Nr. 24, S. 8477–8483, Dez. 2007, doi: 10.1021/es0711415.
- [9] ESU, Hrsg., „Data on demand from ESU databases 2022“. 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://esu-services.ch/>
- [10] DIN, „DIN EN 806 ,Technische Regeln für Trinkwasserinstallationen“. Beuth, 2005. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.haustechnikdialog.de/SHKwissen/311/DIN-EN-806-Technische-Regeln-fuer-Trinkwasserinstallationen>
- [11] A. Bejan, G. Tsatsaronis, und M. J. Moran, *Thermal Design and Optimization*. John Wiley and Sons Inc., 1996.
- [12] J. Szargut, *Exergy Method: Technical and Ecological Applications*. in Developments in heat transfer. WIT Press, 2005. [Online]. Verfügbar unter: <https://books.google.de/books?id=ZL2BTtkR35QC>

- [13] Carbon Offset Guide, „Renewable energy certificates (RECs)“, *Renewable energy certificates (RECs)*, 15. Februar 2023. <https://www.offsetguide.org/understanding-carbon-offsets/other-instruments-for-claiming-emission-reductions/renewable-energy/1387-2/>
- [14] Umweltbundesamt, „Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente (ProBas)“, 2021. <https://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php> (zugegriffen 19. November 2021).
- [15] D. Weißbach, G. Ruprecht, A. Huke, K. Czerski, S. Gottlieb, und A. Hussein, „Energy intensities, EROIs (energy returned on invested), and energy payback times of electricity generating power plants“, *Energy*, Bd. 52, Nr. 1.04.2013, S. 210–221, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.01.029>.
- [16] AGFW, „Arbeitsblatt AGFW FW 309 Teil 6: Energetische Bewertung von Fernwärme und Fernkälte Teil 6: Emissionsfaktoren nach Arbeitswert- und Carnotmethode“. 2021.
- [17] IEA, „IEA Methane tracker 2020: Emissions from oil and gas“, 2020. <https://www.iea.org/reports/methane-tracker-2020/methane-from-oil-gas>

Anhang A

Gewichtungsfaktoren

A.1 Allgemeines

Die in diesem Abschnitt dargestellten Gewichtungsfaktoren sind für Deutschland für das Jahr 2022 ermittelt worden. Sie stellen Mittelwerte dar, von denen gemessene Faktoren stark abweichen können [17]. Aufgrund dieser Unsicherheit für spezifische Energieflüsse können alle Faktoren außer der Angabe für den deutschen Strommix⁸ auch in anderen Ländern verwendet werden, ohne große systematische Fehler zu erzeugen, da sie sich nur in den Aufwendungen und Emissionen für den Transport unterscheiden. Dabei sind die Faktoren umso genauer, je näher der Anwendungsort am deutschsprachigen Raum liegt. Grundsätzlich erscheint jedoch auch eine weltweite Anwendung der hier aufgelisteten Faktoren für Analysen zulässig, da davon auszugehen ist, dass die Aufwendungen für den Transport bei Energieprodukten eine untergeordnete Rolle spielen.

Bis auf die zitierten Werte der Primärenergiefaktoren sind alle Standard-Gewichtungsfaktoren in Tabelle 4, Tabelle 5, Tabelle 6, Tabelle 7 und Tabelle 8 Brennwert-bezogen ermittelt und gelten daher zur Bewertung einer Brennwert-bezogenen Energiemenge. Sie beinhalten alle Aufwendungen zur Gewinnung, Aufbereitung, Umwandlung und Transport vom Ort der Primärenergiegewinnung bis zur Grenze des betrachteten Systems. Diese Aufwendungen werden umgangssprachlich als Vorkette bezeichnet.

Die für diesen Berechnungsleitfaden zentralen Gewichtungsfaktoren sind die Ressourcenexergiefaktoren (REFs).

Emissionsfaktoren sind angegeben, um eine REA parallel zu einer Treibhausgasemissionsanalyse mit Daten aus der gleichen Datenbank durchführen zu können. Die Angaben zu Treibhausgasemissionen beinhalten neben CO₂ auch die Emissionen von anderen Treibhausgasen wie Methan und Lachgas, umgerechnet in CO₂-Äquivalente. Dabei werden für jeden Energiefluss die Treibhausgasemissionen über einen Betrachtungszeitraum von 100 Jahren (GWP100) und über einen Betrachtungszeitraum von 20 Jahren (GWP20) angegeben. Die GWP20-Werte sind dabei grundsätzlich höher, da hier kurzlebige Treibhausgase, wie Methan, einen stärkeren Einfluss haben.

⁸ Statt des deutschen Strommix müssen in anderen Ländern, die entsprechend nationalen Strommixe berücksichtigt werden. Da dafür häufig keine CExD Angaben verfügbar sind, können die REFs für Strom mit den KEAs angenähert werden. Emissionen für den nationalen Strommix können meist aus nationalen Datenbanken entnommen werden. Bei der Datenbeschaffung ist darauf zu achten, dass möglichst fundierte Daten verwendet werden, die alle Vorketten miteinschließen und den Energiehandel berücksichtigen.

Neben REF und CO₂-Äquivalenten sind als Vergleichswerte kumulierte Energieaufwände (KEA) und Primärenergiefaktoren (PEF) aufgelistet, um Unterschiede zu REFs genau bestimmbar zu machen. Die Primärenergiefaktoren (nicht-erneuerbar) sind dabei, wie in der Literatur [1] üblich, Heizwert-bezogen dargestellt.

Als Zusatzinformation für Brennstoffe sind darüber hinaus die spezifische Exergie sowie der Brennwert angegeben. Beide unterscheiden sich teilweise voneinander, da die spezifische Exergie entropische Effekte mitberücksichtigt.

A.2 Anpassungen von Gewichtungsfaktoren an REA

Einige Gewichtungsfaktoren wurden an die REA angepasst, da einige REA-Bilanzgrenzen nicht mit den Vorgaben für die gelisteten Faktoren in der verwendeten LCA Datenbank [9] übereinstimmen.

Detaillierte Angaben zu allen Werten und den vorgenommenen Anpassungen finden sich in der begleitenden Exceltabelle zu diesem Leitfaden [3].

Folgende Anpassungen wurden vorgenommen.

Anpassungen für den REF im Vergleich zu CExD aus der LCA Datenbank:

1. Die chemische Exergie des Wassers wurde nicht berücksichtigt, da sie für Energiesysteme eine Transitexergie darstellt. Stattdessen wurden entsprechende KEA Werte für die aus Wasserkraft gewonnenen Energie in den REFs berücksichtigt.
2. Bei PV und Windstrom wurde der exergetische Beitrag von „renewable solar“, und „renewable kinetic“ auf eins gesetzt, d. h. Wandlungsverluste von solarer und kinetischer Exergie in elektrische, werden nicht berücksichtigt.
3. Bei Solarthermie wurde die solare Exergie mit dem Carnotfaktor der Wärmeabnahme aus dem Solarkollektor ersetzt.
4. Für Tiefengeothermie wurde der Carnotfaktor der Wärmeabnahme aus dem Erdwärmetauscher nach Übergabe an das Fernheizsystem ergänzt.

Anpassungen bei den in Anhang A tabellierten KEAs im Vergleich zum KEAs aus der LCA Datenbank:

1. Bei Angaben zu Strom aus Wasserkraft in Stauseen wurde anstatt der aus Wasserkraft gewonnenen Energie, die potenzielle Energie berücksichtigt, da bereits diese direkt speicherbar ist.
2. Bei PV, Windstrom, Solarthermie und Tiefengeothermie wurde der energetische Beitrag von „Renewable wind, solar, geoth“ auf eins gesetzt, d. h. Wandlungsverluste von solarer und kinetischer Exergie in elektrische oder Wärmeenergie, werden nicht berücksichtigt.

3. Für Wärmepumpen wurde der Beitrag aus „renewable, wind, solar, geoth.“ mit einem Beitrag ersetzt, der sich ergibt, aus $\left(1 - \frac{1}{\gamma_{hp}}\right)$. D. h. die Wärmetauscher zur Wärmequelle arbeiten verlustfrei.

A.3 LCA-basierte Standard-Gewichtungsfaktoren

Die folgenden Gewichtungsfaktoren sind Mittelwerte von Daten aus einer LCA Datenbank [9]. Tabelle 8 zeigt diese Originalwerte angepasst an die REA Bilanzgrenzen. Die Berechnungen der Mittelwerte können in der begleitenden Exceldatei zu diesem Berechnungsleitfaden nachvollzogen werden [3].

Bei genauerer Kenntnis der Herkunft von Öl, Kohle und Gas, sollten vorzugsweise die in Tabelle 8 aufgeführten Gewichtungsfaktoren verwendet werden.

Tabelle 4 - Standard-Gewichtungsfaktoren für Brennstoffe (Arithmetische Mittelwerte)

	Energieträger		$f_{p,nren}$ in kWh/ kWh _{LHV}	Spezifische Exergie in kWh/kg	Brennwert in kWh/kg	REF (f_r)	KEA	f_{CO2eq} (GWP100) in kg/kWh	f_{CO2eq} (GWP20) in kg/kWh
1	Fossile Brenn- stoffe	Heizöl	1,1	12,9	12,7	1,22	1,22	0,329	0,361
2		Schweröl	1,1	12,9	12,7	1,16	1,16	0,351	0,396
3		Erdgas (Mix)	1,1	14,0	14,9	1,26	1,25	0,272	0,314
4		Erdgas (Pipeline)	1,1	14,0	14,9	1,13	1,12	0,248	0,290
5		Flüssigerdgas ohne Fracking (LNG)	1,1	14,0	14,9	1,40	1,37	0,296	0,338
6		Steinkohle	1,1	6,6	6,4	1,16	1,16	0,388	0,420
7		Braunkohle	1,2	2,9	2,8	1,15	1,15	0,435	0,444
8	Biogene Brenn- stoffe	Biogas, direkt aus Biogas- anlagen	0,3	7,4	7,4	1,39	1,35	0,096	0,165
9		Biomethan	0,5	11,6	11,6	1,52	1,47	0,136	0,255
10		Bioöl	1,1	11,3	11,3	1,82	1,74	0,188	0,201
11		Holz	0,2	5,6	5,7	1,16	1,13	0,012	0,014
12	Nukleare Brenn- stoffe	Uran Brennelemente (4% UO ₂ & MOX)		1 212 145	1 212 145	1,05	1,05	0,002	0,003

Bei thermischen Quellen lassen sich nicht alle REF mit einem fixen Wert angeben, da die Exergie der Wärmeströme von deren Temperatur, sowie von der Referenztemperatur abhängt. Zur Bestimmung der Carnotfaktoren werden jeweils die Temperaturen auf der Wärmenetzseite der Erzeuger zugrunde gelegt. Damit werden die Übertragungsverluste aus thermischen Quellen nicht berücksichtigt.

Tabelle 5 - Standard-Gewichtungsfaktoren für Wärme

	Energieträger		$f_{p, nren}$ in kWh/kWh _{LHV}	REF (f_R)	KEA	f_{CO2eq} (GWP100) in kg/kWh	f_{CO2eq} (GWP20) in kg/kWh
1	Umweltwärme	Umgebungswärme (Luft)	0,0 ^a	0,00	1,00	0	0
2	Thermische Energiequellen	Oberflächen- Erdwärme, Wärme aus Gewässern	0,0	f_C	1,00	0	0
3		Tiefe Geothermie	0,0	$0,05 + f_C$	1,04	0,011	0,012
4		Solarthermie	0,0	$0,15 + f_C$	1,13	0,020	0,023
5	Abwärme	unvermeidbar	0,0	f_C	1,00	0	0

Tabelle 6 – Standard-Gewichtungsfaktoren für Strom

	Energieträger		f_{P,nren} in kWh/kWh_{LHV}	REF (f_R)	KEA	f_{CO2eq} (GWP100) in kg/kWh	f_{CO2eq} (GWP20) in kg/kWh
1	Strom ^a	netzbezogen (DE)	1,8	2,63	2,55	0,476	0,533
2		unmittelbar aus Photovoltaik,	0,0	1,21	1,17	0,041	0,049
3		unmittelbar aus Windkraft	0,0	1,06	1,05	0,011	0,013
4		unmittelbar aus Wasserkraft	0,0	1,07	1,07	0,011	0,013
5		Strom aus tiefer Geothermie ⁹	0,0	1,30	8,14	0,068	0,077
6		Strom aus Stoffen die thermisch behandelt bzw. entsorgt werden müssen (Abfall, Klärschlamm, Klärgas, Deponiegas, Grubengas etc.)	0,0	1,00	1,00	0	0

Tabelle 7 – Standard-Gewichtungsfaktoren für Kälte

	Energie-träger	f_{P,nren} in kWh/kWh_{LHV}	REF (f_R)	KEA	f_{CO2eq} (GWP100) in kg/kWh	f_{CO2eq} (GWP20) in kg/kWh
1	Direkte Kühlung mit Luft oder Wasser aus der Umgebung	0,7 ^b	f _c	1,00	0	0

⁹ Dieser Wert sollte nur verwendet werden, wenn eine separate Berechnung der geothermischen Stromerzeugung auf Basis der elektrischen Wirkungsgrade nicht möglich ist. Die erste direkt speicherbare Energieform ist das an der Oberfläche gewonnene heiße Wasser, so dass dieses als Ressource berücksichtigt werden sollte.

Tabelle 8 – Standard-Gewichtungsfaktoren aus der LCA-Datenbank

Soweit erforderlich, wurden die Gewichtungsfaktoren für REF und KEA gemäß den in Abschnitt A.2 dargelegten Regeln an die REA angepasst.

Datensatzname	Einheit	Spezifische Exergie in MJ/ Einheit	Brennwert in MJ/ Einheit	REF (f _R)	KEA	f _{CO2eq} (GWP100) in kg/kWh	f _{CO2eq} (GWP20) in kg/kWh
Heizöl (USA)	kg	46,50	45,80	1,25	1,25	0,335	0,366
Heizöl (Saudi-Arabien)	kg	46,50	45,80	1,19	1,19	0,317	0,340
Heizöl (Russland)	kg	46,50	45,80	1,23	1,23	0,340	0,394
Heizöl (Kanada)	kg	46,50	45,80	1,23	1,23	0,324	0,344
Schweröl	kg	46,50	45,80	1,16	1,16	0,351	0,396
Erdgas (Pipeline aus Norwegen)	m ³	36,00	38,30	1,05	1,04	0,211	0,213
Erdgas (Pipeline aus Russland)	m ³	36,00	38,30	1,21	1,20	0,285	0,366
Erdgas (Flüssiggas aus den USA, konventionelle Förderung)	m ³	36,00	38,30	1,41	1,39	0,304	0,355
Erdgas (Flüssiggas aus Katar)	m ³	36,00	38,30	1,38	1,35	0,287	0,322
Steinkohle (Russland)	kg	24,23	23,49	1,20	1,20	0,410	0,488
Steinkohle (USA)	kg	26,00	25,21	1,11	1,11	0,370	0,395
Steinkohle (Australien)	kg	27,19	26,36	1,12	1,12	0,374	0,397
Steinkohle (Kolumbien)	kg	24,63	23,88	1,08	1,08	0,356	0,360
Steinkohle (Indonesien)	kg	16,21	15,72	1,32	1,32	0,429	0,459
Braunkohle (Deutschland)	kg	10,30	9,90	1,04	1,04	0,409	0,415
Braunkohle (Polen)	kg	10,30	9,90	1,07	1,07	0,417	0,423
Braunkohle (USA)	kg	10,30	9,90	1,16	1,16	0,438	0,448
Braunkohle (China)	kg	10,30	9,90	1,24	1,25	0,463	0,478

Datensatzname	Einheit	Spezifische Exergie in MJ/ Einheit	Brennwert in MJ/ Einheit	REF (f _R)	KEA	f _{CO2eq} (GWP100) in kg/kWh	f _{CO2eq} (GWP20) in kg/kWh
Braunkohle (Russland)	kg	10,30	9,90	1,26	1,26	0,447	0,458
Biogas (Gülle und Reststoffe, direkt aus Biogasanlagen)	m ³	26,60	26,60	1,13	1,13	0,056	0,101
Biogas (Mais und Anbaubiomasse, direkt aus Biogasanlagen)	m ³	26,60	26,60	1,64	1,57	0,135	0,230
Biomethan (Gülle und Reststoffe)	m ³	41,60	41,60	1,28	1,28	0,098	0,192
Biomethan (Mais und Anbaubiomasse)	m ³	41,60	41,60	1,76	1,67	0,175	0,318
Bioöl (Rapsöl)	kg	40,50	40,50	1,65	1,58	0,213	0,226
Bioöl (Palmöl)	kg	40,50	40,50	2,00	1,91	0,162	0,176
Holz – Hackschnitzel (Anbaubiomasse)	kg	20,10	20,10	1,08	1,03	0,007	0,008
Holz – Hackschnitzel (Restholz)	m ³	3842,91	3842,91	1,02	1,02	0,004	0,005
Holz – Hackschnitzel (Kanada, Anbaubiomasse)	kg	20,10	21,10	1,34	1,31	0,010	0,010
Holz – Pellets (Restholz)	kg	19,44	19,44	1,12	1,11	0,018	0,021
Holz – Pellets (Anbaubiomasse)	kg	19,44	19,44	1,23	1,18	0,022	0,025
Strom aus PV (Produktionsmix, flach)	kWh	3,60	3,60	1,19	1,16	0,040	0,049

Datensatzname	Einheit	Spezifische Exergie in MJ/ Einheit	Brennwert in MJ/ Einheit	REF (f _R)	KEA	f _{CO2eq} (GWP100) in kg/kWh	f _{CO2eq} (GWP20) in kg/kWh
Strom aus PV (Produktionsmix, schräg)	kWh	3,60	3,60	1,22	1,18	0,042	0,050
Strom aus Windkraft	kWh	3,60	3,60	1,06	1,05	0,011	0,013
Strom aus Laufwasserkraft	kWh	3,60	3,60	1,07	1,06	0,004	0,005
Strom aus Stauwasserkraft*	kWh	3,60	3,60	1,07	1,07	0,017	0,020
Strom aus thermischer Abfallbehandlung	kWh	3,60	3,60	1,00	1,00	0,000	0,000
Strommix (Deutschland)	kWh	3,60	3,60	2,63	2,55	0,476	0,533
Strommix (EU)	kWh	3,60	3,60	3,40	3,21	0,534	0,600
Wärme aus Solarthermie (Flachkollektoren, Produktionsmix, flach)	MJ	1,00	1,00	0,12+f _c	1,10	0,016	0,019
Wärme aus Solarthermie (Flachkollektoren, Produktionsmix, schräg)	MJ	1,00	1,00	0,11+f _c	1,10	0,015	0,017
Wärme aus Solarthermie (Vakuumröhrenkollektoren, Produktionsmix)	MJ	1,00	1,00	0,21+f _c	1,19	0,028	0,033
Wärme aus Erdwärmepumpen (10kW / COP 3,19)*	MJ	1,00	1,00	1,38	1,27	0,144	0,189

Datensatzname	Einheit	Spezifische Exergie in MJ/ Einheit	Brennwert in MJ/ Einheit	REF (f _R)	KEA	f _{CO2eq} (GWP100) in kg/kWh	f _{CO2eq} (GWP20) in kg/kWh
Wärme aus Luftwärmepumpen (10 kW / COP 2,29)*	MJ	1,00	1,00	1,52	1,35	0,201	0,268
Wärme aus Grundwasserwärmepumpen (10 kW / COP 2,78)*	MJ	1,00	1,00	1,44	1,30	0,162	0,209
Wärme aus Flusswärmepumpen (Großwärmepumpe 13 MW / COP 2,45)*	MJ	1,00	1,00	1,47	1,32	0,174	0,217
Strom aus Tiefengeothermie (Open Loop / Hydrothermal - klassische Tiefengeothermie / Elektrischer Nutzungsgrad: 14 %*)	kWh	3,60	3,60	1,30	7,45	0,068	0,077
Wärme aus thermischer Abfallbehandlung	kWh	3,60	3,60	1,00	1,00	0,000	0,000
Wärme aus tiefer Geothermie	MJ	1,00	0,00	0,05+f _c	0,04	0,011	0,012
Brennelemente SWR, UO ₂ 4,0% & MOX, in der Kernbrennstoff-Fabrikationsanlage	kg	4 415 553	4 415 553	1,07	1,07	0,002	0,003
Brennelemente DWR, UO ₂ 4,0% & MOX, in der Kernbrennstoff-Fabrikationsanlage	kg	4 311 894	4 311 894	1,03	1,03	0,002	0,003

Datensatzname	Einheit	Spezifische Exergie in MJ/ Einheit	Brennwert in MJ/ Einheit	REF (f _R)	KEA	f _{CO2eq} (GWP100) in kg/kWh	f _{CO2eq} (GWP20) in kg/kWh
Grüner Wasserstoff aus PV und Wind & Windpower*	kg	141,80	141,80	1,75	1,65	0,049	0,055

* Diese Angaben sollen als Vergleichswerte dienen, da sie nur für bestimmte COP / Nutzungsgrade gelten. Sie können für schnelle Überschlagsrechnungen genutzt werden. Für genaue Vergleiche müssen Gewichtungsfaktoren für Wärmepumpen, grünen Wasserstoff und elektrische Erzeugung aus Geothermieanlagen oder Stauseewasserkraft mit Hilfe der entsprechenden Formeln in diesem Berechnungsleitfaden und den Gewichtungsfaktoren für die genutzten Energieströme (Strom und Wärme) berechnet werden.

Anhang B

Beispielanalyse eines einfachen Energiesystems mit REA (Referenzbeispiel)

Hinweis: Die berechneten Werte für REV wurden auf eine Stelle nach dem Komma gerundet.

B.1 Berechnungsannahmen und Formelzeichen für das Referenzbeispiel

Im Folgenden soll beispielhaft ein einfaches Energiesystem (Referenzbeispiel) mithilfe der REA untersucht werden, die für einen Vergleich in Anhang D als Referenz genutzt wird. Das Energiesystem enthält einen dezentralen Gas-Brennwertkessel und eine dezentrale Kältemaschine. Der Strombedarf wird aus dem öffentlichen Netz gedeckt.

Schwerpunkt dieses Systems liegt auf der Energiebedarfssenkung, z. B. durch Dämmung und Einsatz besonders effizienter Elektrogeräte.

Da das Energiesystem als Referenz für den Vergleich in Anhang D verwendet wird, sind die Gesamtsystemeigenschaften mit dem Zusatz „ref“ versehen.

Das Referenzbeispiel kann durch Fließbilder charakterisiert werden (Bild 13). Im folgenden Bild werden nur Eingangsströme und Produktströme dargestellt, die über die Bilanzgrenzen E oder X hinausgehen. Beide Fließbilder sind nahezu identisch, mit dem Unterschied, dass der Kältestrom 42 eine Energieaufnahme des Systems darstellt, während gleichzeitig kein Exergiebedarf gedeckt wird, da der „Kältebedarf“ oberhalb der Referenztemperatur liegt und die Kühlung somit nur eine Beschleunigung natürlicher Vorgänge darstellt.

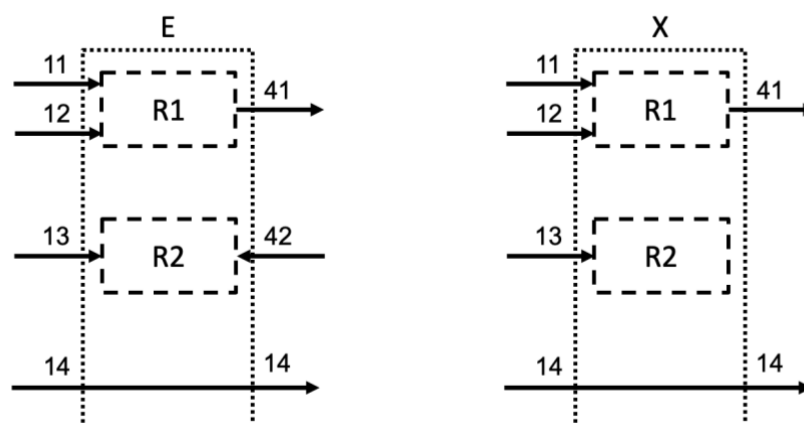


Bild 13 - Fließbilder für Energie (E) und Exergie (X) für das Energiesystem „Referenzbeispiel“

Legende

E	Bilanzgrenze des Referenzbeispiels (energetisch)	11	Erdgas
X	Bilanzgrenze des Referenzbeispiels (exergetisch)	12	Hilfsstrom aus dem Stromnetz
R1	Individueller Erdgas-Brennwertkessel	13	Strom aus dem Stromnetz
R2	Individuelle Kältemaschine	14	Strom aus dem Stromnetz
		41	Wärme
		42	„Kälte“

Als Versorgungstemperaturen werden jeweils die Temperaturen am Ausgang der Erzeuger betrachtet. Die Kühltemperatur der Kältemaschine liegt unter der Referenztemperatur, ist für die REA einer Kältemaschine, welche Kühlung oberhalb der Referenztemperatur bereitstellen soll, aber irrelevant.

B.2 Berechnungsannahmen und Formelzeichen für das Referenzbeispiel

Tabelle 9 – Übersicht der Energiebedarfsannahmen für das Referenzbeispiel

Energiesystem	Bezeichnung	Formelzeichen	Wert	Einheit	Kommentar
R1	Wärmebedarf	$Q_{d,hd,ref}$	80	MWh	
R2	Kältebedarf	$Q_{d,cd,ref}$	25	MWh	Der Kältebedarf fällt für Kühlung in einigen Bereichen des Versorgungsziels an.
R1, 14	Strombedarf	$W_{d,ref}$	20	MWh	

Tabelle 10 – Annahmen für die energetischen Nutzungsgrade im Referenzbeispiel

Energiesystem	Bezeichnung	Formelzeichen	Wert
R1	Nutzungsgrad Erdgaskessel (brennwertbezogen)	$\eta_{R1,1}$	95 %
R2	Jahresarbeitszahl Kältemaschine	$\gamma_{R2,cd}$	2,0

Tabelle 11 – Annahmen für die Temperaturen im Referenzbeispiel

Energiesystem	Bezeichnung	Formelzeichen	Wert in K (für die Berechnung)	Wert in °C (zur Information)
Alle	Referenz- temperatur	T_0	283,15	10
Alle	Zieltemperatur (Wärme und Kälte)	$T_{d,tg}$	295,15	22

Tabelle 12 – Annahmen für den Hilfsstrombedarf im Referenzbeispiel

Energiesystem	Bezeichnung	Formelzeichen	Wert
R1	Kessel	$\omega_{aux,R1}$	0,25 % 0,0025*

*in Bezug auf den erzeugten Wärmestrom

Alle REFs sind Anhang A entnommen.

Kürzungen in entstehenden Gleichungen werden nicht vorgenommen, um eine einfachere Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten.

B.3 Carnotfaktor des Wärmebedarfs

Zur Vereinfachung der Analyse des Energiesystems sollen an dieser Stelle Carnotfaktoren berechnet werden, welche für die Berechnung der Exergieflüsse notwendig sind. Sie werden entsprechend den Gleichungen (1), (2) und (3) ermittelt. Die Carnotfaktoren werden auf zwei Nachkommastellen gerundet, da die zur Berechnung verwendeten Temperaturen Mittelwerte über einen Zeitraum darstellen und somit als vereinfachte Annahmen zu betrachten sind.

Da im Referenzbeispiel nur die Zieltemperatur eine Rolle spielt, ist hier nur der Carnotfaktor des Wärmebedarfs zu berechnen.

$$\begin{aligned}
 f_{C,tg} &= \left(1 - \frac{T_0}{T_{d,tg}}\right) \\
 &= \left(1 - \frac{283,15K}{295,15K}\right) \\
 &= 0,04
 \end{aligned}
 \tag{55}$$

Ein Carnotfaktor des Kältebedarfs muss nicht berechnet werden, da die Temperatur des Kältebedarfs oberhalb der Referenztemperatur liegt und somit hier kein Exergiebedarf durch Kühlung besteht. %

Stattdessen besteht ein Bedarf an beschleunigter Abkühlung, die sonst ohnehin stattfinden würde. Dafür lässt sich aber kein Exergiebedarf formulieren.

B.4 Nutzexergiebedarf des Versorgungsziels

Der Nutzexergiebedarf (NEB), der mit dem gesamten Energieversorgungssystem gedeckt werden soll, errechnet sich gemäß Formel (12). Für die Wärmeversorgung ergibt sich damit:

$$X_{d,hd} = f_{c,tg} \cdot Q_{d,hd} = 0,04 \cdot 80 \text{ MWh} = 3,2 \text{ MWh} \quad (56)$$

Der Wert ist auf eine Stelle nach dem Komma gerundet, da es sich um eine Monatsanalyse handelt, in der die Schwankungen der Außentemperatur weitere Nachkommastellen beeinflussen würden. In einigen Fällen sind die Schwankungen der Außentemperatur so hoch, dass ein Bereich angegeben werden müsste, in dem sich der NEB bewegt. Da der NEB allerdings nur eine Orientierungsgröße aber keine für eine REA Bewertung zentrale Vergleichsgröße darstellt, kann mit diesem Mittelwert des NEB weiter gerechnet werden.

Der elektrische NEB entspricht dem Strombedarf.

Der NEB der Kälte liegt bei null, da die Zieltemperatur höher ist als die Referenztemperatur.

Damit ist auch die REE für die Kälteversorgung des Referenzbeispiels stets gleich null, unabhängig vom Versorgungssystem. Dies wiederum illustriert, die mangelnde Eignung der Exergieeffizienz als universelle Vergleichsgröße für Energiesysteme.

B.5 Wärme aus einem individuellen Erdgaskessel (R1)

Die anzuwendende Formel ist Formel (33). Eine Berücksichtigung des Heizwert-Brennwert-Verhältnisses ist nicht notwendig, da sowohl der genutzte REF als auch die angenommene Energieeffizienz bereits brennwertbezogen sind.

$$\begin{aligned} X_{R,th,R1} &= \frac{Q_{d,hd,ref}}{\eta_{th,R1}} \cdot (f_{R,f} + \omega_{aux,R1} \cdot f_{R,el,pm}) \\ &= \frac{80 \text{ MWh}}{0,95} \cdot (1,26 + 0,0025 \cdot 2,63) \\ &= 111,6 \text{ MWh} \end{aligned} \quad (57)$$

Der REF der Wärme aus R1 ergibt sich gemäß Formel (9) zu:

$$f_{R,R1} = \frac{X_R}{E} = \frac{X_{R,R1}}{E_{d,hd}} = \frac{111,6 \text{ MWh}}{80 \text{ MWh}} = 1,40 \quad (58)$$

Die REE der Versorgung mit der Wärme aus R1 ergibt sich gemäß Formel (16) zu:

$$\xi_{R,R1} = \frac{\sum_1^y |X_{d,out}|_y}{\sum_1^z |X_{R,in}|_z} = \frac{X_{d,hd}}{X_{R,R1}} = \frac{3,2 \text{ MWh}}{111,6 \text{ MWh}} = 2,9 \% \quad (59)$$

B.6 Kälte aus einer individuellen Kältemaschine (R2)

Für die Berechnung des REV aus einer Kältemaschine kommt Formel (37) zur Anwendung.

$$\begin{aligned} X_{R,R2} &= (Q_{cd,d} + Q_{cd,l,s} + Q_{cd,l,t}) \cdot \frac{f_{R,in}}{\gamma_{ch}} \\ &= Q_{d,cd,ref} \cdot \frac{f_{R,el,pm}}{\gamma_{ch,R2}} \\ &= 25 \text{ MWh} \cdot \frac{2,63}{2,0} \\ &= 32,9 \text{ MWh} \end{aligned} \quad (60)$$

Der REF der Kälte aus R2 ergibt sich gemäß Formel (9) zu:

$$f_{R,R2} = \frac{X_R}{E} = \frac{X_{R,R2}}{Q_{d,cd}} = \frac{32,9 \text{ MWh}}{25 \text{ MWh}} = 1,32 \quad (61)$$

Die REE der Versorgung mit der Kälte aus R2 ist Null, da die Temperatur, auf der der Raum gehalten werden soll, oberhalb der Referenztemperatur liegt. D. h. eine Kühlung ist nur aufgrund begrenzter Wärmeübertragungsgeschwindigkeit nötig, würde aber grundsätzlich aber im Wärmeaustausch mit der Umwelt von selbst passieren.

B.7 Stromverbrauch aus dem Netz

Der REV des Stromverbrauchs aus dem Netz berechnet sich entsprechend den Erläuterungen in Abschnitt 9.2.

$$\begin{aligned} X_{R,14} &= W_d \cdot f_{R,el,pm} \end{aligned} \quad (62)$$

$$= 20 \text{ MWh} \cdot 2,63$$

$$= 52,6 \text{ MWh}$$

Der REF entspricht dem REF des elektrischen Stroms aus dem Netz (2,63).

Die REE berechnet sich nach Formel (17).

$$\xi_{el,pm} = \frac{1}{f_{R,el,pm}} = \frac{1}{2,63} = 38,0 \% \quad (63)$$

B.8 Gesamtsystem

Da jeweils nur ein Versorgungssystem einen Bedarf abdeckt, entsprechen der REV, der REF und die REE für Wärme, Kälte und Strom jeweils den für die entsprechenden Versorgungssysteme (R1,R2,14) ermittelten Werten.

Die Werte für das Referenzbeispiel erhalten den zusätzlichen Index „ref“, da es als Referenzsystem für Vergleiche Anhang D genutzt wird.

Der gesamte REV des Referenzbeispiels beträgt:

$$X_{R,ref} = \sum_{R1}^y X_{R,in,y} = X_{R,hd} + X_{R,cd} + X_{R,el} \quad (64)$$

$$= (111,6 + 32,9 + 52,6) \text{ MWh} = 197,1 \text{ MWh}$$

Der REV des Gesamtsystems ist eine informative Bewertungsgröße, die es erlaubt, das Referenzbeispiel mit alternativen Systemen, z. B. dem Komplexbeispiel aus Anhang C zu vergleichen, und die Einsparpotenziale eines komplexen Energiesystems gegenüber einer Standardtechnologiekombination zu ermitteln.

Der mittlere REF der Energieversorgung aus dem Referenzbeispiel ergibt sich mit Formel (10) zu:

$$f_{R,avg,ref} = \frac{X_{R,ref}}{E_{d,hd,ref} + E_{d,cd,ref} + E_{d,el,ref}} \quad (65)$$

$$= \frac{197,1 \text{ MWh}}{80 \text{ MWh} + 25 \text{ MWh} + 20 \text{ MWh}} = 1,58$$

Der mittlere REF des Energiesystems ist als informative Größen zu betrachten, da seine Aussagekraft aufgrund des Bezugs auf Energieflüsse unterschiedlicher Energiequalität (hier Strom, Wärme und Kälte) stark begrenzt ist.

Für das vorliegende Beispiel soll keine REE angegeben werden, da eine REE für Kälte nicht berechnet wurde.

Die ermittelten REFs sind vorrangig bei der Auswahl und dem Vergleich von Versorgungssystemen für Wärme, Kälte und Strom hilfreich, wie in Anhang D dargestellt.

Anhang C

Beispielanalyse eines komplexen Energiesystems mit REA (Komplexbeispiel)

Im Folgenden soll beispielhaft ein komplexes Energiesystem mit einem erneuerbaren Erzeugerpark (Komplexbeispiel) mithilfe der REA untersucht werden. Das Energieversorgungssystem besteht dabei aus verschiedenen nahezu treibhausgasneutralen Energiesystemen. Der Erzeugerpark enthält: Kessel, thermische Wärmequellen, eine mit thermischer Energie betriebene KWK-Anlage, eine mit PV-Eigenstrom betriebene WKK-Anlage und direkte Kühlung.

Das Komplexbeispiel (A1 - A6) kann dabei als Fließbild in Bild 14 dargestellt werden. Im folgenden Bild werden nur Eingangsströme und Produktströme dargestellt, die über die Bilanzgrenzen E oder X hinausgehen. Beide Fließbilder sind nahezu identisch, mit dem Unterschied, dass die Kälteströme 45 und 64 eine Energieaufnahme des Systems darstellen, während gleichzeitig kein Exergiebedarf gedeckt wird, da die Zieltemperatur des Kältebedarfs oberhalb der Referenztemperatur liegt.

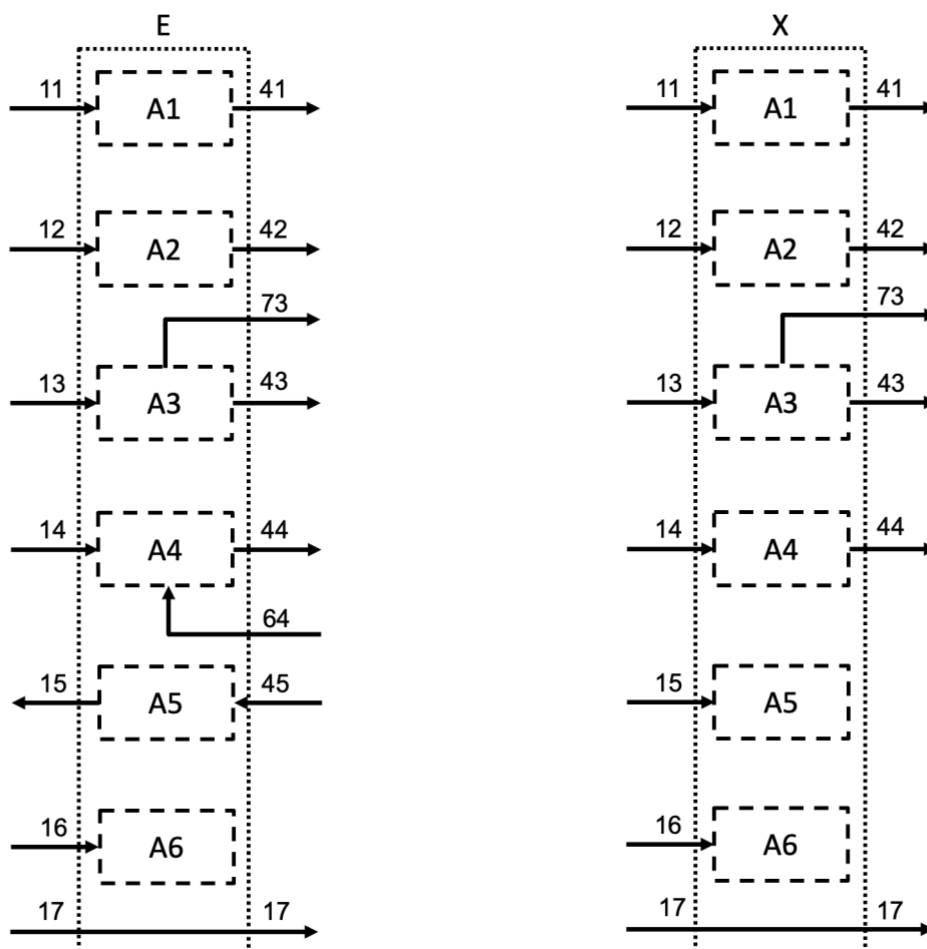


Bild 14 – Fließbilder für Energie (E) und Exergie (X) für das Komplexbeispiel

Legende

E	Bilanzgrenze des Komplexbeispiels (energetisch)	11	Strom aus Windkraft
X	Bilanzgrenze des Komplexbeispiels (exergetisch)	12	Industrielle Abwärme
A1	Kessel mit grünem Wasserstoff aus Windstrom	13	Wärme aus Tiefengeothermie
A2	Industrielle Abwärme	14	Eigenstromverbrauch aus Photovoltaik
A3	Tiefengeothermische KWK Anlage	15	Wärmeabgabe an einen Fluss
A4	Große WKK-Anlage betrieben mit Strom aus Photovoltaik	16	Strom aus dem Netz
A5	Direkte Kühlung mit Flusswasser	41	Wärme aus Kessel A1
A6	Hilfsstromversorgung des Energieparks	42	Wärme aus Abwärme A2
17	Strom aus dem Stromnetz	43	Wärme aus KWK A3
73	Strom aus der KWK Anlage A3	44	Wärme aus Wärme-Kälte-Kopplung
64	„Kälte“ aus Wärme-Kälte Kopplung (WKK)	45	„Kälte“ aus direkter Kühlung

C.1 Berechnungsannahmen und Formelzeichen für das Komplexbeispiel

Tabelle 13 – Übersicht der Energiebedarfsannahmen für das Komplexbeispiel

Energie-system	Bezeichnung	Formelzeichen	Wert	Einheit	Kommentar
Alle (Summe)	Wärmebedarf	$Q_{d,hd}$	100	MWh	
A4, A5	Kältebedarf	$Q_{d,cd}$	40	MWh	Der Kältebedarf fällt für Kühlung in einigen Bereichen des Versorgungsziels an.
A3, Netz	Strombedarf	W_d	30	MWh	

Tabelle 14 – Annahmen für die energetischen Nutzungsgrade für das Komplexbeispiel

Energie-system	Bezeichnung	Formelzeichen	Wert
A1	Nutzungsgrad Wasserstoffkessel (brennwertbezogen)	$\eta_{A1,1}$	90 %
A1	Nutzungsgrad Elektrolyseur (brennwertbezogen)	$\eta_{A1,2}$	70 %
A3	Nutzungsgrad KWK Anlage (elektrisch)	$\eta_{A3,el}$	15 %
A3	Nutzungsgrad KWK Anlage (thermisch)	$\eta_{A3,th}$	75 %
A4	Wärme-bezogene Arbeitszahl der WKK-Anlage	$\gamma_{A4,hd}$	3,0
A1, A2, A3, A4	Nutzungsgrad des Fernwärmesystems (Transport)	$\eta_{hd,t}$	88 %
A1, A2, A3, A4	Nutzungsgrad des Fernwärmesystems (Speicher)	$\eta_{hd,s}$	93 %
A3	Nutzungsgrad des lokalen Stromnetzes für die Eigenstromversorgung (Transport)	$\eta_{el,t}$	99 %
A4, A5	Nutzungsgrad des Fernkältesystems (Transport)	$\eta_{cd,t}$	95 %
A4, A5	Nutzungsgrad des Fernkältesystems (Speicher)	$\eta_{cd,s}$	98 %

Abwärmenutzung und direkte Kühlung benötigen zur Berechnung der verbrauchten Ressourcen keine Nutzungsgrade, da beide Energiequellen erst nach Übergabe an das Energieversorgungssystem bewertet werden.

Tabelle 15 – Annahmen für die Temperaturen für das Komplexbeispiel

Energiesystem	Bezeichnung	Formelzeichen	Wert in K (für die Berechnung)	Wert in °C (zur Information)
Alle	Referenztemperatur	T_0	283,15	10
Alle	Zieltemperatur (Wärme) – Zieltemperatur Kälte ergänzen und beides nach Temperaturen verschieben	$T_{d,tg}$	295,15	22
A1, A2, A3, A4	Vorlauftemperatur Fernwärme	$T_{hd,sf}$	343,15	70
A1, A2, A3, A4	Rücklauftemperatur Fernwärme	$T_{hd,rf}$	313,15	40
A3	Vorlauftemperatur aus der Tiefengeothermiebohrung auf der Systemseite der Geothermie-KWK Anlage	$T_{ts,sf,A3}$	453,15	180
A4, A5	Vorlauftemperatur Fernkälte	$T_{cd,sf}$	277,15	4
A4, A5	Rücklauftemperatur Fernkälte	$T_{cd,rf}$	283,15	10

Tabelle 16 – Annahmen für den Hilfsstromverbrauch für das Komplexbeispiel

Energiesystem	Bezeichnung	Formelzeichen	Wert
A1	Kessel	$\omega_{aux,A1}$	0,2 % 0,002
A2	Abwärme	$\omega_{aux,A2}$	0,5 % 0,005
A1, A2, A3, A4	Fernwärme	$\omega_{aux,hd,t}$	1,5 % 0,015
A4, A5	Fernkälte	$\omega_{aux,cd,t}$	3,5 % 0,035
A5	Kühlung mit Flusswasser	$\omega_{aux,A5}$	2,6 % 0,026

Tabelle 17 – Annahmen für die Anteile an der bereitgestellten thermischen Energie für das Komplexbeispiel

Energiesystem	Bezeichnung	Formelzeichen	Wert
A1	Kessel (Wärme)	$\phi_{A1,hd}$	10 %
A2	Abwärme (Wärme)	$\phi_{A2,hd}$	30 %
A3	KWK Anlage (Wärme)	$\phi_{A3,hd}$	45 %
A4	WKK-Anlage (Wärme)	$\phi_{A4,hd}$	15 %

Alle REFs sind Anhang A entnommen.

Kürzungen in entstehenden Gleichungen werden nicht vorgenommen, um eine einfachere Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten.

C.2 Carnotfaktoren für das Energiesystem

Zur Vereinfachung der Analyse des Energiesystems sollen an dieser Stelle Carnotfaktoren berechnet werden, welche für die Berechnung der Exergieflüsse notwendig sind. Sie werden entsprechend den Gleichungen (1), (2) und (3) ermittelt. Die Carnotfaktoren werden auf zwei Nachkommastellen gerundet, da die zur Berechnung verwendeten Temperaturen Mittelwerte über einen Zeitraum darstellen und somit als vereinfachte Annahmen zu betrachten sind.

C.2.1 Carnotfaktor des Bedarfs

Der Carnotfaktor des Bedarfs entspricht dem in Abschnitt B.3 berechneten.

$$f_{c,tg} = 0,04 \quad (66)$$

C.2.2 Carnotfaktor der Fernwärmeversorgung frei Wärmeerzeuger

$$\begin{aligned}
 f_{c,hd} &= 1 - \frac{T_0}{T_{m,hd}} \\
 &= 1 - \frac{T_0}{\left(\frac{T_{hd,sf} - T_{hd,rf}}{\ln\left(\frac{T_{hd,sf}}{T_{hd,rf}}\right)} \right)}
 \end{aligned} \quad (67)$$

$$= 1 - \frac{283,15K}{\left(\frac{343,15K - 313,15K}{\ln\left(\frac{343,15K}{313,15K}\right)} \right)}$$

$$= 0,14$$

C.2.3 Carnotfaktor der Wärme aus Tiefengeothermie KWK (A3)

Die Wärme der Tiefengeothermie wird genutzt bei der mittleren Temperatur der Wärmeübertragung. Dabei werden gemäß Abschnitt 9.8 jeweils nur die Temperaturen auf der Seite des Versorgungssystems betrachtet.

D. h. konkret: Die Temperatur der Geothermie ergibt sich als Mitteltemperatur aus Vor- und Rücklauftemperatur in Bezug auf die Bohrung. Dabei entspricht die höhere Temperatur der Vorlauftemperatur, welche für die Stromerzeugungsanlage bereitgestellt wird. Die niedrigere Temperatur der Geothermie, entspricht der Rücklauftemperatur des Fernwärmenetzes.

$$f_{C,ts,A3}$$

$$= 1 - \frac{T_0}{T_{m,ts}}$$

$$= 1 - \frac{T_0}{\left(\frac{T_{ts,sf,A3} - T_{hd,rf}}{\ln\left(\frac{T_{ts,sf,A3}}{T_{hd,rf}}\right)} \right)}$$
(68)

$$= 1 - \frac{283,15K}{\left(\frac{453,15K - 313,15K}{\ln\left(\frac{453,15K}{313,15K}\right)} \right)}$$

$$= 0,25$$

C.2.4 Carnotfaktor der Fernkälte

Für die Kälteversorgung wurden besonders niedrige Temperaturen angenommen, um beispielhaft zu zeigen, wie eine REA für Wärme-Kälte-Kopplung berechnet wird. Für Carnotfaktoren der Kälteversorgung von Null und höher werden bei Wärme-Kälte-Kopplung alle REV der Wärme zugeordnet werden. D. h. für diese Carnotfaktoren kann bei Wärme-Kälte-Kopplung auf eine Allokation verzichtet werden und die in Abschnitt 11.6.3 für diese Fälle dargestellten Regeln gelten.

$$f_{c,cd}$$

$$= \left| 1 - \frac{T_0}{T_{m,cd}} \right|$$

$$= \left| 1 - \frac{T_0}{\left(\frac{T_{cd,sf} - T_{cd,rf}}{\ln \left(\frac{T_{cd,sf}}{T_{cd,rf}} \right)} \right)} \right|$$

(69)

$$= \left| 1 - \frac{283,15K}{\left(\frac{277,15K - 283,15K}{\ln \left(\frac{277,15K}{283,15K} \right)} \right)} \right|$$

$$= |-0,01|$$

$$= 0,01$$

C.3 Nutzexergiebedarf des Versorgungsziels

Der Nutzexergiebedarf (NEB), der mit dem gesamten Energiepark gedeckt werden soll, errechnet sich gemäß Formel (12).

Für die Wärmeversorgung ergibt sich damit:

$$X_{u,d,hd} = f_{c,tg} \cdot Q_{d,hd} = 0,04 \cdot 100 \text{ MWh} = 4 \text{ MWh} \quad (70)$$

Der Wert ist auf eine Stelle nach dem Komma gerundet, da es sich um eine Monatsanalyse handelt, in der die Schwankungen der Außentemperatur weitere Nachkommastellen beeinflussen würden. In einigen Fällen sind die Schwankungen der Außentemperatur so hoch, dass ein Bereich angegeben werden müsste, in dem sich der NEB bewegt. Da der NEB allerdings nur eine Orientierungsgröße, aber keine für eine REA zentrale Vergleichsgröße darstellt, kann mit diesem Mittelwert des NEB weiter gerechnet werden.

Der elektrische NEB entspricht dem Strombedarf.

Der NEB der Kälte für das vorliegende Beispiel ist Null, da die Zieltemperatur höher ist als die Referenztemperatur. Damit ist es auch nicht sinnvoll, Exergieeffizienzen für die Kälteversorgung des

Beispiels zu berechnen. Dies wiederum illustriert, die mangelnde Eignung der Exergieeffizienz als universelle Vergleichsgröße für Energiesysteme.

C.4 Fernwärme aus einem Kessel mit grünem Wasserstoff aus Windkraft (A1)

Die anzuwendende Formel ist Formel (33). Eine Berücksichtigung des Heizwert-Brennwert-Verhältnisses ist nicht notwendig, da die verwendete Ressource nicht Gas, sondern erneuerbarer Strom ist.

$$\begin{aligned}
 X_{R,th,A1} &= (Q_d + Q_{l,s} + Q_{l,t}) \cdot \frac{f_{R,A1}}{\eta_{th}} \\
 &= Q_{d,hd} \cdot \frac{\phi_{hd,A1}}{\eta_{hd,t} \cdot \eta_{hd,s}} \cdot \frac{f_{R,el,wi}}{\eta_{A1,1} \cdot \eta_{A1,2}} \\
 &= 100 \text{ MWh} \cdot \frac{0,1}{0,88 \cdot 0,93} \cdot \frac{1,06}{0,9 \cdot 0,7} = \\
 &= 20,6 \text{ MWh}
 \end{aligned} \tag{71}$$

Der REF der Fernwärme aus A1 ergibt sich gemäß Formel (9) zu:

$$f_{R,A1} = \frac{X_R}{E} = \frac{X_{R,th,A1}}{Q_{d,hd} \cdot \phi_{hd,A1}} = \frac{20,6 \text{ MWh}}{100 \text{ MWh} \cdot 0,1} = 2,06 \tag{72}$$

Die REE der Versorgung mit der Fernwärme aus A1 ergibt sich gemäß Formel (15) zu:

$$\xi_{R,A1} = \frac{\sum_1^y |X_{d,out}|_y}{\sum_1^z |X_{R,in}|_z} = \frac{X_{d,hd} \cdot \phi_{hd,A1}}{X_{R,th,A1}} = \frac{4 \text{ MWh} \cdot 0,1}{20,6 \text{ MWh}} = 1,9 \% \tag{73}$$

C.5 Fernwärme aus industrieller Abwärme (A2)

Die anzuwendende Formel ist Formel (34). Die Temperatur der Abwärme wird nach Übergabe an die Fernwärme bestimmt und entspricht damit der Fernwärmemitteltemperatur am Erzeuger. Damit ist hier der Carnotfaktor der Fernwärme (0,14 aus Abschnitt C.2.2) als REF zu berücksichtigen.

$$\begin{aligned}
 X_{R,th,A2} &= (Q_d + Q_{l,s} + Q_{l,t}) \cdot f_{R,ts,in} \\
 &= (Q_d + Q_{l,s} + Q_{l,t}) \cdot f_{R,ts,in}
 \end{aligned} \tag{74}$$

$$\begin{aligned}
 &= Q_{d,hd} \cdot \frac{\phi_{hd,A2}}{\eta_{hd,t} \cdot \eta_{hd,s}} \cdot f_{R,ts,in} \\
 &= 100 \text{ MWh} \cdot \frac{0,3}{0,88 \cdot 0,93} \cdot 0,14 = 36,7 \text{ MWh} \cdot 0,14 = 5,1 \text{ MWh}
 \end{aligned}$$

Der REF der Fernwärme aus A2 ergibt sich gemäß Formel (9) zu:

$$f_{R,A2} = \frac{X_{R,th,A2}}{E_{A2}} = \frac{X_{R,th,A2}}{Q_{d,hd} \cdot \phi_{hd,A2}} = \frac{5,1 \text{ MWh}}{100 \text{ MWh} \cdot 0,3} = 0,17 \quad (75)$$

Die REE der Versorgung mit der Fernwärme aus A2 ergibt sich gemäß Formel (15) zu:

$$\xi_{R,A2} = \frac{\sum_1^y |X_{d,out}|_y}{\sum_1^z |X_{R,in}|_z} = \frac{X_{d,hd} \cdot \phi_{hd,A2}}{X_{R,th,A2}} = \frac{4 \text{ MWh} \cdot 0,3}{5,1 \text{ MWh}} = 23,5 \% \quad (76)$$

C.6 Fernwärme aus Tiefengeothermie Kraft-Wärme-Kopplung (A3)

C.6.1 Wärme

Zur Berechnung des REV der Wärme aus Kraft-Wärme-Kopplung kommen Formel (44) und Formel (53) zur Anwendung. Der Carnotfaktor (0,25) für die Wärme aus Tiefengeothermie wurde Abschnitt C.2.3 entnommen.

$$\begin{aligned}
 &X_{R,th,A3} \\
 &= (Q_d + Q_{l,s} + Q_{l,t}) \cdot \alpha_{th} \cdot \frac{f_{R,in}}{\eta_{th}} \\
 &= Q_{d,hd} \cdot \frac{\phi_{hd,A3}}{\eta_{hd,t} \cdot \eta_{hd,s}} \cdot \frac{X_{pr,th}}{X_{pr,el} + X_{pr,th}} \cdot \frac{f_{R,in}}{\eta_{th,A3}} \\
 &= Q_{d,hd} \cdot \frac{\phi_{hd,A3}}{\eta_{hd,t} \cdot \eta_{hd,s}} \cdot \frac{\eta_{th,A3} \cdot f_{C,hd}}{\eta_{el,A3} + \eta_{th,A3} \cdot f_{C,hd}} \cdot \frac{f_{R,in}}{\eta_{th,A3}} \\
 &= 100 \text{ MWh} \cdot \frac{0,45}{0,88 \cdot 0,93} \cdot \frac{0,75 \cdot 0,14}{0,15 + 0,75 \cdot 0,14} \cdot \frac{0,05 + 0,25}{0,75} \\
 &= 55,0 \text{ MWh} \cdot 0,41 \cdot \frac{0,3}{0,75} = 9,1 \text{ MWh}
 \end{aligned} \quad (77)$$

Der REF der Fernwärme aus A3 ergibt sich gemäß Formel (9) zu:

$$f_{R,A3} = \frac{X_R}{E} = \frac{X_{R,th,A3}}{Q_{d,hd} \cdot \phi_{hd,A3}} = \frac{9,1 \text{ MWh}}{100 \text{ MWh} \cdot 0,45} = 0,20 \quad (78)$$

Die REE von Wärme aus A3 berechnet sich zu:

$$\xi_{R,th,A3} = \frac{\sum_1^y |X_{d,out}|_y}{\sum_1^z |X_{R,in}|_z} = \frac{X_{d,hd} \cdot \phi_{hd,A3}}{X_{R,th,A3}} = \frac{4 \text{ MWh} \cdot 0,45}{9 \text{ MWh}} = 19,8 \% \quad (79)$$

C.6.2 Strom

Zur Berechnung des REV des KWK-Stroms kommt Formel (43) zur Anwendung. Es wird hier angenommen, dass die Temperatur der ausgekoppelten Wärme aus Tiefengeothermie-KWK der Temperatur im Fernwärmenetz entspricht. Der Carnotfaktor (0,25) für die Wärme aus Tiefengeothermie wurde Abschnitt C.2.3 entnommen.

Da die Stromproduktion der KWK-Anlage mit der Wärmeproduktion fix gekoppelt ist, kann der von der KWK-Anlage erzeugte Strom über den von der Geothermie-KWK gedeckten Wärmebedarf und dessen Deckungsanteil, sowie die Effizienzen über folgende Formel ermittelt werden.

$$\begin{aligned} & W_{d,A3} + W_{l,s,A3} + W_{l,t,A3} \\ &= Q_{d,hd} \cdot \frac{\phi_{A3,hd}}{\eta_{hd,t} \cdot \eta_{hd,s}} \cdot \frac{\eta_{el,A3}}{\eta_{th,A3}} \\ &= 100 \text{ MWh} \cdot \frac{0,45}{0,88 \cdot 0,93} \cdot \frac{0,15}{0,75} = 55,0 \text{ MWh} \cdot \frac{0,15}{0,75} = 11,0 \text{ MWh} \end{aligned} \quad (80)$$

Damit ergibt sich der REV für den Strom aus A3 zu:

$$\begin{aligned} & X_{R,el,A3} \\ &= (W_d + W_{l,s} + W_{l,t}) \cdot \alpha_{el} \cdot \frac{f_{R,in}}{\eta_{el}} \\ &= (W_{d,A3} + W_{l,s,A3} + W_{l,t,A3}) \cdot \frac{X_{pr,el}}{X_{pr,el} + X_{pr,th}} \cdot \frac{f_{R,in,A3}}{\eta_{el,A3}} \\ &= (W_{d,A3} + W_{l,s,A3} + W_{l,t,A3}) \cdot \frac{\eta_{el,A3}}{\eta_{el,A3} + \eta_{th,A3} \cdot f_{C,hd}} \cdot \frac{f_{R,in,A3}}{\eta_{el,A3}} \\ &= 11,0 \text{ MWh} \cdot \frac{0,15}{0,15 + 0,75 \cdot 0,14} \cdot \frac{0,30}{0,15} \end{aligned} \quad (81)$$

$$= 11,0 \text{ MWh} \cdot 0,59 \cdot \frac{0,30}{0,15} = 12,9 \text{ MWh}$$

Die korrekte Allokation kann geprüft werden, indem auf eine Allokation verzichtet wird und der REV für Strom und Wärme mit der Summe der allokierten REVs verglichen wird:

$$\begin{aligned} X_{R,A3} &= X_{R,el,A3} + X_{R,th,A3} \\ &= \left(Q_{d,hd} \cdot \frac{\phi_{A3,hd}}{\eta_{hd,t} \cdot \eta_{hd,s}} \right) \cdot \frac{f_{R,in,A3}}{\eta_{th,A3}} \\ &= \left(100 \text{ MWh} \cdot \frac{0,45}{0,88 \cdot 0,93} \right) \cdot \frac{0,05 + 0,25}{0,75} = 55,0 \text{ MWh} \cdot \frac{0,30}{0,75} \\ &= 22,0 \text{ MWh} = 12,9 \text{ MWh} + 9,1 \text{ MWh} \end{aligned} \quad (82)$$

Die Summe aller Allokationsfaktoren ergibt dabei 1.

$$\begin{aligned} \alpha_{el} + \alpha_{th} &= \frac{\eta_{el,A3}}{\eta_{el,A3} + \eta_{th,A3} \cdot f_{C,hd}} + \frac{\eta_{th,A3} \cdot f_{C,hd}}{\eta_{el,A3} + \eta_{th,A3} \cdot f_{C,hd}} \\ &= \frac{\eta_{el,A3} + \eta_{th,A3} \cdot f_{C,hd}}{\eta_{el,A3} + \eta_{th,A3} \cdot f_{C,hd}} = 0,59 + 0,41 = 1 \end{aligned} \quad (83)$$

Da der KWK-Strom nur mit eigenen Gewichtungsfaktoren berücksichtigt werden kann, wenn er nicht in das Netz sondern direkt an das Versorgungsziel geliefert wird, werden zur Berechnung des REF des Stroms beim Versorgungsziel noch Transportverluste bei der Eigenstromversorgung berücksichtigt. Der REF des Stromes aus A3 ergibt sich gemäß Formel (9) zu:

$$f_{R,el,A3} = \frac{X_R}{E} = \frac{X_{R,el,A3}}{W_{d,el,A3}} = \frac{12,9 \text{ MWh}}{11 \text{ MWh} \cdot 0,99} = 1,18 \quad (84)$$

Die REE der Versorgung mit Strom aus A3 ergibt sich gemäß Formel (15) zu:

$$\xi_{R,elA3} = \frac{\sum_1^y |X_{d,out}|_y}{\sum_1^z |X_{R,in}|_z} = \frac{W_{d,el,A3}}{X_{R,el,A3}} = \frac{1}{f_{R,el,A3}} = \frac{1}{1,18} = 84,4 \% \quad (85)$$

Die REE für den Strom aus Geothermie-KWK kann ungewöhnlich hoch sein – D. h. oberhalb von 60 % liegen -, da im Gegensatz zu brennstoffbasierten KWK-Anlagen keine Exergievernichtung durch Verbrennung stattfindet und keine Exergievernichtung durch Wärmeübertragung von der geothermischen Quelle zum Versorgungssystem berücksichtigt wird.

C.7 Fernwärme und Fernkälte aus einer Großwärmepumpe mit Wärme-Kälte-Kopplung und Strom aus Photovoltaik (A4)

C.7.1 Allgemein

Das Komplexbeispiel wurde so konstruiert, dass eine WKK-Allokation notwendig ist, um diese zu demonstrieren. D.h. die WKK-Anlage produziert Wärme oberhalb und Kälte unterhalb der Referenztemperatur.

Dabei ist zu beachten, dass die Allokation auf Wärme- und Kälte auf Basis der Temperaturen an der Anlage stattfindet. Trotz dem der Kälte zugeordnetem REV wird im Komplexbeispiel kein Exergiebedarf gedeckt, da die Zieltemperatur für die Kühlung oberhalb der Referenztemperatur liegt. In diesem Fall wird also die Exergie der Kälte bei Deckung des Bedarfs vernichtet.

Für die Beschleunigung des natürlichen Abkühlvorgangs durch die betrachtete WKK-Anlage entsteht dennoch ein REV für die Kälteversorgung.

Für WKK-Anlagen, bei denen die von der Anlage bereitgestellten Temperaturen sowohl des Wärme- als auch Kältebedarfs oberhalb der Referenztemperatur sind, müsste entsprechend Abschnitt 11.6.3 der gesamte REV der Wärme zugeordnet werden.

C.7.2 Kälteentzug, als Grundlage für die Allokation

Für Wärmepumpen mit Wärme-Kälte-Kopplung ist die erzeugte Kälte eine Funktion der erzeugten Wärme, die mit der Energiebilanz auf Basis der Herleitungen in Anhang E bestimmt werden kann, falls keine Messwerte vorliegen:

$$\begin{aligned}
 Q_{cd,A4} &= Q_{d,hd,A4} \cdot \frac{\phi_{hd,A4}}{\eta_{hd,t} \cdot \eta_{hd,s}} - W_{el,A4} \\
 &= Q_{d,hd,A4} \cdot \frac{\phi_{hd,A4}}{\eta_{hd,t} \cdot \eta_{hd,s}} - \frac{Q_{d,hd,A4} \cdot \frac{\phi_{hd,A4}}{\eta_{hd,t} \cdot \eta_{hd,s}}}{\gamma_{hd,A4}} \\
 &= Q_{d,hd} \cdot \frac{\phi_{hd,A4}}{\eta_{hd,t} \cdot \eta_{hd,s}} \cdot \left(1 - \frac{1}{\gamma_{hd,A4}}\right) \\
 &= \left(100 \text{ MWh} \cdot \frac{0,15}{0,88 \cdot 0,93}\right) \cdot \left(1 - \frac{1}{3,0}\right) = 18,3 \text{ MWh} \cdot \frac{2}{3} \\
 &= 12,2 \text{ MWh}
 \end{aligned} \tag{86}$$

C.7.3 Wärme

Zur Berechnung des REV der Wärme aus Wärme-Kälte-Kopplung kommen Formel (44) und Formel (53) zur Anwendung.

$$\begin{aligned}
 X_{R,hd,A4} &= (Q_d + Q_{l,s} + Q_{l,t}) \cdot \alpha_{hd} \cdot \frac{f_{R,dr}}{\gamma_{hd,A4}} \\
 &= Q_{d,hd} \cdot \frac{\phi_{hd,A4}}{\eta_{hd,t} \cdot \eta_{hd,s}} \cdot \frac{X_{pr,hd,A4}}{X_{pr,cd,A4} + X_{pr,hd,A4}} \cdot \frac{f_{R,el,PV}}{\gamma_{hd,A4}} \\
 &= Q_{d,hd} \cdot \frac{\phi_{hd,A4}}{\eta_{hd,t} \cdot \eta_{hd,s}} \cdot \frac{Q_{d,hd} \cdot \phi_{hd,A4} \cdot f_{C,hd}}{Q_{cd,A4} \cdot f_{C,cd} + Q_{d,hd} \cdot \phi_{hd,A4} \cdot f_{C,hd}} \cdot \frac{f_{R,el,PV}}{\gamma_{hd,A4}} \quad (87) \\
 &= \left(100 \text{ MWh} \cdot \frac{0,15}{0,88 \cdot 0,93} \right) \cdot \frac{100 \text{ MWh} \cdot 0,15 \cdot 0,14}{12,2 \text{ MWh} \cdot 0,01 + 100 \text{ MWh} \cdot 0,15 \cdot 0,14} \cdot \frac{1,21}{3,0} \\
 &= 18,3 \text{ MWh} \cdot 0,9 \cdot \frac{1,21}{3,0} \\
 &= 7,0 \text{ MWh}
 \end{aligned}$$

Der REF der Fernwärme aus A4 ergibt sich gemäß Formel (9) zu:

$$f_{R,A4} = \frac{X_R}{E} = \frac{X_{R,th,A4}}{Q_{d,hd} \cdot \phi_{hd,A4}} = \frac{7 \text{ MWh}}{100 \text{ MWh} \cdot 0,15} = 0,47 \quad (88)$$

Die REE von Wärme aus A4 berechnet sich zu:

$$\xi_{R,th,A4} = \frac{\sum_1^y |X_{d,out}|_y}{\sum_1^z |X_{R,in}|_z} = \frac{X_{d,hd} \cdot \phi_{hd,A4}}{X_{R,th,A4}} = \frac{4 \text{ MWh} \cdot 0,15}{7 \text{ MWh}} = 8,6 \% \quad (89)$$

C.7.4 Kälte

Die Berechnung des REV des letzten unbekanntes Produktes einer Koppelproduktion erfolgt am einfachsten über eine Subtraktion des allozierten REV der bereits bekannten Produkte vom gesamten REV.

$$\begin{aligned}
 X_{R,cd,A4} &= X_{R,A4} - X_{R,hd,A4} \quad (90)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= (Q_d + Q_{l,s} + Q_{l,t}) \cdot \frac{f_{R,dr}}{\gamma_{hd,A4}} - \left((Q_d + Q_{l,s} + Q_{l,t}) \cdot \alpha_{hd} \cdot \frac{f_{R,dr}}{\gamma_{hd,A4}} \right) \\
 &= (Q_d + Q_{l,s} + Q_{l,t}) \cdot \frac{f_{R,el,PV}}{\gamma_{hd,A4}} \cdot (1 - \alpha_{hd,A4}) \\
 &= \left(100 \text{ MWh} \cdot \frac{0,15}{0,88 \cdot 0,93} \right) \cdot \frac{1,21}{3,0} \\
 &\quad \cdot \left(1 - \frac{100 \text{ MWh} \cdot 0,15 \cdot 0,14}{12,2 \text{ MWh} \cdot 0,01 + 100 \text{ MWh} \cdot 0,15 \cdot 0,14} \right) \\
 &= 18,3 \text{ MWh} \cdot \frac{1,21}{3,0} \cdot 0,1 \\
 &= 0,4 \text{ MWh}
 \end{aligned}$$

Der REF der Fernkälte aus A4 ergibt sich gemäß Formel (9) zu:

$$f_{R,A4} = \frac{X_R}{E} = \frac{X_{R,th,A4}}{Q_{d,cd}} = \frac{0,4 \text{ MWh}}{12,2 \text{ MWh}} = 0,03 \quad (91)$$

Die REE von Kälte aus A4 ist null, da die Temperatur des Versorgungsziels oberhalb der Referenztemperatur liegt und somit der Exergiebedarf für die Kühlung gleich Null ist. Das widerspricht nicht der Tatsache, dass der zur Kühlung eingesetzte Wärmestrom mit einem Exergiestrom verknüpft ist. Die „Kälteexergie“ des Kühlmediums wird bei der Erfüllung der Kühlaufgabe vernichtet, da kein thermodynamischer Kältebedarf besteht, sondern die Kälte nur zur Beschleunigung natürlicher Vorgänge eingesetzt wird.

C.8 Fernkälte aus direkter Kühlung mit Flusswasser (A5)

Die anzuwendende Formel ist Formel (34). Die Temperatur der direkten Kühlung wird nach Übergabe an die Fernkälte bestimmt und entspricht damit der Fernkältetemperatur am Erzeuger.

Da die gelieferte Kältemenge vorgegeben ist, aber auch die von der WKK-Anlage A4 erzeugte Kälte aus Formel (86) bekannt ist, ergibt sich die durch direkte Kühlung produzierte Kälte als:

$$\begin{aligned}
 Q_{cd,A5} &= (Q_{d,cd,A5} + Q_{l,s,cd,A5} + Q_{l,t,cd,A5}) \\
 &= (Q_{d,cd} + Q_{l,s,cd} + Q_{l,t,cd} - Q_{cd,A4}) \\
 &= \left(\frac{Q_{d,cd}}{\eta_{cd,t} \cdot \eta_{cd,s}} - Q_{cd,A4} \right)
 \end{aligned} \quad (92)$$

$$= \left(\frac{40 \text{ MWh}}{0,95 \cdot 0,98} - 12,2 \text{ MWh} \right)$$

$$= 30,8 \text{ MWh}$$

Damit ergibt sich für den REV der direkt dem Fluss entnommenen Fernkälte:

$$X_{R,cd,A5} = Q_{cd,A5} \cdot f_{R,ts,in} = 30,8 \text{ MWh} \cdot 0,01 = 0,03 \text{ MWh} \quad (93)$$

Der REF der an das Versorgungsziel gelieferten Fernkälte aus A5 ergibt sich gemäß Formel (9) zu Formel (94).

$$f_{R,A5}$$

$$= \frac{X_{R,cd,A5}}{Q_{cd,A5} \cdot \eta_{cd,t} \cdot \eta_{cd,s}} \quad (94)$$

$$= \frac{0,3 \text{ MWh}}{30,8 \text{ MWh} \cdot 0,95 \cdot 0,98} = \frac{0,3 \text{ MWh}}{28,6 \text{ MWh}} = 0,01 \text{ MWh}$$

Die REE der Versorgung mit der Fernkälte aus A5 ist gleich null, da die Temperatur, auf der der Raum gehalten werden soll, oberhalb der Referenztemperatur liegt. Das heißt die Kälteversorgung wird nur genutzt, um einen natürlichen Vorgang zu beschleunigen.

C.9 Hilfsstrom des Erzeugerparks (A6)

Der REV für die Bereitstellung des Hilfsstroms entspricht dem REV des Strombezugs aus dem öffentlichen Netz für den Betrieb des Erzeugerparks. Dabei muss berücksichtigt werden, dass der Hilfsstrom, welcher für den Betrieb der WKK-Anlage notwendig ist, bereits in der Aufwandszahl der Anlage berücksichtigt ist und somit nicht zum Hilfsstrom des Erzeugerparks gezählt wird.

Da der REV des Hilfsstroms für die Bestimmung der REFs von Wärme und Kälte aus dem Erzeugerpark beiden Produkten separat zugeordnet werden soll, muss er separat für die Wärme und für die Kältebereitstellung berechnet werden.

Für den REV des Hilfsstromverbrauchs der Wärme ergibt sich:

$$X_{R,A6,hd}$$

$$= \left(\frac{(\omega_{aux,hd,t} + \omega_{aux,A1} \cdot \phi_{A1} + \omega_{aux,A2} \cdot \phi_{A2})}{(Q_{d,hd} + Q_{l,s,hd} + Q_{l,t,hd})} \right) \cdot f_{R,el,pm} \quad (95)$$

$$= \left((0,015 + 0,002 \cdot 0,1 + 0,005 \cdot 0,003) \cdot \frac{100 \text{ MWh}}{0,88 \cdot 0,93} \right) \cdot 2,63$$

$$= 2,0 \text{ MWh} \cdot 2,63 = 5,4 \text{ MWh}$$

Für den REV des Hilfsstromverbrauchs der Kälte ergibt sich:

$$\begin{aligned} X_{R,A6,cd} &= (\omega_{aux,cd,t} \cdot (Q_{d,cd} + Q_{l,s,cd} + Q_{l,t,cd}) + \omega_{aux,A5} \cdot Q_{cd,A5}) \cdot f_{R,el,pm} \\ &= \omega_{aux,cd,t} \cdot (Q_{cd,A4} + Q_{cd,A5}) + \omega_{aux,A5} \cdot Q_{cd,A5} \quad (96) \\ &= 0,035 \cdot (12,2 \text{ MWh} + 30,8 \text{ MWh}) + 0,026 \cdot 30,8 \text{ MWh} \\ &= 6,1 \text{ MWh} \end{aligned}$$

Auf die Berechnung von REF als auch der REE des Hilfsstroms kann verzichtet werden, da diese dem REF bzw. der REE (siehe Formel (63)) des eingesetzten Stroms entsprechen.

Somit ist der REV des Komplexbeispiels:

$$X_{R,A6} = X_{R,aux,hd} + X_{R,aux,cd} = 5,4 \text{ MWh} + 6,1 \text{ MWh} = 11,5 \text{ MWh} \quad (97)$$

C.10 Stromverbrauch aus dem Stromnetz (17)

Der REV des Stromverbrauchs aus dem Netz berechnet sich nach Abschnitt 9.2 als Produkt aus dem Strombedarf und dem REF des Netzstroms. Da ein Teil des Strombedarfs aus der Geothermie-KWK gedeckt wird, wird der Strombedarf aus dem Netz entsprechend reduziert.

$$\begin{aligned} X_{R,17} &= (W_d - (W_{d,A3} + W_{l,s,A3} + W_{l,t,A3})) \cdot f_{R,el,pm} \\ &= \left(W_d - \left(Q_{d,hd} \cdot \frac{\phi_{A3,hd}}{\eta_{hd,t} \cdot \eta_{hd,s}} \cdot \frac{\eta_{el,A3}}{\eta_{th,A3}} \right) \right) \cdot f_{R,el,pm} \quad (98) \\ &= \left(30 \text{ MWh} - \left(100 \text{ MWh} \cdot \frac{0,45}{0,88 \cdot 0,93} \cdot \frac{0,15}{0,75} \right) \right) \cdot 2,63 \\ &= 50 \text{ MWh} \end{aligned}$$

Der REF entspricht dem REF des elektrischen Stroms aus dem Netz.

Die REE berechnet sich nach Formel (63).

C.11 Gesamtsystem des Komplexbeispiels

C.11.1 Wärme

Der REV der Wärme beträgt:

$$\begin{aligned}
 X_{R,hd} &= \sum_1^y X_{R,in,y,hd} \\
 &= X_{R,A1} + X_{R,A2} + X_{R,th,A3} + X_{R,hd,A4} + X_{R,A6,hd} \\
 &= (20,6 + 5,1 + 9,1 + 7 + 5,4) \text{ MWh} = 47,2 \text{ MWh}
 \end{aligned} \tag{99}$$

Der mittlere REF der Fernwärme aus dem Komplexbeispiel ergibt sich mit Formel (10) zu:

$$f_{R,avg,hd} = \frac{X_{R,hd}}{E_{d,hd}} = \frac{47,2 \text{ MWh}}{100 \text{ MWh}} = 0,47 \tag{100}$$

Die mittlere REE der Wärmeversorgung bezogen auf das Versorgungsziel ergibt sich damit zu:

$$\xi_{R,avg,hd} = \frac{f_{C,hd}}{f_{R,avg,hd}} = \frac{0,04}{0,47} = 8,5 \% \tag{101}$$

C.11.2 Kälte

Der REV der Kälte beträgt:

$$\begin{aligned}
 X_{R,cd} &= \sum_1^y X_{R,in,y,cd} \\
 &= X_{R,A4,cd} + X_{R,A5} + X_{R,A6,cd} \\
 &= (0,4 + 0,3 + 6,2) \text{ MWh} = 6,9 \text{ MWh}
 \end{aligned} \tag{102}$$

Bei der Fernkälteversorgung wird deutlich, dass insbesondere bei Versorgung mit niedriger Energiequalität der REV des Hilfsstroms, die vorrangige Ursache für REV sein kann und daher auch bei relativ kleinen Bedarfen berücksichtigt werden muss.

Der mittlere REF der Fernkälte aus dem Energiepark ergibt sich mit Formel (10) zu:

$$f_{R,avg,cd} = \frac{X_{R,cd}}{E_{d,cd}} = \frac{6,9 \text{ MWh}}{40 \text{ MWh}} = 0,17 \quad (103)$$

Die mittlere REE der Kälteversorgung bezogen auf das Versorgungsziel ist gleich null, da die Zieltemperatur des Raums oberhalb der Referenztemperatur liegt.

C.11.3 Strom

Der REV des Stromverbrauchs beträgt:

$$X_{R,el} = \sum_{A1}^y X_{R,in,y} = X_{R,el,A3} + X_{17} = 12,9 \text{ MWh} + 50 \text{ MWh} = 62,9 \text{ MWh} \quad (104)$$

Der mittlere REF der Stromversorgung aus dem Energiepark ergibt sich mit Formel (10) zu:

$$f_{R,avg,el} = \frac{X_{R,el}}{E_{d,el}} = \frac{62,9 \text{ MWh}}{30 \text{ MWh}} = 2,1 \quad (105)$$

Die mittlere REE der Stromversorgung bezogen auf das Versorgungsziel ergibt sich damit zu:

$$\xi_{R,avg,el} = \frac{1}{f_{R,avg,el}} = 47,7 \% \quad (106)$$

C.11.4 Gesamt

Der gesamte REV des Komplexbeispiels beträgt:

$$\begin{aligned} X_{R,com} &= \sum_{A1}^y X_{R,in,y} = X_{R,hd} + X_{R,cd} + X_{R,el} + X_{R,A6} \\ &= 47,2 \text{ MWh} + 6,9 \text{ MWh} + 62,9 \text{ MWh} + 11,5 \text{ MWh} = 128,5 \text{ MWh} \end{aligned} \quad (107)$$

Der REV des Gesamtsystems ist eine Bewertungsgröße, die es erlaubt das Komplexbeispiel mit dem Analysebeispiel aus Anhang B zu vergleichen und die Einsparpotenziale zu ermitteln. Ein solcher Vergleich ist in Anhang D dargestellt.

Der mittlere REF der Energieversorgung aus dem Energiepark ergibt sich mit Formel (10) zu:

$$f_{R,avg,com} = \frac{X_R}{E_{d,hd} + E_{d,cd} + E_{d,el}} = \frac{128,5 \text{ MWh}}{100 \text{ MWh} + 40 \text{ MWh} + 30 \text{ MWh}} = 0,69 \quad (108)$$

Bei der Berechnung des REF (gesamt) werden Hilfsströme nicht im Nenner berücksichtigt.

Der Gesamt-REF gesamt ist als informative Größe zu betrachten, da seine Aussagekraft aufgrund des Bezugs auf Energieflüsse unterschiedlicher Energiequalität stark begrenzt ist. REFs sind vorrangig

bei der Auswahl und dem Vergleich von Versorgungssystemen für Wärme, Kälte und Strom hilfreich und sollten generell vorrangig zur Charakterisierung von spezifischen Energieflüssen eingesetzt werden.

Die mittlere REE der Kälteversorgung bezogen auf das Versorgungsziel ist für den Fall einer Kühlung oberhalb der Referenz definitionsgemäß gleich null. D. h. REE ist für Kühlung oberhalb der Referenztemperatur weder zur Charakterisierung noch zum Vergleich verschiedener Systeme geeignet, da Kühlprozesse mit Zieltemperaturen oberhalb der Referenztemperatur aus thermodynamischer Sicht grundsätzlich vermeidbar sind und nur einen natürlich ablaufenden Vorgang beschleunigen. Vor diesem Hintergrund kann im Allgemeinen auf die Berechnung einer REE (gesamt) verzichtet werden.

Anhang D Vergleich von Versorgungs- und Energiesystemen mit der REA

D.1 Allgemeines

In Anhang B und Anhang C wurden zwei Energiesysteme analysiert, welche an dieser Stelle verglichen werden sollen. Da beide Energiesysteme dem Nutzer die gewünschten Umgebungsbedingungen bereitstellen, sind sie trotz unterschiedlicher Energiebedarfe vergleichbar.

Tabelle 18 – Energiebedarfe der verglichenen Energiesysteme

	Referenzbeispiel (Anhang B)	Komplexbeispiel (Anhang C)
Wärmebedarf in MWh	80	100
Kältebedarf in MWh	25	40
Strombedarf in MWh	20	30

D.2 Vergleich von Energiesystemen mit der REA

Die Reduktion des REV durch das Komplexbeispiel (com) im Vergleich zum Referenzbeispiel (ref) ergibt sich als:

$$\Delta X_R = X_{R,ref} - X_{R,com} = 197,1 \text{ MWh} - 128,5 \text{ MWh} = 68,6 \text{ MWh} \quad (109)$$

Häufig ist es sinnvoll auch die relative Einsparung zu berechnen, da diese ein universales Maß darstellt, wie viel besser oder schlechter ein gegebenes Energiesystem im Vergleich zu einem Referenzenergiesystem ist, welches den gleichen Bedarf (in diesem Fall: Komfort der Bewohner) deckt. Auch wenn der Bedarf (Komfort der Bewohner) gleich ist, kann sich der Energiebedarf unterscheiden, wenn z. B. Maßnahmen zur Dämmung durchgeführt wurden oder der Strombedarf ohne Komfortverluste gesenkt wurde, z. B. durch effiziente Elektrogeräte.

$$\frac{\Delta X_R}{X_{R,ref}} = \frac{68,6 \text{ MWh}}{197,1 \text{ MWh}} = 35 \% \quad (110)$$

Zur Illustration der eingeschränkten Eignung des REF für den Vergleich von Energiesystemen sollen an dieser Stelle beide Gesamt-REFs verglichen werden.

$$\Delta f_R = f_{R,ref} - f_{R,com} = 1,58 - 0,76 = 0,83 \quad (111)$$

Die relative Einsparung an RE pro Energieeinheit wird auf Basis der entsprechenden REFs berechnet und ergibt sich zu:

$$\frac{\Delta f_R}{f_{R,ref}} = \frac{0,83}{1,58} = 52 \% \quad (112)$$

Bei diesem Vergleich wird deutlich, dass die Veränderung des REF von der Veränderung des REV abweicht, da Energieverbrauchsänderungen zwischen beiden Varianten im REF nicht berücksichtigt werden.

Da nicht nur Versorgungssysteme, sondern Gesamtsysteme aus Versorgungssystem und Versorgungsziel optimiert werden müssen, kann der REF nur als konsistente Vergleichsgröße verwendet werden, falls das Versorgungsziel bei allen untersuchten Varianten den gleichen energetischen Bedarf aufweist oder die Frage nach Unterschieden in den Versorgungssystemen beantwortet werden soll.

D.3 Wärme

Die Reduktion des REV für die Wärmeversorgung durch das Komplexbeispiel (com) im Vergleich zum Referenzbeispiel (ref) ergibt sich als:

$$\Delta X_{R,hd} = X_{R,hd,ref} - X_{R,hd,com} = 111,6 \text{ MWh} - 47,2 \text{ MWh} = 64,4 \text{ MWh} \quad (113)$$

Die relative Einsparung des REV für die Wärme ergibt sich damit zu:

$$\frac{\Delta X_{R,hd}}{X_{R,hd,ref}} = \frac{64,4 \text{ MWh}}{111,6 \text{ MWh}} = 58 \% \quad (114)$$

Für den Vergleich der Wärmeversorgungssysteme wird die Differenz der REF berechnet.

$$\Delta f_{R,hd} = f_{R,hd,ref} - f_{R,hd,com} = 1,4 - 0,47 = 0,93 \quad (115)$$

Die relative Einsparung bei der Wärmeversorgung auf Basis des REF ergibt sich zu:

$$\frac{\Delta f_{R,hd}}{f_{R,hd,ref}} = \frac{0,93}{1,4} = 66 \% \quad (116)$$

D.4 Kälte

Die Reduktion des REV für die Kälteversorgung durch das Komplexbeispiel (com) im Vergleich zum Referenzbeispiel (ref) ergibt sich als:

$$\Delta X_{R,cd} = X_{R,cd,ref} - X_{R,cd,com} = 32,9 \text{ MWh} - 6,9 \text{ MWh} = 26,0 \text{ MWh} \quad (117)$$

Die relative Einsparung des REV für die Kälteversorgung im Energiesystem ergibt sich damit zu:

$$\frac{\Delta X_{R,cd}}{X_{R,cd,ref}} = \frac{26 \text{ MWh}}{32,9 \text{ MWh}} = 79 \% \quad (118)$$

Für den Vergleich der Kälteversorgungssysteme wird die Differenz der REFs berechnet.

$$\Delta f_{R,cd} = f_{R,cd,ref} - f_{R,cd,com} = 1,32 - 0,17 = 1,15 \quad (119)$$

Die relative Einsparung bei der Kälteversorgung auf Basis des REF ergibt sich zu:

$$\frac{\Delta f_{R,cd}}{f_{R,cd,ref}} = \frac{1,15}{1,32} = 87 \% \quad (120)$$

D.5 Strom

Die Reduktion des REV für die Stromversorgung durch das Komplexbeispiel (com) im Vergleich zum Referenzbeispiel (ref) ergibt sich als:

$$\Delta X_{R,el} = X_{R,el,ref} - X_{R,el,com} = 52,6 \text{ MWh} - 62,9 \text{ MWh} = -10,3 \text{ MWh} \quad (121)$$

Ein negativer Wert bedeutet hier, dass mehr RE verbraucht wurde, im Vergleich zum Referenzsystem. Die relative Einsparung an REV für Strom ergibt sich damit zu.

$$\frac{\Delta X_{R,el}}{X_{R,el,ref}} = \frac{-10,3 \text{ MWh}}{52,6 \text{ MWh}} = -20 \% \quad (122)$$

Für den Vergleich der Stromversorgungssysteme wird die Differenz der REF berechnet.

$$\Delta f_{R,cd} = f_{R,el,ref} - f_{R,el,com} = 2,63 - 2,10 = 0,53 \quad (123)$$

Die relative Einsparung bei der Stromversorgung auf Basis des REF ergibt sich zu:

$$\frac{\Delta f_{R,el}}{f_{R,el,ref}} = \frac{0,53}{2,63} = 20 \% \quad (124)$$

Hier wird deutlich, dass auch mit ressourcenschonenderen Energieversorgungssystemen ein höherer REV verursacht werden kann, wenn ein erhöhter Bedarf die Einsparungen bei der Energieversorgung überkompensiert.

D.6 Auswertung

Tabelle 19 - Annahmen und Ergebnisse der REA für die betrachteten Beispiele in Anhang B (Referenzbeispiel) und Anhang C (Komplexbeispiel)

	Wärme Referenzbeispiel	Wärme Komplexbeispiel	Kälte Referenzbeispiel	Kälte Komplexbeispiel	Strom Referenzbeispiel	Strom Komplexbeispiel	Gesamt Referenzbeispiel	Gesamt Komplexbeispiel
Bedarf in MWh	80	100	25	40	20	30	125	170
REV in MWh	111,6	47,2	32,9	6,9	52,6	62,9	197,1	128,5
REF	1,4	0,47	1,32	0,17	2,63	2,10	1,58	0,76

Tabelle 20 - Zusammenfassung der Einsparungen des Komplexbeispiels aus Anhang C gegenüber dem Referenzbeispiel aus Anhang B

	REV Wärme	REF Wärme	REV Kälte	REF Kälte	REV Strom	REF Strom	REV gesamt	REF gesamt
Einsparung	58 %	66 %	79 %	87 %	-20 %	20 %	35 %	52 %

Aus diesen beiden Ergebnistabellen wird ersichtlich, dass das Referenzbeispiel aus Anhang B wesentlich mehr Ressourcen verbraucht als das Komplexbeispiel aus Anhang C. Nur im Bereich Strom ist der REV des komplexen Beispiels größer als der der Referenz, was durch negative Einsparungswerte offensichtlich wird. Der Vergleich der REF in diesem Fall macht deutlich, dass das Versorgungssystem dennoch ressourcenschonender ist. Aufgrund des gegenüber der Referenz um 50 % erhöhten Bedarfs im Komplexbeispiel, reicht die REF-Reduktion (20 %) für eine REV-Einsparung im Bereich Strom allerdings nicht aus.

Es wird offensichtlich, dass die Einsparungen ungleich verteilt sind. So wird beim Vergleich der REFs offensichtlich, dass das Energieversorgungssystem des komplexen Beispiels wesentlich ressourcenschonender arbeitet als das Referenzenergieversorgungssystem. Die Einsparungen bei den REFs sind stets größer als beim REV.

Durch den geringeren Bedarf des Referenzenergiesystems, der beispielsweise durch bessere Dämmung und effizientere Hausgeräte erreicht werden kann, sind die Einsparungen im Bereich des REV also im Vergleich der gesamten Energiesysteme geringer als beim Vergleich der REFs.

Der Vergleich macht ersichtlich, dass in Abhängigkeit von der Vergleichsaufgabe unterschiedliche Vergleichsgrößen angewendet werden sollten.

Sollen nur Versorgungssysteme ausgewählt werden, würden REFs verglichen. Aufgrund der Mitbetrachtung des Bedarfs bietet ein Vergleich von REVs jedoch die größere Sicherheit, die richtige Wahl von Energiesystemen zu treffen. Daher sollte sich jede Anwendung von REA im Allgemeinen auf den Vergleich von RECs konzentrieren.

Anhang E Herleitungen

Im Folgenden sind einige, in der REA verwendete Formel­ausdrücke zur besseren Nachvollziehbarkeit hergeleitet.

Dabei werden die Umformungen der Formeln jeweils nur mit einer Sammelnummer gekennzeichnet.

Energiebilanz einer Wärmepumpe oder Kältemaschine:

$$E_{dr} + Q_{cd} = Q_{hd} \tag{125}$$

$$E_{dr} = Q_{hd} - Q_{cd}$$

Dabei ist

E_{dr} Antriebsenergie

Q_{cd} Aufgenommene Wärme bzw. produzierte Kälte

Q_{hd} Abgegebene Wärme

Herleitung der abgegebenen Wärme, wenn die Kältemenge und die Antriebsenergie bekannt sind:

$$\gamma_{cd} = \frac{E_{cd}}{E_{dr}} = \frac{E_{cd}}{E_{hd} - E_{cd}}$$

$$\gamma_{cd} \cdot (E_{hd} - E_{cd}) = E_{cd}$$

$$\gamma_{cd} \cdot E_{hd} - \gamma_{cd} \cdot E_{cd} = E_{cd} \tag{126}$$

$$\gamma_{cd} \cdot E_{hd} = \gamma_{cd} \cdot E_{cd} + E_{cd}$$

$$E_{hd} = E_{cd} + \frac{E_{cd}}{\gamma_{cd}} = E_{cd} \cdot \left(1 + \frac{1}{\gamma_{cd}} \right)$$

Dabei ist

E_{dr}	Antriebsenergie
Q_{cd}	Aufgenommene Wärme bzw. produzierte Kälte
Q_{hd}	Abgegebene Wärme
γ_{cd}	Arbeitszahl der Kältebereitstellung im betrachteten Zeitschritt

Herleitung der aufgenommenen Wärme bzw. produzierten Kälte, wenn die Wärmemenge und die Antriebsenergie bekannt sind:

$$\gamma_{hd} = \frac{E_{hd}}{E_{dr}} = \frac{E_{hd}}{E_{hd} - E_{cd}}$$

$$\gamma_{hd} \cdot (E_{hd} - E_{cd}) = E_{hd}$$

$$\gamma_{hd} \cdot E_{hd} - \gamma_{hd} \cdot E_{cd} = E_{hd}$$

$$-\gamma_{hd} \cdot E_{cd} = -\gamma_{hd} \cdot E_{hd} + E_{hd}$$

$$\gamma_{hd} \cdot E_{cd} = \gamma_{hd} \cdot E_{hd} - E_{hd}$$

$$E_{cd} = E_{hd} - \frac{E_{hd}}{\gamma_{hd}} = E_{hd} \cdot \left(1 - \frac{1}{\gamma_{hd}}\right)$$
(127)

Dabei ist

E_{dr}	Antriebsenergie
Q_{cd}	Aufgenommene Wärme bzw. produzierte Kälte
Q_{hd}	Abgegebene Wärme
γ_{hd}	Arbeitszahl der Wärmebereitstellung im betrachteten Zeitschritt