

LowEx – Das Konzept der Exergie in energieökonomischen Analysen

IEA Energy Conservation in Buildings and Community
Systems Programme Annex 49: Low Exergy Systems
for High Performance Buildings and Communities

L. Kranzl, A. Müller, J. Matzenberger, M. Bayr

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

41/2012

Impressum:

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter
<http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

LowEx – Das Konzept der Exergie in energieökonomischen Analysen

IEA Energy Conservation in Buildings and Community
Systems Programme Annex 49: Low Exergy Systems
for High Performance Buildings and Communities

Lukas Kranzl, Andreas Müller,
Julian Matzenberger, Michael Bayr
Technische Universität Wien Institut für Energiesysteme und
elektrische Antriebe Energy Economics Group

Wien, Oktober 2011

Ein Projektbericht im Rahmen der Programmlinie



Impulsprogramm Nachhaltig Wirtschaften

Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Programm FORSCHUNGSKOOPERATION INTERNATIONALE ENERGIEAGENTUR. Es wurde vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie initiiert, um Österreichische Forschungsbeiträge zu den Projekten der Internationalen Energieagentur (IEA) zu finanzieren.

Seit dem Beitritt Österreichs zur IEA im Jahre 1975 beteiligt sich Österreich aktiv mit Forschungsbeiträgen zu verschiedenen Themen in den Bereichen erneuerbare Energieträger, Endverbrauchstechnologien und fossile Energieträger. Für die Österreichische Energieforschung ergeben sich durch die Beteiligung an den Forschungsaktivitäten der IEA viele Vorteile: Viele Entwicklungen können durch internationale Kooperationen effizienter bearbeitet werden, neue Arbeitsbereiche können mit internationaler Unterstützung aufgebaut sowie internationale Entwicklungen rascher und besser wahrgenommen werden.

Dank des überdurchschnittlichen Engagements der beteiligten Forschungseinrichtungen ist Österreich erfolgreich in der IEA verankert. Durch viele IEA Projekte entstanden bereits wertvolle Inputs für europäische und nationale Energieinnovationen und auch in der Marktumsetzung konnten bereits richtungsweisende Ergebnisse erzielt werden.

Ein wichtiges Anliegen des Programms ist es, die Projektergebnisse einer interessierten Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen, was durch die Publikationsreihe und die entsprechende Homepage www.nachhaltigwirtschaften.at gewährleistet wird.

Dipl. Ing. Michael Paula

Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

Inhalt

Kurzfassung	5
Abstract	6
1 Einleitung	7
1.1 Vorarbeiten zum Thema	8
1.2 Fokus/Schwerpunkte und Fragestellungen.....	8
1.3 Übersicht über das IEA Implementing Agreement ECBCS und Annex 49	10
1.3.1 ECBCS – Energy Conservation in Buildings and Communities	10
1.3.2 Annex 49.....	11
1.4 Verwendete Methode und Daten	12
2 Low-Ex Gebäude und Energiesysteme: für jede Anwendung den passenden Energieträger.....	14
3 Exergiegehalt von Energieträgern	19
3.1.1 Elektrische Energie.....	21
3.1.2 Sonnenlicht	21
3.1.3 Chemische Energie	23
3.1.4 Fern- und Abwärme	25
3.1.5 Synthese.....	31
4 Exergie im österreichischen Gebäudesektor	33
4.1 Szenarien von Raumwärme und Warmwasser in Österreich bis 2050.....	33
4.1.1 Modellierungshintergrund und Datenquellen	33
4.1.2 Szenarienüberblick	37
4.2 Ergebnisse der Szenarien.....	38
4.3 Szenarien zum Exergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser.....	43
4.4 Synthese und Schlussfolgerung	51
5 Der Tradeoff von Kapital und Energieeinsatz	53
5.1 Einleitung	53
5.1.1 Methodische Vorgehensweise und Beschränkungen.....	54
5.1.2 Definition der monetären Wärmeerzeugungskosten	55
5.2 Ergebnisse	56
5.3 Schlussfolgerungen	59
6 Best practice Beispiele	61
6.1 Beschreibung ausgewählter LowEx Komponenten	62
6.1.1 Identifikation von Low-Ex-Komponenten	62
6.1.2 Beurteilungsmethodik und Abschätzung des Exergiebedarfs ausgewählter Komponenten	65
<i>Ex</i> % = $1/JAZ * 100\%$	66
6.2 Ergebnis-Cluster	70
6.2.1 Haus der Zukunft	70
6.2.2 Fabrik der Zukunft.....	72
6.2.3 Energiesysteme der Zukunft.....	73
6.3 Detaillierte Beschreibung ausgewählter Best-Practice-Beispiele	75

6.3.1	Sunny Energy Building	75
6.3.2	Dezentrale Energieerzeugung für Fernwärme.....	76
6.4	Synthese	78
7	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	80
8	Anhang	84
9	Tabellenverzeichnis	86
10	Abbildungsverzeichnis.....	87
11	Literaturnachweis	88

Kurzfassung

Innerhalb des letzten Jahrzehnts hat in der internationalen wissenschaftlichen Community eine breite Diskussion um die Integration des Exergie-Konzepts in energiewirtschaftlichen Analysen eingesetzt, welcher ein besseres Verständnis über die Qualität der Energieflüsse liefern kann. Dieses Papier wurde im Rahmen des Annexes 49 des IEA-Projektes „Implementing Agreements ECBCS“ (Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme) erstellt und befasst sich mit Konzepten und Methoden zur Reduktion des Exergie-Verbrauchs in Gebäuden sowie Gemeinden und Regionen.

Der zentrale Inhalt dieses Projekts war die Anwendung und Verbreitung des Exergie-Konzepts in der energiewirtschaftlichen Szene Österreichs, besonders im Raumwärme- und Warmwassersektor. Ziele des Projektes waren die Verbreitung des Exergiekonzeptes in Österreich, die Integration von exergetischen Analysen in energiewirtschaftliche Szenarien sowie die Verbreitung von Information über und die Analyse der Kosteneffektivität von sogenannten LowEx-Systemen, unterstützt von einer nationalen und internationalen Vernetzung.

Die ökonomische Analyse der Systeme erfolgte über die Sammlung und Aufbereitung entsprechender technoökonomischer Daten mit anschließendem internationalem Vergleich und entsprechender Auswertung. Die Integration von exergetischen Analysen in energiewirtschaftlichen Szenarien wurde durch die Sammlung und Aufbereitung von bereits bestehenden Szenarien zum Thema mit folgender Aggregation von exergetischen Effizienzen bewerkstelligt. Zudem erfolgte eine Identifikation von „best-practice“ Beispielen in Österreich sowie ein intensiver Verbreitungs- und Vernetzungsprozess.

Ein Ergebnis der ökonomischen Analyse ist, dass ein Trade-Off zwischen Kapital-Einsatz und dem Exergiegehalt des eingesetzten Energieträgers existiert: „Low-Ex“-Systeme benötigen zur Erschließung der nieder-exergetischen Ressource im allgemeinen höhere Investitionen. Die Ergebnisse von drei betrachteten Szenarien lassen erwarten, dass der Exergieverbrauch im österreichischen Raumwärmesektor in den kommenden Jahrzehnten stark abgesenkt werden könnte, wenn die entsprechenden Maßnahmen ergriffen werden. Bei den „best-practice“-Beispielen fiel auf, dass das Konzept der exergetischen Bewertung derzeit nicht weit verbreitet ist und sich daher noch keine einheitliche Auswertung unter exergetischen Gesichtspunkten etabliert hat.

Die zentrale Schlussfolgerung des Papiers ist, dass der Einsatz passender Energieträger für die jeweiligen Anwendungen (nämlich hinsichtlich des benötigten Exergie-Niveaus) zu einer drastischen Steigerung des exergetischen Wirkungsgrades und damit des Exergie- und Energieverbrauchs sowie der damit in Zusammenhang stehenden Treibhausgasemissionen führen kann.

Abstract

In recent years, the international scientific community started to discuss more and more the integration of the exergy concept into energy economic approaches. This is expected to lead to a better understanding of the quality of energy flows. This report has been written in the frame of Annex 49 of the Implementing Agreement ECBCS (Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme) and discusses concepts and methods for reducing the exergy consumption in buildings, communities and regions.

The core content of this project has been the application and dissemination of the exergy concept in the Austrian energy economic community, in particular regarding the space heating and hot water sector. The targets of the project were the dissemination of the exergy concept in Austria, the integration of exergetic analysis in exergy economic scenarios and analyses regarding the cost efficiency of low-ex systems. All these activities were strongly supported by an intensive national and international networking and cooperation within the Annex 49 consortium.

The economic analyses of the systems were based on a profound collection and preparation of corresponding techno-economic data, including a detailed international comparison. For the integration of exergetic analyses in energy economic scenarios we collected and prepared data of existing scenarios and evaluated them regarding the resulting exergetic efficiencies. Moreover, we identified best-practice examples in Austria. Last but not least, we carried out a process of discussion, networking and dissemination.

The energy economic analysis led to the results that there is a clear trade-off between capital input and the exergy content of applied energy carriers. Low-ex systems require substantial investments for making use of low-ex resources. The results of three scenarios considered show a substantial reduction of the exergy consumption in the Austrian space heating sector in the next decades until 2050. This holds in particular, if corresponding ambitious energy efficiency measures are taken. The analysis of best-practice examples show that up to now the exergy concept concept is not widely applied and no harmonised evaluation takes place under an exergetic point of view.

The key conclusion of this report is, that the use of suitable energy carriers for each application (i.e. regarding the required exergy level) can lead to a significant increase of the exergetic efficiency. This is correlated with a reduction of exergy and energy consumption as well as the related greenhouse gas emissions.

1 Einleitung

Innerhalb des letzten Jahrzehnts hat in der internationalen wissenschaftlichen Community eine breite Diskussion um die Integration des Exergie-Konzepts in energiewirtschaftlichen Analysen eingesetzt. Dieser Exergie-basierte Ansatz vermittelt ein besseres Verständnis über die Qualität der Energieflüsse und kann dadurch zu effektiveren Maßnahmen zur Einsparung von Energieträgern und für den Klimaschutz beitragen. Beispielsweise ist der Exergiegehalt, der zur Beheizung bzw. Kühlung eines Gebäudes benötigt wird, sehr gering. Dennoch werden weltweit fossile Energieträger mit hohem Exergiegehalt zur Befriedigung dieses geringen Exergie-Bedarfs verwendet. Es liegt daher auf der Hand, dass die Verbreitung von LowEx-Systemen und das Exergie-Konzept zu einem rascheren und effektiveren Umstieg auf ein nachhaltiges Energiesystem beitragen können.

Im Rahmen des IEA Implementing Agreements ECBCS (Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme) befasst sich Annex 49 mit „Low Exergy Systems for High-Performance Buildings and Communities“ (www.annex49.com). In diesem Projekt werden Konzepte und Methoden zur Reduktion des Exergie-Verbrauchs in Gebäuden sowie Gemeinden und Regionen entwickelt. Während auf Gebäude-Ebene die Entwicklung von technologischen Konzepten des Heiz- (bzw. Kühl-) Systems, der Wärmeverteilung sowie der Gebäudehülle im Vordergrund stehen, werden auf Gemeinde- und Regionsebene die Erzeugung, Verteilung und Speicherung von Exergie behandelt.

Von österreichischer Seite war die Energy Economics Group an der Technischen Universität Wien an Annex 49 im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie beteiligt. Diese Beteiligung umfasst die Entwicklung von Methoden und Ansätzen zur Integration des Exergie-Begriffs in energiewirtschaftliche Analysen. Konkret werden Untersuchungen zur ökonomischen Struktur von low-ex-Systemen angestellt, langfristige Szenarien zur Entwicklung des Gebäudebestandes und des Raumwärmesektors in Österreich unter exergetischen Gesichtspunkten entwickelt sowie verschiedene Energieketten hinsichtlich ihrer exergetischen Effizienz miteinander verglichen

Nach der Einleitung wird in Kapitel 2 etwas ausführlicher in das Thema eingeführt und praktische Beispiele gegeben, bevor in Kapitel 3 methodische Aspekte bei der Bestimmung des Exergiegehalts verschiedener Energieträger erläutert werden. Kapitel 4 stellt den Exergie-Verbrauch im österreichischen Gebäudebestand für Raumwärme und Warmwasser historisch dar und Kapitel 5 untersucht den Trade-off zwischen Kapital-Einsatz für verschiedene Heizsysteme und dem Exergiegehalt der eingesetzten Energieträger. In Kapitel 6 werden ausgewählte Best-Practice-

Beispiele in Österreich dargestellt, bevor schließlich ein Fazit gezogen und Schlussfolgerungen abgeleitet werden.

1.1 Vorarbeiten zum Thema

Die Vorarbeiten, die bereits geleistet wurden, auf denen das Projekt aufbaut und die in die internationale Kooperation eingebracht werden, lassen sich in drei Bereiche gliedern:

- Erfahrungen mit (dynamischen) Kosten-Analysen, insbesondere auch von Lernkurven. Eine große Anzahl von Projekten der Energy Economics Group befasst sich mit diesem Thema.
- Modellierung und Szenarien des Raumwärmesektors (in Österreich)
- Analyse von Bioenergie-Systemen und vergleichende Untersuchungen von Bioenergie-Ketten

Annex 49 basiert wesentlich auf dem bereits abgeschlossenen Annex 37, der ausschließlich Niedrig-Exergie-Gebäude zum Thema hatte. Die im Annex 37 involvierten Institutionen stammten in erster Linie aus dem Bereich der Gebäudephysik und erarbeiteten Konzepte zur exergetischen Optimierung von Gebäuden (z.B. Niedrig-Temperatur-Heizsysteme und Hoch-Temperatur-Kühlsysteme). Anschließend an diese in Annex 37 durchgeführten Arbeiten fokussiert sich die Arbeit von Annex 49 stärker auf Gemeinden, erneuerbare Energie und wirtschaftliche Analysen.

1.2 Fokus/Schwerpunkte und Fragestellungen

Systeme, die Energie mit geringem Exergie-Aufwand bereitstellen, werden als LowEx-Systeme bezeichnet. Darunter fallen beispielsweise Wärmerückgewinnung, Nutzung von Abwärme, Nutzung von Umgebungstemperatur, Nieder-Temperatur-Heizsysteme und Hoch-Temperatur-Kühlsysteme etc.

Ein wesentlicher Schwerpunkt dieses Projektes war es, das Exergie-Konzept in energiewirtschaftliche Analysen zu integrieren, und dadurch zusätzliche Aspekte der gesamtheitlichen Energiesystem-Analyse zu gewinnen. Ein besonderer Fokus lag darauf eine größere Verbreitung dieses Konzepts und der Ergebnisse zu erreichen.

Die Ziele des Projektes aus österreichischer Sicht, sowie sich daraus ergebende Fragestellungen können folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Verbreitung des Exergie-Konzepts in Österreich
Hinter diesem Ziel steht die Idee, ein besseres Verständnis über die Qualität verschiedener Energie-Formen zu schaffen und dadurch effektivere Maßnahmen für Energieeffizienz und Klimaschutz zu tätigen.
- Verbreitung von Information zu LowEx Systemen auf Gebäude- als auch auf Gemeindeebene
- Analyse der Kosten-Effektivität von LowEx Systemen auf Gebäude- als auch auf Gemeindeebene. Finanzierungsoptionen für LowEx Systeme und Förderstrategien; dynamische Aspekte
- Integration von exergetischen Analysen in energiewirtschaftliche Szenarien
 - Exergetische Analyse langfristiger Szenarien des österreichischen Raumwärmesektors
 - Exergie-Analyse erneuerbarer Energiesysteme (insbesondere Bioenergie, einschließlich Polygeneration)
- Internationale und nationale Vernetzung

Der zentrale Inhalt dieses Projekts war die Anwendung und Verbreitung des Exergie-Konzepts in der energiewirtschaftlichen Szene Österreichs. Systeme, die Energie auf geringem Exergie-Niveau bereitstellen, werden als LowEx-Systeme bezeichnet. Darunter fallen beispielsweise Wärmerückgewinnung, Nutzung von Abwärme, Nutzung von Umgebungstemperatur, Nieder-Temperatur-Heizsysteme und Hoch-Temperatur-Kühlsysteme etc.

Die Anwendung des Exergie-Konzepts in energiewirtschaftlichen Analysen erfolgte in zwei Bereichen, in denen in Österreich bereits derzeit im internationalen Vergleich Erfolge zu verzeichnen sind. Zum einen ist dies der Raumwärmesektor, in dem in Österreich hinsichtlich der Verbreitung von Niedrig- und Passivhausarchitektur sowie auch von Solarkollektoren Erfolge zu verzeichnen sind. Zum anderen der Biomasse-Sektor, in dem Kesselhersteller aus Österreich hohe Exportquoten aufweisen und ein im internationalen Vergleich hoher Anteil der Biomasse am Primärenergieverbrauch zu verzeichnen ist.

Für den Wärmesektor wurden bestehende Analysen, die mit dem Modell ERNSTL (siehe Arbeitspaket-Beschreibung unten) erstellt wurden, exergetisch untersucht, so dass daraus neue Aspekte der dynamischen Entwicklung des Gebäudebestandes, möglicher Sanierungsmaßnahmen sowie der Technologien zur Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser gewonnen werden können.

Für den Biomasse-Sektor erfolgte eine vergleichende exergetische Analyse verschiedener Bioenergieketten. Das Wesen der Biomasse ist ihre Vielfalt, sowohl auf der Aufbringungsseite (land-, forstwirtschaftliche oder industrielle Haupt- oder Nebenprodukte ...), der Umwandlungstechnologie (Verbrennung, Vergasung,

Fermentation etc.) als auch der Nutzungsseite (Wärme, Strom, Treibstoffe). Die wissenschaftliche wie auch politische Diskussion um die Konkurrenz zwischen verschiedenen Biomasse-Nutzungsformen verläuft gerade derzeit besonders kontroversiell. Eine exergetische Betrachtung der unterschiedlichen Ketten und Nutzungspfade kann hier neue Aspekte zum Verständnis beitragen.

Der Fokus wird in diesem Bericht auf den ersten Bereich der Anwendung des Exergiekonzepts im Raumwärmesektor gelegt.

1.3 Übersicht über das IEA Implementing Agreement ECBCS und Annex 49

1.3.1 ECBCS – Energy Conservation in Buildings and Communities

Etwa ein Drittel des Primärenergieverbrauchs wird derzeit in nicht-industriellen Gebäuden wie Wohnungen, Büros, Spitälern und Schulen zur Bereitstellung von Raumwärme und –Kühlung, Beleuchtung sowie anderen elektrischen Anwendungen eingesetzt. Gemessen in End-Energie ist dieser Verbrauch vergleichbar mit dem gesamten Verkehrssektor. Daher stellt der Energieverbrauch in Gebäuden einen großen Anteil an der Nutzung fossiler Energieträger und den Treibhausgasemissionen. Aufgrund von Unsicherheiten des Energieangebots und der Besorgnis bezüglich des Treibhausgas effekts haben zahlreiche Länder Ziele zur Reduktion des Energieverbrauchs in Gebäuden beschlossen. Insgesamt zielen diese auf eine Reduktion des Energieverbrauchs um 15 bis 30% ab. Um dieses Ziel zu erreichen, sind internationale Kooperationen, in denen Forschungsaktivitäten, Know-how und Erfahrungen geteilt werden, ein wichtiger Baustein.

Die IEA hat daher das Implementing Agreement zur Energieeffizienz in Gebäuden und Kommunen (ECBCS) eingerichtet. Das Ziel von ECBCS ist es, Forschung mit einem internationalen Fokus auf Gebäudeenergie-Effizienz zu fördern. Verschiedene Aufgaben werden in einer Reihe von „Annexes“ durchgeführt, die auf energie sparende Technologien sowie Aktivitäten zu deren Umsetzung und Verbreitung in der Praxis beitragen. Die Ergebnisse werden auch für die Ausformulierung internationaler sowie nationaler Energiespar-Richtlinien sowie Standards genutzt.

ECBCS führt eine breite Palette von Aktivitäten durch, sowohl über die jeweiligen Annexe als auch durch den gemeinsamen Informationsaustausch. ECBCS-Länder sind frei, die Annexe zu wählen, in denen sie aktiv werden.

1.3.2 Annex 49

Das Ziel von Annex 49 ist die Entwicklung von Konzepten zur Reduktion des Exergie-Bedarfs in Gebäuden, um so die CO₂-Emissionen des Gebäude-Bestands zu reduzieren und Strukturen für nachhaltige und zuverlässige Energiesysteme im Gebäude-Sektor zu unterstützen.

Das Annex 49 Forschungsprojekt ist im Zeitraum von November 2006 bis April 2010 durchgeführt worden.

Folgende Aktivitäten wurden im Rahmen des Projekts gesetzt:

- Anwendung von Exergie-Analysen sowie Bereitstellung von Tools, Richtlinien, best-practice Beispielen und Hintergrund Informationen für Planer und Entscheidungsträger in den Bereichen Gebäude, Energieversorgung und Politik
- Förderung von kosteneffizienten Niedrig-Energie-/Exergie-Maßnahmen für Sanierung und neue Gebäude, wobei sowohl Wohngebäude als auch der Service-Sektor betrachtet wird
- Förderung Exergie-bezogener Performance-Analyse von Gebäuden, insbesondere aus der Perspektiven von Gemeinden/Regionen

Das Annex 49 Working Program umfasste die folgenden Schwerpunkte (Subtasks):

Subtask A: Methoden zur Exergie-Analyse

(Subtask leader: Finland, Mia Ala-Juusela)

Das Ziel dieses Subtasks war die Entwicklung einer Bewertungs- und Analyse-Methode, einschließlich Tools für Planung und Performance-Analyse einzelner Gebäude und Gemeinden.

Subtask B: Exergie effiziente Strukturen für Gemeinden

(Subtask leader: Canada, Ken Curch)

Das Ziel dieses Subtasks war die Entwicklung von Energieverteilung, -erzeugung und -speicher – Systemen und Konzepten, die den Bedarf der Gemeindemitglieder an Energiedienstleistungen mit einem minimalen Input an Primärenergie bereitstellt.

Subtask C: Exergie effiziente Gebäude-Technologien

(Subtask leader: Sweden, Gudni Johannesson)

Das Ziel dieses Subtasks war die Entwicklung von Best-Practice-Richtlinien zur Implementierung innovativer Gebäude-Technologien und die Etablierung eines ganzheitlichen Ansatzes zur exergetischen Bewertung von Gebäuden.

Subtask D: Wissens-Transfer, Verbreitung

(Subtask leader: Germany, Dietrich Schmidt)

Das Ziel dieses Subtasks war die Sammlung und Verbreitung von Informationen zur Arbeit des Annexes. Dies umfasste die Entwicklung von Informations-Plattformen und die Organisation von Seminaren und Workshops. Ein wesentlicher Punkt war auch die Bearbeitung des Annexes 49 „guidebooks“.

1.4 Verwendete Methode und Daten

Zur Erreichung dieser Ziele wurden die folgenden Schritte gesetzt:

Zu Beginn des Projekts erfolgte eine ökonomische Analyse von LowEx Systemen. Dazu wurden zunächst die zu analysierenden LowEx-Systeme ausgewählt und definiert. Die Auswahl der Systeme erfolgte im Wesentlichen basierend auf der im Guide-Book von Annex 37 erstellten Liste von LowEx-Systemen (z.B. Fußbodenheizung, Wandheizung, Solarkollektoren, effiziente Wärmepumpen, Abwärmenutzung, Wärmerückgewinnung etc.). Für diese Systeme wurden die nötigen techno-ökonomischen Daten gesammelt und aufbereitet. Die darauf aufbauende wirtschaftliche Analyse dieser Systeme erlaubt einen Vergleich mit den entsprechenden konventionellen (d.h. hoch-exergetischen) Referenzsystemen.

Da in der Vergangenheit bei einer Reihe von (Energie-) Technologien zu beobachten war, dass es durch technologisches Lernen zu einer Reduktion von Kosten bzw. einer Erhöhung von Effizienzen kam, ist dies auch für innovative LowEx-Systeme interessant. Es wird geprüft, inwiefern es die Datenlage erlaubt, für einzelne Komponenten von LowEx-Systemen Lernkurven abzuleiten bzw. daraus Szenarien für die künftige Kostenentwicklung abzuschätzen.

Zweiter Teil des Projekts war die Integration von exergetischen Analysen in energiewirtschaftliche Szenarien. Dies erfolgte zuerst anhand von Szenarien des Raumwärmesektors in Österreich. Zu Beginn stand dabei eine umfangreiche Literaturanalyse zu ähnlichen Fragestellungen. In früheren Projekten wurden vom Antragsteller mit dem Modell ERNSTL (Energetisches Raumwärme Simulationstool: Modellierung des österreichischen Gebäudebestandes) langfristige Szenarien bis 2050 für den österreichischen Raumwärme- und Warmwassersektor erstellt. Diese Szenarien wurden zuerst dokumentiert und aufbereitet. Für repräsentative Systeme und Maßnahmen zur Gebäudesanierung erfolgte eine Ermittlung der damit verbundenen exergetischen Effizienzen, die anschließend für die Szenarien aggregiert wurden. Daraus können Schlussfolgerungen hinsichtlich effizienter Pfade zur Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung abgeleitet werden.

Neben den Szenarien des Raumwärmesektors wurden exergetische Analysen von Biomasse-Nutzungsketten durchgeführt. Die Energy Economics Group verfügt über Erfahrung mit der Analyse von Bioenergie-Systemen und speziell mit dem Vergleich

verschiedener Biomasse-Nutzungsketten. Biomasse kann zur Bereitstellung verschiedener End- und Nutzenergieformen bzw. Energiedienstleistungen eingesetzt werden kann. Hier konnte das Exergie-Konzept neue Akzente liefern und zu einem breiteren Verständnis beitragen.

Der dritte Teil des Projekts bestand in der Identifikation von Best-Practice-Beispielen. Dazu wurden zuerst gemeinsam mit den Subtask-Leadern von Annex 49 Kriterien erarbeitet. Daran anschließend wurden Beispiele in Österreich identifiziert, die diesen Kriterien genügen. Dies erfolgt sowohl auf Gebäude- als auch auf Gemeindeebene (d.h. sowohl Best-Practice-Gebäude als auch Best-Practice-Gemeinden bzw. Kommunen).

Das gesamte Projekt wurde begleitet von einem intensiven Verbreitungs- und Vernetzungsprozess, sowohl auf nationaler als auch internationaler Ebene. Dazu wurden in einem ersten Schritt die Zielgruppen genauer identifiziert. Diese Zielgruppen wurden per Newsletter über die Aktivitäten im Annex 49 und speziell die österreichischen Arbeiten informiert.

Eine weitere Vernetzung der wichtigen Akteure erfolgte über Expertengespräche, Workshops, Veröffentlichungen, Präsentationen, Broschüren etc. Es konnte eine Reihe von Publikationen und Präsentationen auf einschlägigen Konferenzen und Tagungen präsentiert werden.

2 Low-Ex Gebäude und Energiesysteme: für jede Anwendung den passenden Energieträger

In diesem ersten inhaltlichen Kapitel des vorliegenden Berichts erfolgt eine Darstellung des wesentlichen Konzepts und der Idee von „Low-Ex“-Gebäuden und Energiesystemen.

Werden durchschnittliche Energiekonsumenten darüber befragt, wie hoch sie den Anteil ihres Energieverbrauchs für Raumwärme, Warmwasser, Beleuchtung, Mobilität etc. einschätzen, so werden meist die Wärme-Anwendungen deutlich unter- sowie die Strom spezifischen Anwendungen überschätzt (siehe z.B. [1]). Üblicherweise wird dies von den Autoren zum Anlass genommen, die Unterbewertung des Sektors Wärme und der damit verbundenen möglichen Energie- und CO₂-Reduktion zu betonen. Dies ist zweifelsohne berechtigt, denn tatsächlich sind die Effizienz- und CO₂-Einsparungspotenziale insbesondere im Raumwärme- und Warmwassersektor enorm.

Darüber hinaus ist allerdings auch eine andere Interpretation dieser Umfrage-Ergebnisse möglich. Nämlich, dass die Befragten bei der Beantwortung implizit vom „qualitativen Wert“ der jeweiligen Nutzenergie ausgingen. Das heißt, eventuell könnten sie nicht die Menge und den „Wert“ der eingesetzten Energieträger, sondern den „Wert“ der Wärme gegenüber den stromspezifischen Anwendungen beurteilt haben. Ein Kriterium für diesen „qualitativen Wert“ einer bestimmten Energieform könnte zum Beispiel die Differenz des Energieniveaus gegenüber dem Umgebungszustand darstellen, oder anders ausgedrückt: „Welches Arbeitsvermögen besitzt eine bestimmte Energieform gegenüber dem Umgebungszustand?“

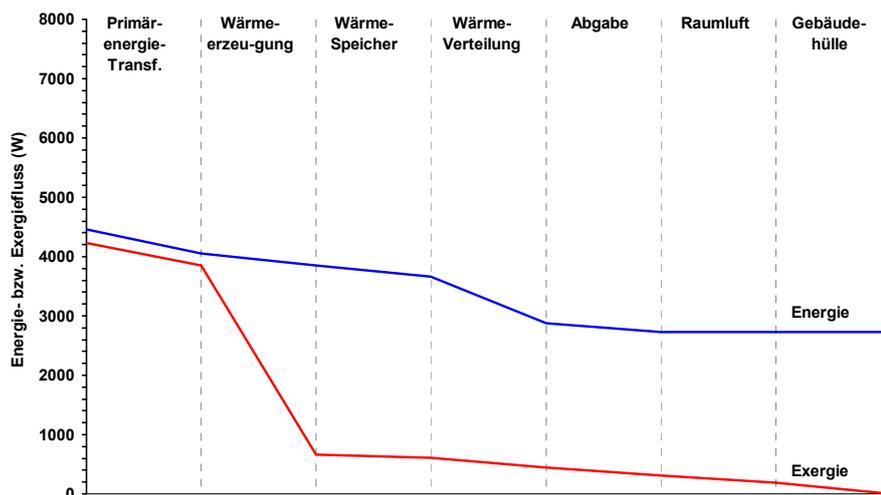
Tatsächlich ist unter diesem Gesichtspunkt der qualitative Unterschied zwischen den Energieformen Raumwärme vs. Elektrizität eklatant. Raumwärme besitzt mit lediglich wenigen Grad Celsius Differenz zur Umgebungstemperatur ein äußerst geringes Arbeitsvermögen und kann daher keinem anderen Zweck dienen, als eben ein behagliches Raumklima bereitzustellen. Die Umwandlung in andere Energieformen ist nur in äußerst beschränktem Umfang möglich. Elektrizität hingegen stellt eine hochqualitative Energieform dar, die zur Bereitstellung unterschiedlichster Energiedienstleistungen verfügbar ist, beispielsweise für Beleuchtung, Mobilität oder Kochen.

Thermodynamiker nennen den „hochqualitativen“ Anteil der Energie, also jenen Anteil, der gegenüber dem Umgebungszustand arbeitsfähig ist, Exergie. Elektrizität weist einen Exerriefaktor von 100% auf. Das heißt, dass der gesamte Energieinhalt einer kWh Strom in andere Energieformen übergeführt werden kann. Im Gegensatz

dazu liegt dieser Faktor bei Raumwärme bei nur etwa 7%¹. Chemische Energieträger wie Erdöl oder Erdgas weisen ebenfalls sehr hohe Exergieanteile auf.

Wenn wir uns unter diesem Gesichtspunkt die heute dominierenden Heizsysteme ansehen, erkennen wir, dass Großteils hoch-exergetische Energieträger wie Öl oder Gas zur Bereitstellung einer extrem nieder-exergetischen Nutzenergieform, nämlich Raumwärme und Warmwasser verwendet wird. Es wird dadurch der größte Anteil der Exergie dieser Energieträger vernichtet. Das Bewusstsein und die Achtsamkeit gegenüber dem Wert hoch qualitativer Energieträger ist also nur in geringem Ausmaß gegeben und führt zu Ressourcenverschwendung, oder anders ausgedrückt: Vernichtung von Exergie.

Abbildung 1 und Abbildung 2 zeigen beispielhaft den Energie- und Exergiefluss vom Energieträger über die Umwandlung in Raumwärme bis zur Gebäudehülle. Das erste Beispiel stellt ein mit Gas beheiztes konventionelles Gebäude mit Hochtemperatur-Heizsystem dar, das zweite Beispiel ein mit Fernwärme (Abwärmennutzung) in einem Niedertemperatur-System beheiztes Gebäude. Dabei wird deutlich, dass bei der Umwandlung des fossilen Energieträgers in Niedertemperaturwärme der größte Anteil der Exergie dieses Energieträgers vernichtet wird, was in einem extrem niederen exergetischen Wirkungsgrad resultiert. Im Gegensatz dazu ist das Exergiegefälle im zweiten Fall deutlich geringer, wenn Abwärme in einem Fernwärmenetz genutzt wird. Analoges gilt für die Nutzung von Solarwärme. Auch hier wird eine niederexergetische Wärmequelle, nämlich Warmwasser aus dem Kollektor, bereitgestellt.



¹ Dieser Faktor bestimmt sich aus der absoluten Temperatur der Raumwärme sowie der Außentemperatur. Mit 20°C (293,15 K) Raumwärme und einer Außentemperatur von 0°C (273,15) ergibt sich $1 - T_0/T = 1 - 273,15/293,15 = 6.8\%$

Abbildung 1: Energie- und Exergiefluss beim Beheizen eines Gebäudes. Fall 1: konventionelles Hoch-Temperatur-Heizsystem mit Gasbrennwertkessel

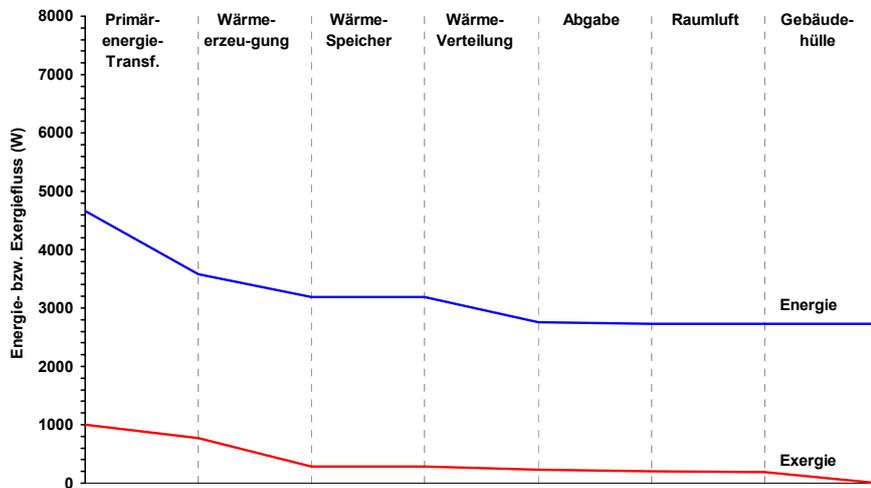


Abbildung 2: Energie- und Exergiefluss beim Beheizen eines Gebäudes. Fall 2: Nieder-Temperatur-Heizsystem mit Fernwärme (Abwärmenutzung)

Während in konventionellen Heiz-, Gebäude- und Energiesystemen also ausschließlich hoch-exergetische Energieträger eingesetzt werden, unabhängig davon, ob letztlich ein hoch- oder ein nieder-exergetischer Bedarf besteht, (oberer Teil von Abbildung 3) werden in innovativen, effizienten „low-ex“ Gebäuden für die jeweilige Anwendung Energieträger in der entsprechend passenden Qualität, d.h. mit dem entsprechenden Exergiegehalt bereitgestellt (unterer Teil von Abbildung 3).

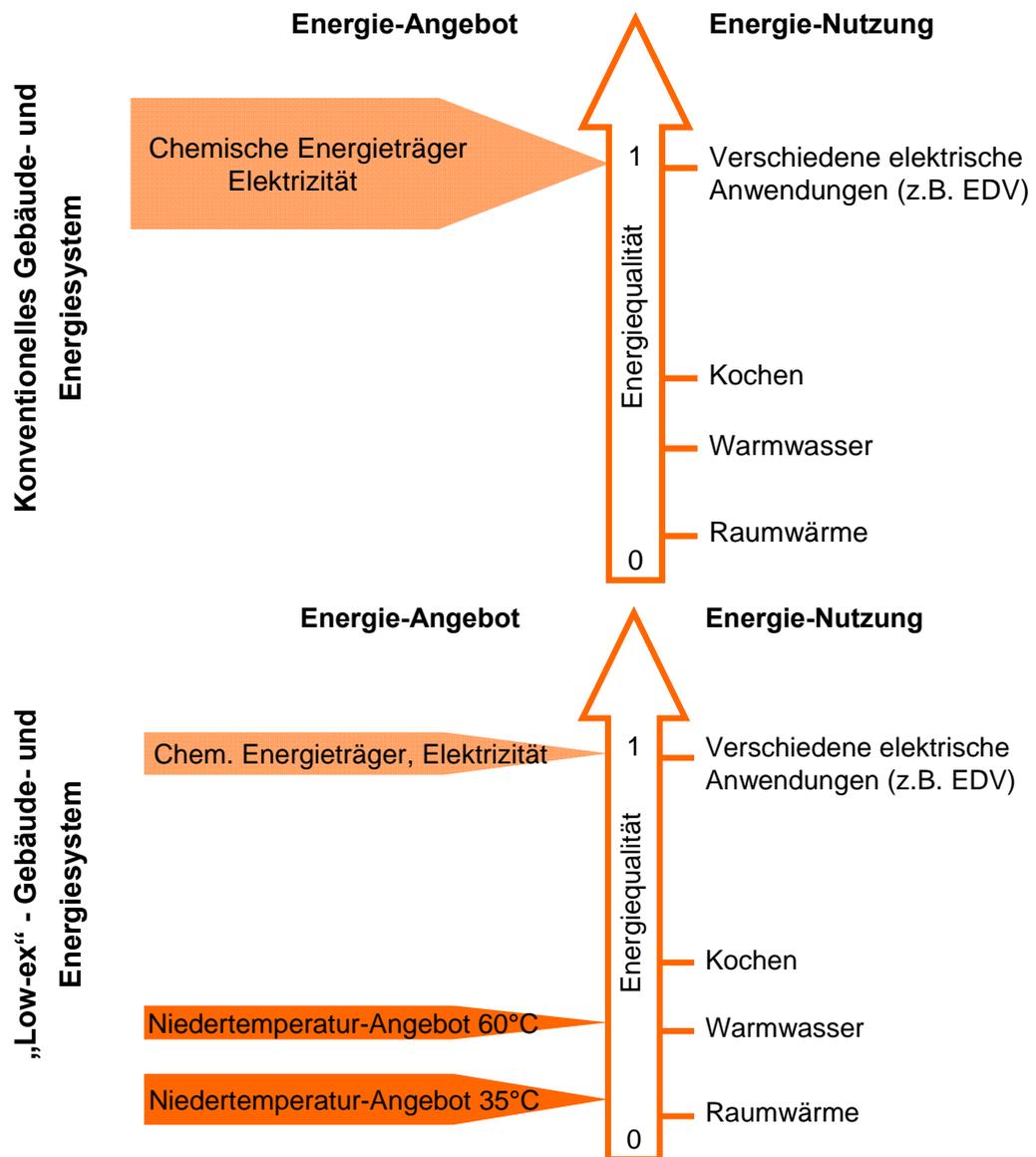


Abbildung 3: Energienutzung und -angebot in Gebäuden: Verschiedene Anwendungen benötigen unterschiedliche Energie-Qualitäten (Exergie-Niveaus). Oben ist der typische Fall dargestellt, in dem das Energieangebot ausschließlich durch hoch-exergetische Quellen erfolgt. Im unteren (low-ex) Fall werden die unterschiedlichen Anwendungen mit jeweils passenden Energieformen (z.B. Solarwärme, Abwärme, Wärmerückgewinnung) bereitgestellt.

Was bedeutet das nun konkret für eine optimale, effiziente, nieder-exergetische Gestaltung von Energiesystemen und im Besonderen von Gebäuden?

Konkrete Merkmale von „low-ex“-Gebäuden und Energiesystemen sind beispielsweise:

- Passive Nutzung von Solar- und Umgebungswärme

- Ersatz von hoch-exergetischen Energieträgern durch nieder-exergetische wie Solarwärme, Abwärme aus KWK und industriellen Prozessen
- Hocheffiziente Gebäudehüllen
- Niedertemperatur-Heizsysteme (bzw. Hochtemperatur-Kühlsysteme) erlauben den Einsatz von nieder-exergetischen Energieträgern.
- Anlagen zur Wärmerückgewinnung

Auch das früher übliche Kochen auf Holzöfen stellt im Prinzip ein solches „low-ex“-Element dar: der hoch-exergetische Anteil der Biomasse wird für den Hoch-Temperaturbedarf, nämlich Kochen, genutzt, während der nieder-exergetische Anteil für die Raumwärme genutzt wird.

Derartige „low-ex“-Gebäude weisen einen deutlich geringeren Exergie- (und im Gesamtsystem auch Primärenergie-) Verbrauch und geringere CO₂-Emissionen auf. Darüber hinaus führen insbesondere Niedertemperatur-Wärmesysteme auch zu einem hohen Behaglichkeitsniveau. Denn durch den Einsatz von Wand- und Fußbodenheizungen können hohe Temperaturgradienten, Luftzug und ein damit verbundenes unbehagliches Raumklima stark verringert werden.

Was hier auf Gebäude-Ebene dargestellt wurde, gilt auch für das gesamte Energiesystem in einer Region. Neben den Haushalten weisen auch die Anwendungen in Gewerbe, Landwirtschaft, Dienstleistungssektor und Industrie bestimmte Exergie-Niveaus auf, die optimaler Weise auf Basis von Energieträgern mit passendem Exergie-Gehalt bereitgestellt werden. Die Nutzung von industrieller Abwärme in Fernwärmenetzen ist ein Beispiel für den Ausgleich verschiedener Exergie-Niveaus: Hoch-Temperatur-Anwendungen (z.B. in der Industrie) verlangen nach hoch-exergetischen Energieträgern, während für Raumwärme die Abwärme aus eben diesen Hoch-Temperatur-Anwendungen ausreichend ist.

Während bei der thermodynamischen Planung und Analyse von Energieanlagen exergetische Analysen an der Tagesordnung sind, ist dies für energiewirtschaftliche und –systemische Analysen nicht unbedingt der Fall. Die Integration des Exergiekonzeptes in Analysen des Energiesystems kann jedoch zusätzliche Einsichten zur Qualität von Energieträgern und Anwendungen liefern und so neue Optionen zur Verringerung des Bedarfs nach Energieträgern und zur CO₂-Reduktion identifizieren helfen. Exergetische Analysen unterstützen daher die Entwicklung und geeignete Auswahl von Technologien und Konzepten, die zu einer substanziellen Reduktion des Exergie- und Energieverbrauchs in Gebäuden führen können. Die daraus abgeleiteten Strategien können dazu beitragen, den Übergang in ein nachhaltiges, intelligentes und wettbewerbsfähiges Energiesystem zu beschleunigen.

3 Exergiegehalt von Energieträgern

Es wurde bisher viel grundlegende Literatur veröffentlicht, welche sich mit der Entwicklung und Weiterführung des Exergiekonzepts beschäftigt und welche dieses auch in verschiedenen Feldern und auf verschiedenen Aggregationsebenen einsetzt. Diese sind im Besonderen (Sciubbia, 2001), (Sciubbia et al., 2008), (Gaggioli und Wepfer, 1980), welche bereits mit Exergiebilanzierung und an erweiterten auf Exergie basierenden Bewertungsmethoden gearbeitet haben.

Für die Berechnung des Exergiegehalts der verschiedenen Formen von Energie gibt es verschiedene Ansätze, wie z.B. (Szargut et al., 1988), (Kotas, 1985), (Bejan, 1988): Energie im Zusammenhang mit der Übertragung von Arbeit ist äquivalent zur Übertragung von Exergie, da die Exergie als das maximale Arbeitspotential definiert ist. Der Exergie-Inhalt des Wärmetransfers wird durch die Einbeziehung des Carnot-Faktors $(1-T_0/T)$ berechnet, wobei T_0 die Umgebungstemperatur und T die Temperatur der Wärmequelle darstellt. Physikalische oder thermomechanische Exergie hängt hauptsächlich von der Temperatur und vom Druck ab. Das Konzept der Ermittlung von chemischer Exergie basiert auf der Idee dass die reine Komponente in ein chemisches Equilibrium mit der Umwelt gebracht wird. Es kann aufgrund der spezifischen molaren chemischen Exergie einer Referenzkomponente in der Umwelt und dem molaren Bruchteil dieser Komponente in der chemischen Substanz berechnet werden. Die Exergie in Bezug auf den Massenstrom in einen Dauerzustand wird von der kinetischen Exergie, der potentiellen Exergie, der thermomechanischen Exergie und der chemischen Exergie der Komponenten im Strom festgelegt. (Ein guter Überblick findet sich z.B. in (Shukuya und Hammache, 2002) oder (Torio et al., 2009).)

Beruhend auf dieser Herangehensweise liefert die Literatur Standardwerte für den Exergiegehalt von verschiedenen Energieträgern (z.B. (Ayres et al., 1998), (Ayres et al., 2003), (Chen und Chen, 2009), (Dincer, 2002), (Utlu und Hepbasli, 2006), (Valero, 2006), (Sciubbia, 2001), (Wall, 1977a). Beispiele von Literatur welche sich mit Exergieanalysen von erneuerbaren Energiequellen auseinandersetzen sind (Koroneos et al., 2003), Torio und Schmidt, 2010) und (Torio et al., 2009). Diese Werte können gemäß der Annahmen und den detaillierten methodologischen Ansätzen variieren. Der entscheidende Einfluss der „dead state“ Referenztemperatur wurde bereits weitgehend diskutiert, z.B. in (Utlu und Hepbasli, 2007b) und (Torio et al., 2009). Das Referenztemperaturniveau welches in diesem Papier angewendet wurde findet sich in Tabelle 3. Eine exemplarische Quantifizierung des Exergiegehaltes findet sich zum Beispiel bei (Wall, 1977b), hier zu finden in der folgenden Tabelle 1.

Tabelle 1: Die Qualität der verschiedenen Energieformen in Bezug auf Exergie, Einteilung durch (Wall, 1977b)

Qualität	Energieform	Exergie (%)	Anteil
Extra hochwertig	Potentielle Energie ^a	100	
	Kinetische Energie ^b	100	
	Elektrische Energie	100	
Hochwertig	Nukleare Energie ^c	~100	
	Sonnenlicht	95	
	Chemische Energie ^d	95	
	Heißdampf	60	
	Fernwärme	30	
Minderwertig	Wärme aus Abfällen	5	
Wertlos	Wärme auf Umgebungstemperatur	0	

^a z.B. Wasserreservoir, ^b z.B. Wasserfälle, ^c z.B. Kernbrennstoffe, ^d z.B. Rohöl

(Szargut und Morris, 1985) entwickelten den Indikator des „kumulativen Exergiekonsums“ (CExC) um die ganze Bandbreite der Prozesse von den natürlichen Ressourcen bis zu den Endprodukten zu erfassen. Der CExC ist definiert als die Summe der Exergie welche in allen Ressourcen der Lieferungskette des gewählten Produktes oder Prozesses enthalten ist (Dewulf et al., 2008). Im Gegensatz zum Konzept des CExC ist unser Ziel in diesem Papier nicht die Abdeckung des Exergie-Konsums über die gesamte Lebenszeit von Heizenergieleistungen. Dies würde nämlich bedeuten die exergetische Analyse von Boilern, Fernwärmenetzen und Raffinerien, etc. einzubeziehen, was den Rahmen dieses Papiers sprengen würde. Daher überlassen wir die Frage der Anwendung des CExC auf den Heizsektor in Österreich (und anderer Länder) anderen Forschungsvorhaben.

In diesem Abschnitt konzentrieren wir uns auf die Definition des Exergiegehaltes einer Energieform als den Anteil der Energie welcher in Arbeit umgewandelt werden kann.

Für das Ziel dieses Papiers ist der Anteil welcher in der Praxis in echten thermodynamischen Prozessen in Arbeit umgewandelt werden kann von besonderer Bedeutung. In enger Beziehung zum Exergiegehalt eines Energieträgers steht die Exergieeffizienz (ξ) von Prozessen welche Energie als Input verwenden, siehe z.B. (Warr et al., 2008).

$$\xi = \frac{\text{verfügbare Arbeit der finalen Outputs (nützliche Arbeit)}}{\text{verfügbare Arbeit der Inputs (Exergie)}}$$

Formel 1

Für die Analyse in diesem Papier sind nur einige Energieformen aus Tabelle 1 relevant. Diese sind besonders (1) Elektrische Energie, (2) Sonnenlicht, (3) Chemische Energie (In der Form von Biomasse-Heizstoffen, Kohle, Erdgas und Erdöl) und (4) Fernwärme und Abwärme.

Im Folgenden werden wir für jede dieser Energieformen die Vorgehensweise für die Feststellung des Exergiegehaltes beschreiben. Keine dieser Vorgehensweisen ist in sich selbst neu. Wir verwenden diese Vorgehensweisen für den österreichischen Fall und berechnen die entsprechenden Werte. In Besonderen für den Fernwärmesektor unterliegen diese der historischen Entwicklung des Energieträger- und Technologiemieses innerhalb des Sektors.

3.1.1 Elektrische Energie

Elektrizität stellt pure Exergie dar, d.h. der Exergiegehalt der Elektrizität ist 100%.

3.1.2 Sonnenlicht

Ergebnisse aus der Literatur wie z.B. (Wall, 1977b) betonen in der Regel den hohen Exergiegehalt von Sonnenlicht. (Torio et al., 2009) listet eine beachtliche Auswahl hierzu korrespondierender Literatur auf. Diese Literaturanalysen fußen alle auf einer Systemgrenze, die den Solarkollektor welcher die solare Strahlung in heißes Wasser transformiert, mit einbezieht. Dies resultiert auf der einen Seite in einer niedrigen exergetischen Effizienz des gesamten solarthermischen Systems und auf der anderen Seite in einem hohen exergetischen Wert des Sonnenlichts an sich. Aufgrund unserer Annahme, die Höhe der Exergie welche aus der praktischen Sicht verwendet werden kann mit einzubeziehen, haben wir uns für eine Herangehensweise entschieden welche den typischen Durchschnittsoutput von effizienten solarthermischen Kollektoren unter österreichischen Klimabedingungen berücksichtigt. Daher wählen wir den Heißwasserabfluss des Heiz- oder Warmwassersystems als unsere Systemgrenze und nicht die Solarkollektoren. Dies ist die gleiche Vorgehensweise wie bei (Torio et al., 2009) und (Sandnes, 2003).

Insbesondere (Torio et al., 2009) sagt „diese Methode könnte von Interesse sein wenn die Analyse des Solarkollektors als eine einzige Komponente nicht interessant ist, aber wiederum die effiziente Integration desselben in ein Energiesystem das Ziel ist, welches hauptsächlich verfolgt wird“. Dies trifft genau das Konzept dieses Papiers. Dennoch möchten wir unterstreichen dass im Fall von Kollektoroptimierungsanalysen oder im Fall von Vergleichen von Photovoltaik mit Solarthermie oder der Biomasseproduktion andere Systemgrenzen benötigt werden.

Daher kann (nach diesem Konzept und für die vorher dargelegten Systemgrenzen) der Exergiegehalt (ex_{sol}) von solarthermischer Energie (d.h. der Output der Solarkollektoren) aufgrund der Umgebungstemperatur (T_0) und der Output-Temperatur des Kollektors (T) berechnet werden:

$$ex_{Sol} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)$$

Formel 2

Es sollte erwähnt werden, dass der Carnot-Faktor nur gilt, wenn sich die Quelle auf einem konstanten und beständigen Temperaturniveau befindet. In einem Wärmetauscher (wie einem Heizelement, einer Dachverkleidung, etc.) ist die Temperatur der „heißen“ Quelle nicht konstant sondern variiert über die Oberfläche des Wärmetauschers selbst. Wenn in diesen Fällen eine umfangreiche technologische Komponenten-Analyse durchgeführt werden soll, wäre ein akzeptablerer Ausdruck $1 - T_0 / (T_0 + LMTD)$, wobei LMTD für „log-mean temperature difference“ steht. Dennoch berücksichtigt diese statische Vorgehensweise die dynamischen Fluktuationen der Referenztemperatur genauso wenig wie die Output-Temperatur des Kollektors während des Jahres. Die dynamische Vorgehensweise (Formel 2) erlaubt eine detailliertere Berücksichtigung dieser dynamischen Aspekte.

$$ex_{Sol} = \frac{\sum_t Q_{Sol,t} \cdot \left(1 - \frac{T_{0,t}}{T_t}\right)}{\sum_t Q_{sol,t}}$$

Formel 3

Für die Analyse in diesem Papier nahmen wir für einen effizienten Kollektor unter österreichischen Klimabedingungen einen jährlichen Solarertrag von ca. 400 kWh/m² an und berechneten den Exergiegehalt auf einer täglichen Basis. Natürlich hängt die Output-Temperatur von der Integration des Kollektors in das ganze System ab, deswegen wurden nur Durchschnittswerte angenommen, welche von

30°C Output im Januar bis zu 90°C Output-Temperatur im Juli reichen. Die tägliche Standard-Außentemperatur für durchschnittliche österreichische Bedingungen führt uns zu einem durchschnittlichen Exergiegehalt der solarthermischen Energie von 16%. Abhängig von der Größe des Systems, der gesamten Systemintegration in das Gebäude, des Verhältnisses von Angebot und Nachfrage, der Größe des Wärmespeichers, etc. kann dies zu entsprechenden Variationen der Output-Temperaturen des Kollektors führen.

Bis jetzt gibt es keine wirkliche „Konkurrenz“ für Solarenergie (neben der Konkurrenz der Dachflächen welche noch nicht der begrenzende Faktor ist). Deswegen sollte nicht der potentielle maximale exergetische Output welcher von Solarenergie (z.B. Sonnenlicht) mit den bestmöglichen solarthermischen Systemen gewonnen werden kann als der relevante Fall betrachtet werden, sondern die realen Exergie-Erträge welche aus den derzeitigen solarthermischen Systemen bestehen. Wenn wir dieser Vorgehensweise für eine detailliertere Analyse folgen, würde man die spezifischen Details für den Aufbau des Betriebs aller bestehenden (oder typisch durchschnittlichen) solarthermischen Systeme benötigen. Im Moment ist diese Information aber für Österreich nicht erhältlich. Deswegen nehmen wir einen Exergiegehalt von 16% für solarthermische Energie in Österreich als Startpunkt für die Analyse. Trotzdem hoffen wir dass zukünftige Forschung zu einer profunderen Datenbasis führt, was den Detaillierungsgrad der Analyse erhöhen könnte.

3.1.3 Chemische Energie

Chemische Energie ist eine oft verwendete Basis für die Konversion von Primärenergie, oft durch Verbrennung. Die Temperaturniveaus welche in solchen Verbrennungsprozessen erreicht werden, bedingen die Höhe der chemischen Exergie welche in der Praxis in thermische Exergie konvertiert werden können. In anderen Worten, es gibt in Verbrennungsprozessen immer einen bestimmten Betrag an unvermeidbarem Exergieverlust aufgrund des maximal erreichbaren oder verwendbaren Temperaturniveaus. Die Exergieeffizienz (η_{ex} , Verbrennung) eines idealen Verbrennungsprozesses wird bedingt durch den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik und hängt hauptsächlich von den absoluten Temperaturniveaus der Verbrennung T_{comb} und der Umgebung T_0 ab. Also zeigt die exergetische Effizienz eines Verbrennungsprozesses ($\xi_{combustion}$) die Höhe der „in der Praxis maximal nutzbaren“ Exergie ($ex_{pr, fuel}$) an, d.h. Exergiegehalt minus unvermeidbare Exergieverluste.

$$ex_{pr, fuel} = \xi_{combustion}$$

Formel 4

$$\xi_{\text{combustion}} = \frac{\text{ex}_{\text{heat}}}{\text{ex}_{\text{fuel}}} = \frac{1 - \frac{T_0}{T_{\text{comb.products}}}}{\text{ex}_{\text{fuel}}}$$

Formel 5

Eine maximale Exergie von 85% kann für eine voll oxidierte Verbrennung hergeleitet werden, unter der Annahme dass die nutzbare Verbrennungstemperatur (mit verfügbaren Materialien) $T_{\text{comb}} \approx 1700\text{K}$ und $T_0 \approx 300\text{K}$ ist. Auf der anderen Seite zeigen die Exergiegehalte in Tabelle 1 dass chemische Energie im Prinzip auch bis zu 95% in andere Formen von Energie konvertiert werden kann. Die Differenz definiert dann der Exergieverlust welcher aus thermodynamischen Gründen unvermeidbar ist und die maximal nutzbaren Verbrennungstemperaturen mit den derzeitigen Technologien.

Daher berücksichtigen wir auch die thermodynamischen Verluste, welche mit den Temperaturgrenzen bedingt durch die derzeitige Technologie für Großanwendungen assoziiert werden. Für Erdgas und Erdöl hat Kraft-Wärme-Kopplung eine hohe exergetische Effizienz, diese hängen von den Turbineneingangstemperaturen und den Umgebungstemperaturen T_0 und T_{inlet} ab. Um mit der Fernwärme konsistent zu sein nehmen wir $T_0 = 273\text{K}$ (0°C) statt dem üblicheren $T_0 = 293\text{K}$ (20°C). Selbst in den neuesten Gasturbinen darf die Eingangstemperatur nicht T_{inlet} von $\approx 1700\text{K}$ (ca. 1450°C) überschreiten, da das heiße Gas die Turbinenschaufeln sehr stark belasten würde. Ebenso gilt bei der Nutzung von Kohle für die Metallschmelze eine übliche Temperatur von ca. $1400\text{--}1500^\circ\text{C}$. Bei der Biomasseverbrennung ist das maximale Temperaturniveau bei dem das Abgas genutzt werden kann hauptsächlich durch die Fremdstoffe vorgegeben. Wirbelschichtreaktoren, heutzutage einer der fortgeschrittensten Biomasseverbrennungsprozesse arbeiten normalerweise nicht über einem Temperaturniveau von 800°C für nicht-konvertierte feste Biomasse. Die Konversion von Biomasse erlaubt höhere Verbrennungstemperaturen aber führt zu Effizienzverlusten während der Konversionsschritte.

Auf diesen Annahmen und der Formel 5 basierend schätzen wir allgemeine Werte für die exergetischen Effizienzen für diese Prozesse (siehe Tabelle 2). Wie oben beschrieben nutzen wir diese Werte wie „in der Praxis nutzbare“ Exergie (d.h.

Exergiegehalt minus unvermeidbare Verluste aufgrund von Temperaturbeschränkungen, (Formel 6, Formel 7).

3.1.4 Fern- und Abwärme

Der exergetische Gehalt von Fernwärme kann entweder innerhalb der Systemgrenze des Gebäudes oder innerhalb der Systemgrenze zusammen mit der Wärmeproduktion und –verteilung berücksichtigt werden. Im ersten Fall ist der Exergiegehalt bemessen durch die Versorgungstemperatur des Fernwärmenetzes am Punkt des Gebäudes (und natürlich die Referenztemperatur). Für den Gegenstand dieses Papiers wählen wir den zweiten Fall da wir den Exergieinput für den ganzen Raumwärme- und Warmwassersektor feststellen wollen, welcher auch die Wärmekraftwerke von Fernwärmesystemen (oder die genutzte Abwärme) inkludiert. Natürlich hängt der Exergiegehalt der Fernwärme in diesem Fall von der Art der Wärmeerzeugung ab. Einige andere Papiere haben bereits exergiebezogene Analysen von Fernwärme und korrespondierenden Preisen durchgeführt, wo auch besonders die Wärmeverluste im Netz berücksichtigt wurden, z.B. (Poredos and Kitanovski, 2002)

Deswegen wollen wir die historische Entwicklung von Fernwärme in Österreich und den Exergiekonsum in diesem Sektor untersuchen. Basierend auf Daten der (Statistik Austria, 2009) haben wir den Exergieinput der Fernwärmesysteme in Österreich für die Periode von 1970-2008 berechnet. Für die Kraftwerke welche reine Fernwärmeheizkraftwerke sind ist die Vorgehensweise einfach die Multiplizierung des Energiekonsums ($Q_{heatplants,i}$) jedes Energieträgers mit dessen Exergiegehaltes (ex) (Formel 6).

$$EX_{heatplants}^{in} = \sum_i Q_{heatplants,i}^{in} \cdot ex_i$$

Formel 6

Für Kraftwerke mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) gibt es verschiedene Methoden die Anteile des Brennstoffinputs für die Wärmeerzeugung zuzuweisen. Wir entschieden uns für eine exergiebasierte Gewichtung der Outputs Wärme und Elektrizität (Formel 7). Also ist der Brennstoffinput, welcher der Wärmeproduktion eines KWK-Kraftwerkes (EX_{inCHP}) zuzuordnen ist, vorgegeben durch den Exergiegehalt des Wärmeoutputs verglichen mit dem Exergiegehalt des gesamten Outputs des Kraftwerkes (d.h. Wärme und Elektrizität).

Formel 7

$$EX_{CHP}^{in} = \sum_i Q_{CHP,i}^{in} \cdot ex_i \cdot \frac{ex_{th} \cdot Q_{th,i}^{out}}{ex_{th} \cdot Q_{th,i}^{out} + ex_{el} \cdot Q_{el,i}^{out}}$$

Abbildung 4 bis Abbildung 6 zeigt die historische Entwicklung von Fernwärme in Österreich in Bezug auf Energieoutput, Energiekonsum, Exergiekonsum und den Energieträgermix. Jede dieser Zahlen differenziert zwischen reinen Wärmekraftwerken und KWK-Kraftwerken. Der Anteil der Abwärme aus KWK-Kraftwerken in der gesamten Fernwärmeerzeugung blieb mit 48% relativ stabil in den 1970er Jahren und stieg in den späten 1970ern bis 2007 auf fast 70%. Während dieser Periode wuchs der gesamte Fernwärmesektor stark mit einer jährlichen durchschnittlichen Rate von 7%. In den frühen 1970ern war der Sektor hauptsächlich dominiert von Ölheizkraftwerken und Kohle-KWK. Seit den frühen 1980ern begann Erdgas eine immer wichtigere Rolle zu spielen, sowohl für reine Wärmekraftwerke als auch für KWK. Im selben Zeitraum wurden kommunale Müllverbrennungsanlagen immer wichtiger. Ölheizkraftwerke und KWK erlebten einen Höhepunkt Mitte der 1980er Jahre. Trotzdem dauerte es weitere 10 Jahre bis ein nennenswerter Anteil der Fernwärmeerzeugung von Biomasse bereitgestellt wurde. Während der Periode von 1988 bis 2008 konnte eine jährliche Wachstumsrate von 14% erreicht werden. Des Weiteren boten Einspeisetarife für Biomasse-KWK in den Jahren 2002 bis 2006 einen starken Anreiz für die Abwärmenutzung von Biomasse-KWK in Fernwärmenetzen. Dies führte zu einem Anteil des gemeinsamen Wärmeoutputs von Biomassewärmekraftwerken und Biomasse-KWKs an der gesamten Fernwärmeerzeugung von 38% im Jahr 2008.

Wir nahmen eine Eingangstemperatur von 150°C in das Fernwärmenetz an und konnten dann die gesamte Exergieeffizienz für diese Periode berechnen. (Dieser Abschnitt deckt nur den Exergiegehalt der Wärmeversorgung innerhalb des Fernwärmesektors ab, nicht die Versorgung der Raumwärme, Dieser Schritt folgt in den folgenden Kapiteln.) Sie stieg von 38% im Jahr 1970 auf ca. 53% im Jahr 2008. Dieser Anstieg ist vor allem auf den größeren Anteil von KWK und Biomasse im österreichischen Fernwärmesektor zurückzuführen.

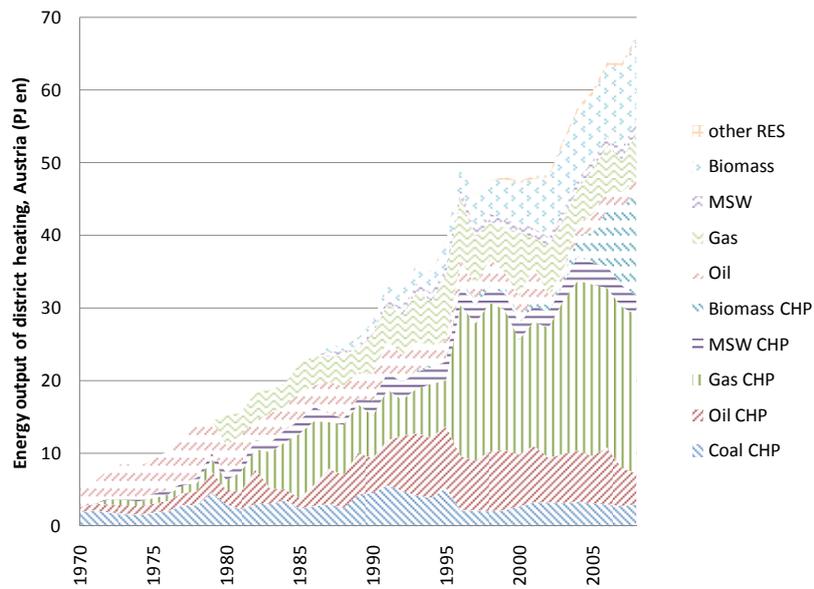


Abbildung 4: Energieoutput von Fernwärmekraftwerken, Österreich

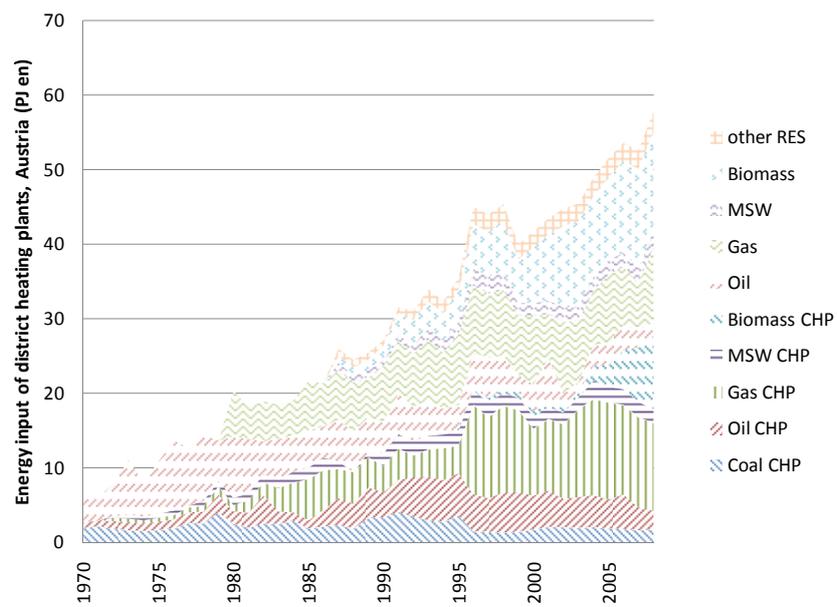


Abbildung 5: Energieinput in Fernwärmekraftwerke, Österreich

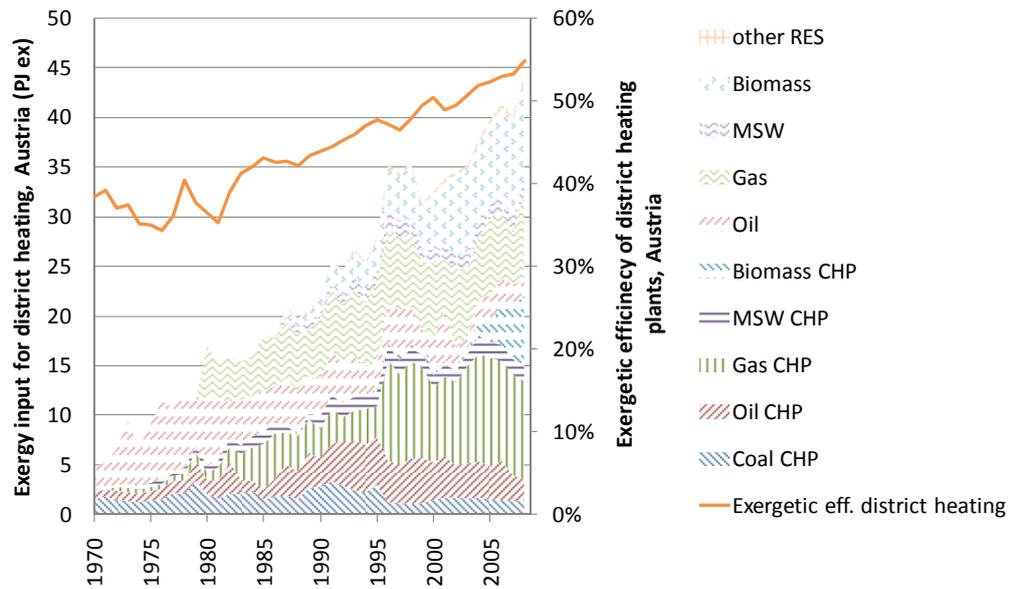


Abbildung 6: Exergieinput in Fernwärmekraftwerke in Österreich und resultierende exergetische Effizienz der Fernwärme

Basierend auf den Daten aus Abbildung 4 bis Abbildung 6 berechnen wir den durchschnittlichen Exergieinput pro Wärmeoutput von Fernwärmekraftwerken (ex_{dh}). Wir berechnen dies mit historischen Werten der (Statistik Austria, 2009) und nehmen typische Effizienzwerte für diese Kraftwerke an (Formel 8)

$$ex_{dh} = \frac{EX_{heatplants}^{in} + EX_{CHP}^{in}}{Q_{th}^{out}}$$

Formel 8

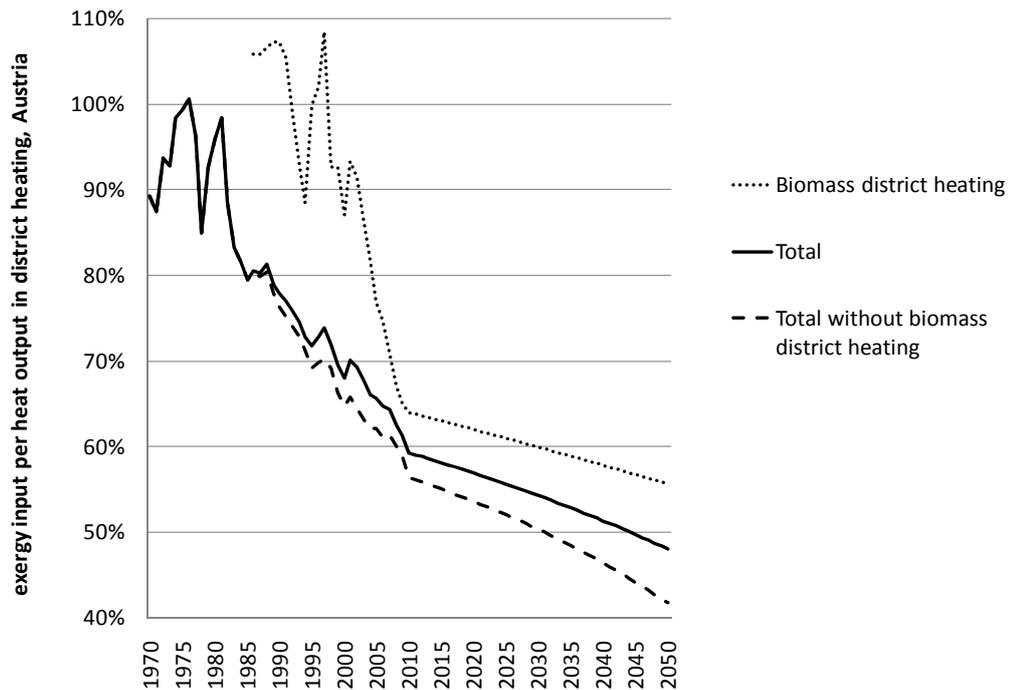


Abbildung 7: Exergieinput pro Wärmeoutput in Fernwärmekraftwerken, Österreich

Der resultierende Exergieinput welcher für jede Energieeinheit des Wärmeoutputs benötigt wird, wird in Abbildung 7 gezeigt. Wir nehmen die historische Analyse (1970-2008) als Startpunkt für die Abschätzung einer zukünftigen Entwicklung dieses Indikators. Diese Schätzung beinhaltet eine weitere Steigerung von KWK im Fernwärmekraftwerkspark und einen bestimmten Energieträgermix. Wir teilen die Ergebnisse für Fernwärme in Biomassefernwärme und andere Fernwärmekraftwerke. Für den Zweck dieses Papiers postulieren wir hier dass es einen weiteren Anstieg des Anteils der KWK in der Fernwärme geben wird. Ebenso gehen wir davon aus dass es einen Anstieg im Gebrauch der „anderen erneuerbaren Energieträger“ geben wird, womit hauptsächlich solare und geothermische Energie gemeint ist. Wir setzen einen leichten Anstieg der Verbrennung von kommunalen Abfällen voraus. Außerdem ist das (ökonomische) Potential von KWK begrenzt aufgrund des Fakts dass ein nennenswerter Anteil der Biomassefernwärme aus kleinen und mittleren Anlagen besteht (unter 10 MWh). Diese Annahmen führen zu einem Exergieinputfaktor pro Wärmeoutput von 57% für Biomassefernwärme und 44% für „andere Fernwärmesysteme“ im Jahr 2050 (andere erneuerbare Energieträger werden zur zweiten Gruppe gezählt). Tabelle 2 beinhaltet eine Zusammenfassung des Energieinputs in Fernwärmekraftwerken in Österreich und die resultierenden Exergiegehaltsfaktoren.

Tabelle 2: Energieinput in Fernwärmekraftwerken in Österreich und resultierender Exergiegehaltfaktor

	1970	1980	1990	2000	2010	2020	2030	2040	2050
Anteil an Energiekonsum (%)									
Kohle KWK	33%	12%	12%	4%	3%	3%	2%	1%	0%
Öl KWK	12%	8%	13%	11%	5%	4%	3%	1%	0%
Gas KWK	0%	4%	13%	22%	23%	25%	26%	27%	29%
Abfall KWK	0%	5%	6%	4%	4%	5%	5%	6%	8%
Biomasse KWK	0%	0%	0%	2%	20%	23%	27%	31%	37%
Kohle	5%	1%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Öl	50%	40%	15%	8%	3%	3%	2%	1%	0%
Gas	0%	30%	27%	22%	13%	11%	8%	4%	0%
Abfall	0%	0%	2%	4%	3%	3%	2%	1%	0%
Biomasse	0%	0%	7%	18%	23%	21%	18%	15%	12%
Andere ern. Energie	0%	0%	2%	5%	2%	4%	7%	11%	15%
Energie total (PJ) ^(a)	6.0	20.7	27.7	42.2					
Anteil am Exergiekonsum (%)									
Kohle KWK	33%	12%	13%	5%	4%	3%	2%	1%	0%
Öl KWK	12%	8%	13%	12%	5%	4%	3%	2%	0%
Gas KWK	0%	4%	14%	23%	25%	27%	29%	32%	36%
Abfall KWK	0%	4%	6%	4%	4%	4%	5%	7%	8%
Biomasse KWK	0%	0%	0%	2%	19%	22%	27%	33%	40%
Kohle	5%	1%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Öl	50%	40%	16%	9%	4%	3%	2%	1%	0%
Gas	0%	30%	28%	24%	14%	12%	9%	5%	0%
Abfall	0%	0%	2%	4%	3%	3%	2%	1%	0%
Biomasse	0%	0%	7%	17%	22%	21%	19%	16%	13%
Andere ern. Energie	0%	0%	0%	1%	0%	1%	2%	2%	3%
Energie gesamt (PJ) ^(a)	5.1	17.5	22.6	33.3					
Wärmeoutput gesamt (PJ)^(a)									
	5.5	15.4	28.4	47.5					
Output Exergie gesamt (PJ)^(a)									
	2.0	5.5	10.1	16.8					
Exergetische Effizienz (%)									
	38%	31%	45%	51%	58%	61%	64%	67%	71%
Exergiegehalt des Inputs pro Wärmeoutput (%)									
Fernwärme gesamt	91%	98%	80%	70%	61%	58%	56%	53%	50%
Fernwärme Biomasse ^(b)			109%	88%	65%	64%	62%	59%	57%
Fernwärme ohne Biomasse	91%	98%	78%	66%	58%	55%	52%	48%	44%

(a) Energie- und Exergiekonsum sowie Wärmeoutput unterscheidet sich von Szenario zu Szenario

(b) Die österreichische Energiestatistik (Statistik Austria, 2009) weist Fernwärme aus Biomasse nicht aus vor 1988. Der Wert von 1990 basiert nur auf relativ wenigen Kraftwerken und ist deswegen nicht zuverlässig.

Quellen: 1970 bis 2008 basiert auf historischen Daten von der offiziellen österreichischen Energiestatistik (Statistik Austria, 2009) und eigenen Berechnungen; 2009-2050 basiert auf eigenen Szenario-Annahmen.

3.1.5 Synthese

Tabelle 2 gibt eine Zusammenfassung von Werten des Exergiegehalts welche in diesem Papier auf Basis des Konzepts der "in der Praxis nutzbaren Exergie", d.h. zu berücksichtigen dass ein gewisser Exergieverlust unvermeidbar ist. Wir sind uns der Tatsache bewusst dass es eine gewisse Sensibilität in Bezug auf das Referenztemperaturniveau gibt. In (Utlu and Hepbasli, 2007b) wurde dies bereits im Detail diskutiert. Eine Variation der Referenztemperatur um +/- 5K für die chemischen Energieträger hat einen unwesentlichen Einfluss (unter 1% Veränderung im Exergiegehalt). Für Fernwärme führt die Variation zu einer Veränderung des Exergiegehalts von +/- 1.2% und für Raumwärme von +/- 1.7%. Aufgrund des niedrigen Exergiegehaltes von Raumwärme sollte diese Auswirkung in die Betrachtung mit einbezogen werden.

Tabelle 3: Exergiegehalt der in diesem Paper analysierten Energieträger (außer unvermeidbare Exergieverluste)(a)

Energieträger	Temperatur-niveau	Referenz Temperatur-niveau	Exergiegehalt wie in diesem Papier verwendet
Öl, Kohle, Gas	1500 °C	0°C	85%
Biomasse	800°C	0°C	75%
Abfall	800°C	0°C	75%
Elektrizität	-	-	100%
Biomasse Fernwärme	(c)	(c)	69% (2008) - 57% (2050) (b)
Fernwärme Energieträger	andere (c)	(c)	62% (2008) – 44% (2050)
Solarthermie	(d)	(d)	16%
Fernwärme (150°C)	Zuströmung 150°C	0°C	35%
Raumwärme (20°C)	20°C	0°C	7%
Warmwasser	60°C	20°C	12%

(a) Werte für den Exergiegehalt wurden aus dem Konzept des "in der Praxis nutzbar" hergeleitet, d.h. Berücksichtigung der nicht vermeidbaren Exergieverluste (wie beschrieben in Absatz 3.1.2 bis 3.1.4)

(b) Entwicklung des Fernwärmeerzeugungsmixes, siehe Absatz 3.1.4

(c) Siehe Absatz 3.1.4

(d) Siehe Absatz 3.1.2

4 Exergie im österreichischen Gebäudesektor

4.1 Szenarien von Raumwärme und Warmwasser in Österreich bis 2050

In diesem Abschnitt sollen Szenarien von Raumwärme und Warmwasser in Österreich dokumentiert und exergetisch bewertet werden. Das Ziel dieses Abschnitts ist es nicht, eine detaillierte Untersuchung der einwirkenden Parameter, Treiber und Hürden durchzuführen, welche diesen Szenarien zugrunde liegen. Dies wurde bereits getan, z.B. in (Kranzl et al., 2007), (Müller, 2010) und (Kranzl et al., 2011). Stattdessen wollen wir eine konsistente und relevante Auswahl von Szenarien des österreichischen Raumwärme- und Warmwassersektors präsentieren, welche dann als Ausgangsbasis für die folgende Exergieanalyse dient.

4.1.1 Modellierungshintergrund und Datenquellen

Die Szenarien basieren auf den Ergebnissen des Modells Invert/EE-Lab (Haas et al., 2009), (Kranzl et al., 2006), (Kranzl et al., 2007), (Nast et al., 2006), (Schriefl, 2007), (Stadler et al., 2007). (Müller, 2010) und (Kranzl et al., 2011).

Es gibt mehrere Bottom-up-Modelle um den thermischen Energiebedarf eines Gebäudebestandes zu beschreiben, z.B. dargelegt in (Hansen, 2009), (Reiter et al., 2009) und (Giraudet et al., 2009).

Diese Modelle stützen sich meist auf Untersuchungen und Annahmen von Konsumentenpräferenzen und dem Wandel des Energiesystems bei Haushalten, wie z.B. beschrieben wird bei (Goto und Ariu, 2009), (Braun, 2009) oder (Dalton et al., 2010).

Eine andere Literaturgruppe verweist auf die Analyse von Heizenergiebedarfsrechnungen, Untersuchungen von Einflussfaktoren von kurzfristigem Konsumentenverhalten und den Servicefaktor von Heizenergieleistungen, z.B. (Born et al., 2003), (Loga et al., 2003).

Modell ERNSTL/EE-Lab

Zur Szenarientwicklung des Sektors Raumwärme und Warmwasser wurde das am EEG entwickelte Modell ERNSTL/EE-Lab herangezogen. Die in diesem Modell adressierten Themen sind der Energiebedarf und –verbrauch von Gebäuden zur Heiz- und Warmwasserbereitstellung einerseits, andererseits wird im Modell ein Entscheidungsverhalten von Investoren abgebildet. Damit kann das Modell durch die Auswahl von Heizungssystemen und Gebäudesanierungen in Abhängigkeit von exogen gewählten Rahmenbedingungen die Auswirkungen auf den zukünftigen Energieverbrauch für die hier betrachteten Energiedienstleistungen abbilden. Der

grundsätzliche methodische Ansatz ist ein techno-ökonomischer Bottom-up Ansatz der zwischen unterschiedlichen Kohorten differenziert. Der Energieeinsatz wird über Gebäudekenngrößen wie der thermischen Qualität der Außenhülle und den klimatischen Bedingungen berechnet. Querschnittsdaten (im Gegensatz zu Zeitreihendaten) stellen den überwiegenden Dateninput für das Modell dar. Bei der Berechnung der Investitionsentscheidungen wird ein multinominaler Logit Ansatz verwendet.

Gebäudebestand

Als Datenbasis für den aggregierten, bestehenden Gebäude- und Heizungsbestand und den damit einhergehenden nationalen Energieverbrauch werden die vorhandenen Publikationen der Statistik Austria herangezogen. Im Bereich disaggregierter Daten werden Datenbanken der Autoren verwendet (Biermayr, 1998; Schriefl, 2007), wobei der Abgleich aller verwendeten Daten mittels nationaler Statistiken erfolgt. Zusammenfassend können folgende wesentlichen Quellen angegeben werden:

- Gebäudedaten: Statistik Austria, 2004, "Gebäude- und Wohnungszählung 2001"; Statistik Austria, 2006, Schriftenserie "Wohnungen 2002" bis „Wohnen 2009“; Statistik Austria, 2003-2010, "Arbeitsstättenzählung 2001", Statistik Austria: „Blick auf die Gemeinde: 4.27 Fertiggestellte Gebäude mit Wohnungen“ und „Merkmale: Gebäude und Wohnungen“; Statistik Austria, 2009, „Errichtung von Gebäuden und Wohnungen: Baubewilligungen und Fertigstellungen 2002-2009“, Statistik Austria, 2009, „Heizungen 2003/2004, 2005/2006 und 2007/2008“.
- Energieverbrauch und Energieverbrauchsstrukturen: Statistik Austria, 2005, "Nutzenergieanalyse 2008"; Statistik Austria, 1997, "Energieverbrauch der Haushalte 1996/1997", Mikrozensususerhebungen der Statistik Austria; Statistik Austria, 2009, „Energieeinsatz der Haushalte 2003/2004, 2005/2006 und 2007/2008“

Tabelle 4 zeigt die aktuelle Anzahl der Gebäude und Wohneinheiten, aufgeschlüsselt nach 3 Bauperioden sowie deren Sanierungszustand in der verwendeten Modellkalibrierung.

Tabelle 4. Anzahl an Gebäuden und Wohneinheiten von 2000 – 2008.

	2000	2002	2004	2006	2008	2000	2002	2004	2006	2008
	(1000 Gebäude)					(1000 Wohneinheiten)				
WG, vor 1945, unrenoviert	255	247	239	231	226	557	539	522	504	496
WG, vor 1945, renoviert	116	120	125	129	130	281	291	302	313	312
WG, 1945-1980, unrenoviert	611	592	572	553	535	1291	1250	1210	1169	1130
WG, 1945-1980, renoviert	99	109	119	129	146	232	255	277	300	337
WG, 1981-2000, unrenoviert	479	479	479	479	479	914	914	914	914	914
WG, 2001-2020, unrenoviert	0	49	106	146	173	0	97	213	292	351
NWG, vor 2010	186	190	195	199	201					

Zur Abschätzung der Entwicklung des zukünftigen Wohngebäudebestandes wurde auf die österreichische Raumordnungskonferenz (ÖROK, 2005): „ÖROK-Prognosen 2001-2031, Teil 2: Haushalte und Wohnungsbedarf nach Regionen und Bezirken Österreichs“ zurückgegriffen. Diese Publikation beschreibt die Entwicklungen des gesamten Wohnungs- und Haushaltsbestandes wie auch den Rückgang an Wohnungen in Gebäuden der Altersklasse „vor 1918“ und „1918-1944“.

Die in diesem Projekt unterstellte Entwicklung der Bruttogeschoßflächen zeigt Abbildung 8. Bei Wohngebäuden wird, ausgehend von etwa 380 Mio. m² in 2000, von einem Anstieg auf 476 Mio. m² ausgegangen. Für die Nicht-Wohngebäude werden beheizungsrelevante Flächen von 176 Mio. m² im Jahr 2000 unterstellt. Diese steigen im dargestellten Szenario auf 232 Mio. m². Der Zeitraum bis 2020 orientiert sich an der Wertschöpfung des Dienstleistungs- bzw. Industriesektors (Müller et al., 2009), ab 2020 wurden die Flächen der Nicht-Wohngebäude direkt an die Flächenentwicklung des Gebäudebestandes gekoppelt.

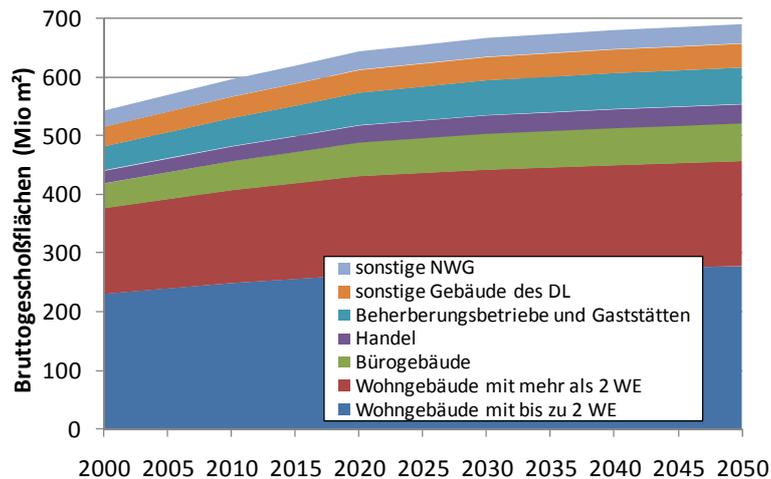


Abbildung 8: Entwicklung der Bruttogeschoßflächen von 2000 – 2050

Energiepreise

Energiepreisszenarien sind ein wichtiger Inputfaktor für die Entwicklung von Energierenovierungen von Gebäuden und die Aufnahme von effizienten Heizsystemen. Wir nutzen Eurostat Preisrelationen für 2007-2009 und berücksichtigen die Wachstumsraten des mittleren Energiepreisszenarios welches auf (Capros, 2008) basiert. Die Szenarien welche bis 2030 verfügbar waren wurden bis 2050 extrapoliert. Die angewandten Energiepreise sind in Tabelle 5 dokumentiert.

Tabelle 5: Angewandte Energiepreise¹

€/MWh	2010	2020	2030	2040	2050
Gas	72.5	84.4	95.4	107.6	118.6
Öl	74.7	87.0	98.3	110.9	122.3
Kohle	57.9	69.7	80.9	92.8	101.5
Rundholz	34.2	38.0	41.3	44.9	47.9
Hackschnitzel	27.1	30.1	32.8	35.6	38.0
Pellets	49.1	54.6	59.4	64.5	68.9
Elektrizität	168.1	190.0	209.7	231.5	251.6
Fernwärme	46.4	51.9	56.8	62.1	66.7
Biomasse					
Fernwärme	69.2	76.9	83.7	90.8	97.1

Die in dieser Tabelle dokumentierten Energiepreise inkludieren nur die variablen Preiskomponenten. Es wurden zusätzlich zu diesen Preisen in die ökonomische Analyse des Modells Invert/EE-Lab fixe Kostenkomponenten hinzugefügt. Diese Komponenten beinhalten Kapitalkosten und die Betriebs- und Wartungskosten von Heizsystemen.

Mehr Details in Bezug auf Kostendaten, ökonomischen Vergleichen von Heizsystemen und Quellen finden sich in (Kranzl et al., 2010).

4.1.2 Szenarienüberblick

Wir präsentieren drei Szenarien für den Energieträgermix im österreichischen Raumwärme- und Warmwassersektor. Diese basieren auf Müller et al. (2010). Die Szenarien unterscheiden sich im Wesentlichen entsprechend zweier Entwicklungen: (1) die Aufnahme von Maßnahmen zur thermischen Renovierung und (2) die Entwicklung von erneuerbaren und effizienten Heizsystemen.

In jedem dieser Szenarien schließen wir Maßnahmen für die Stimulation von thermischen Renovierungen mit ein. Die Rate der Gebäuderenovierungen steigt in allen Szenarien von 0,4% auf ein Maximum von 1,3 % pro Jahr. Die Qualität der thermischen Gebäuderenovierung ist jedenfalls von Szenario zu Szenario sehr unterschiedlich. Weiters unterscheiden sich die Energieträgermixe stark aufgrund der verschiedenen Energiepreisszenarien und Politikrahmenbedingungen. Insbesondere werden wir auf die folgenden drei Szenarien näher eingehen:

- „Frozen Technology“ Referenzszenario:
Dieses Szenario dient hauptsächlich als ein theoretisches Referenzszenario welches grob den Status quo des Jahres 2000 und die Entwicklungen in dieser Periode konserviert. Wir nehmen sehr niedrige Energiepreise (das Niveau von 2005 bleibt bis in das Jahr 2050 stabil) und keine technologische

Veränderung an (z.B. gibt es keine Effizienzverbesserungen bei den Heiztechniken, solarthermische Anlagen werden nur für Warmwasserbereitung genutzt). Es gibt keine thermische Verbesserung von neuen Gebäuden (z.B. zeigen Gebäude die im Jahr 2040 gebaut werden die gleiche Qualität wie solche aus dem Jahr 2020). Thermische Gebäuderenovierung findet statt, aber mit einer niedrigen Qualität: der Standard der Gebäudesanierung aus dem Jahr 2000 bleibt konstant bis zum Jahr 2050 (z.B. moderate Dämmungsmaßnahmen für Fassaden, Decken, Keller und Austausch von Fenstern). Es gibt keine Politikmaßnahmen für Gebäudesanierung oder erneuerbare Heizsysteme.

- Szenario „Business as usual“:
Das BAU Szenario bietet eine Entwicklung welche auf moderat steigenden Energiepreisen (siehe Abbildung 10) und moderaten Politikmaßnahmen (Investitionsförderungen auf dem Niveau von 2010) aufbaut, was Systeme erneuerbarer Wärme und thermische Gebäudesanierungen unterstützt. Dies erhöht die Qualität von thermischen Gebäudesanierungen Schritt für Schritt. Vor allem nach 2020 finden ambitionierte Dämmungsmaßnahmen und Fensteraustausche statt. Dies führt zu einem sinkenden Konsum von fossilen Energien. Trotzdem gibt es keine starken Anreize für einen ambitionierten Übergang auf ein kohlenstoffarmes Energiesystem im Heizsektor.

- Szenario basierend auf erneuerbarer Wärme:
Dieses Szenario zeigt eine realistisch-ambitionierte Verbesserung des österreichischen Raumwärme- und Warmwassersektors. Neben den Effizienzmaßnahmen und den moderat ansteigenden Energiepreisen welche im BAU-Szenario beschrieben sind (Abbildung 10), führen ambitionierte Politikinstrumente (Nutzungsverpflichtungen erneuerbarer Wärme für neue Gebäude und Gebäude welche einer grundlegenden Sanierung unterzogen werden kombiniert mit ungefähr 25% höheren Investitionsförderungen als im Jahr 2010) zu einem entsprechenden Wachstum von Technologien erneuerbarer Wärme.

4.2 Ergebnisse der Szenarien

Die folgenden Abbildungen zeigen die historische Entwicklung des österreichischen Raumwärme- und Warmwassersektors und die Ergebnisse der drei Simulationsläufe. Die Daten der historischen Entwicklung von 1970-2008 basiert auf der österreichischen Energiestatistik (Statistik Austria, 2009). Der Energieverbrauch wurde dabei um die Abweichung der Heizgradtage korrigiert. Das Modell

Invert/EELab wurde auf die offiziellen Energiestatistiken kalibriert. Die Graphen zeigen die historische Entwicklung von 1970-2008 und die Simulationsergebnisse von 2009-2050. Am Übergang von den historischen Daten zu den Ergebnissen aus den Simulationsläufen gibt es einen kleinen „Sprung“. Es gibt für diesen mehrere Gründe:

- Invert/EELab ist ein bottom-up Modell welches hauptsächlich auf dem österreichischen Gebäudebestand basiert, größtenteils von (Statistik Austria, 2004a), (Statistik Austria, 2004b), (Statistik Austria, 2006). Diese bottom-up-Daten sind nicht immer voll konsistent mit den Energiestatistiken (Statistik Austria 2009). Deswegen gibt es leichte Abweichungen zwischen den bottom-up Szenarien und den offiziellen Energiestatistiken. In (Haas et al., 2009) wurde ein Vergleich zwischen den historischen Daten und den Invert/EELab Simulationsergebnissen durchgeführt und es wurde gezeigt dass die Simulationsergebnisse auf die durchschnittliche Entwicklung der empirischen Energiestatistiken für diesen Zeitabschnitt passen.
- Ein solcher Sprung kommt vor allem im Fall von Umgebungsenergie vor. (Statistik Austria, 2009) weist relativ hohe Werte für Umgebungsenergie im Servicesektor aus. Die Anzahl von Wärmepumpen welche im Moment installiert sind sprechen laut (Biermayr et al., 2010) nicht für diese hohen Werte. Sie könnten auch noch die Nutzung von Wärme aus Abfällen inkludieren, vielleicht auch für Prozessanwendungen. Für die Simulationen im Modell Invert/EELab nutzten wir die Daten aus (Biermayr et al., 2010), welche um das Jahr 2008 leichte Unstetigkeiten aufweisen.

Alle Szenarien zeigen dass die Energienachfrage fällt, teilweise sogar drastisch. Sogar im „Frozen Technology“ Szenario scheint ein Bruch im historischen Trend aufzutreten. In der Tat zeigen die jüngsten Daten der österreichischen Energiestatistik (Statistik Austria, 2009) eine stabile oder leicht fallende Energienachfrage für Raumwärme und Warmwasser in den letzten Jahren. Dies stützt unsere Annahme dass die momentan ablaufenden Aktivitäten für thermische Gebäudesanierungen, hohe thermische Gebäudestandards für neue Gebäude und die Unterstützung von effizienten Heizsystemen bereits einen Bruch der steigenden Energienachfrage im österreichischen Raumwärme- und Warmwassersektor herbeigeführt hat. In der Zukunft stellt sich die Frage bis zu welchem Ausmaß diese Entwicklung beschleunigt werden kann und wie lange mit ambitioniertem Wachstum von erneuerbaren und hocheffizienten Heizsystemen gerechnet werden kann.

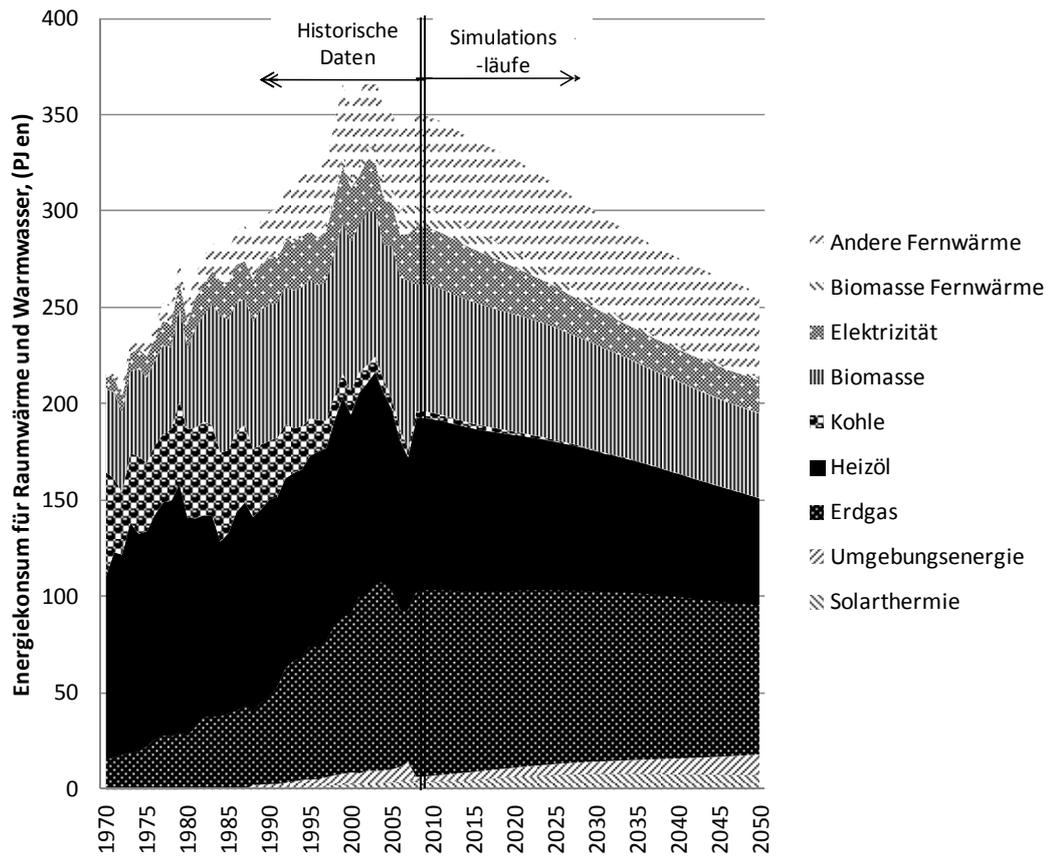


Abbildung 9: Energieträgermix für Raumwärme und Warmwasser in Österreich, "Frozen Technology" Referenzszenario

Quellen: (Statistik Austria, 2009), (Müller et al., 2010), eigene Berechnungen

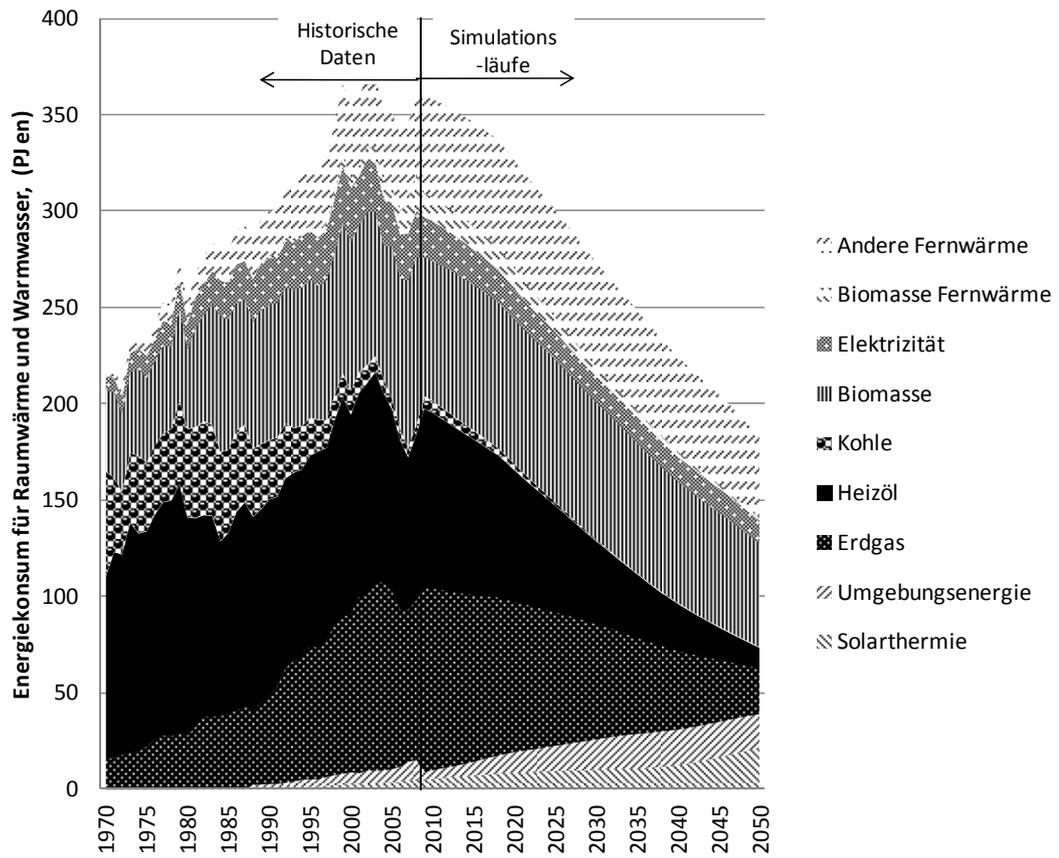


Abbildung 10: Energieträgermix für Raumwärme und Warmwasser in Österreich, „Business as usual“ Szenario

Quellen: (Statistik Austria, 2009), (Müller et al., 2010), eigene Berechnungen

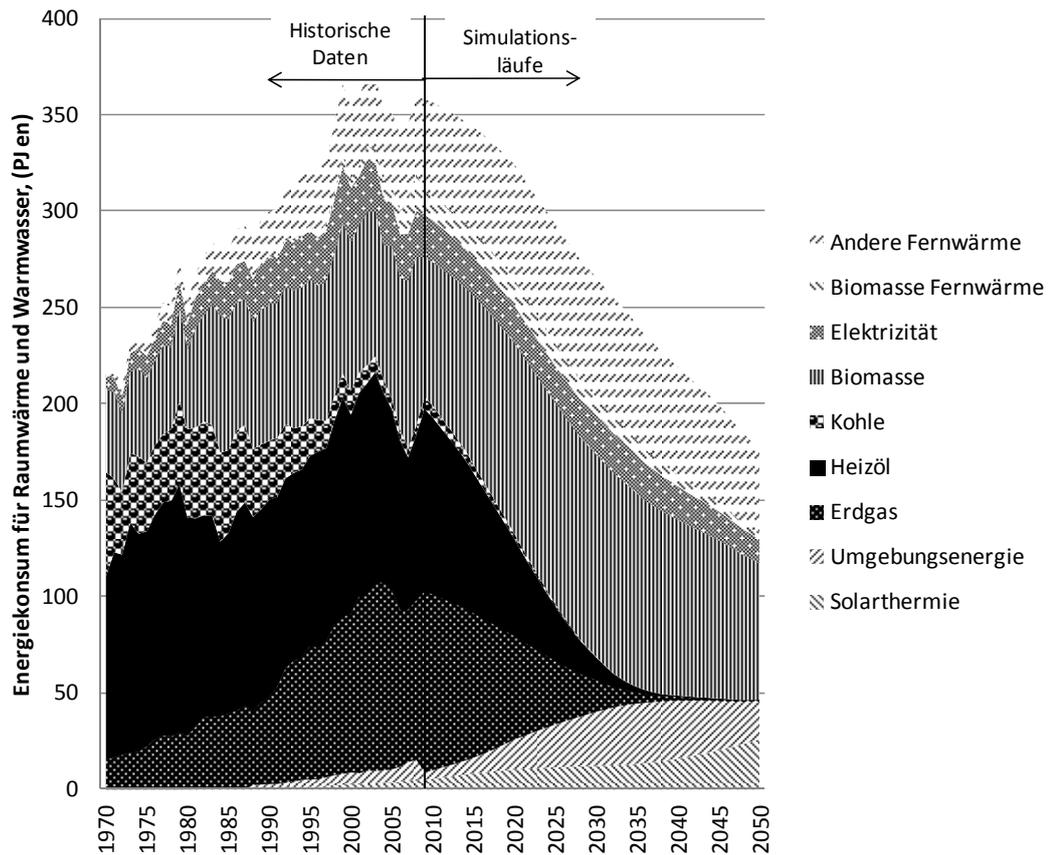


Abbildung 11: Energieträgermix für Raumwärme und Warmwasser in Österreich, Szenario basierend auf erneuerbarer Wärme
 Quellen: (Statistik Austria, 2009), (Müller et al., 2010), eigene Berechnungen

Abbildung 9 bis Abbildung 11 zeigen die Ergebnisse der drei Szenarien. Im „Frozen Technology“ Referenzszenario bleiben Heizöl und Erdgas die dominanten Energiequellen dieses Sektors. Biomasse, Umgebungsenergie und Solarthermie können ihre Marktanteile nur moderat erhöhen.

Das „Business as usual“ Szenario resultiert in einem stetigem Rückgang von Öl und Gas. Ihr Anteil am gesamten Energiekonsum in 2050 ist weniger als 20%. Die absolute Höhe von Biomasse und Fernwärme sinkt langsam. Trotzdem steigt ihr Marktanteil aufgrund der reduzierten Energienachfrage (30% Biomasse und 24% Fernwärme in 2050). Solarthermische Energie und Umgebungsenergie können sich in absoluten und relativen Werten stark verbessern. Im Jahr 2050 erreichen solarthermische Energie und Umgebungsenergie einen Anteil von 12% bzw. 10%.

Das auf erneuerbarer Wärme basierende Szenario zeigt, dass ein Auslaufen der fossilen Energien bis ungefähr 2035 möglich ist. In diesem Szenario wird der höchste Anteil von Biomasse gedeckt welche in absoluten und relativen Werten und Höchstständen um 2027 herum stark steigen (ca. 115PJ Energiekonsum für

Biomasse und Biomasse Fernwärme). trotzdem ist die absolute Energienachfrage für Biomasse im Heizsektor in 2050 niedriger als in 2010. Umgebungsenergie zeigt hohe Wachstumsraten und Höchststände um 2035. Nach diesem Zeitpunkt steigt Solarthermie stark an.

Wir möchten betonen, dass weder die Entwicklung der Nachfrage noch die Entwicklung der erneuerbaren Wärme in diesem Szenario als maximal erreichbare Szenarien gesehen werden sollten. Mithilfe von ambitionierter Politik und/oder hohen Energiepreisen können noch schnellere Übergangsprozesse machbar sein. Streicher et al. (2010) zeigen auf dass ein stärkerer Rückgang der Energienachfrage und ein starker Anstieg von solarthermischen Systemen und Wärmepumpen nötig ist um eine Energieautarkie Österreichs bis zum Jahr 2050 zu erreichen. Dies ist aber nicht Gegenstand dieses Papiers.

4.3 Szenarien zum Exergiekonsum für Raumwärme und Warmwasser

Analog zur Methodik weiter oben analysieren wir den Exergiekonsum im österreichischen Raumwärme- und Warmwassersektor für jede der drei bereits vorgestellten Szenarien.

Exergetische Analysen wurden bereits für verschiedene Sektoren und Regionen in der erschienenen Literatur durchgeführt. Wichtige Beispiele für den Industriesektor sind (Al-Ghandoor et al., 2010), (Ayres et al., 2003) und (Oladiran and Meyer, 2007), (Ukidwe and Bakshi, 2007). Mehrere Autoren beschrieben den Exergiekonsum und untersuchten exergetische Effizienzen in verschiedenen Ländern (teilweise für die ganze Volkswirtschaft, teilweise für ausgewählte Sektoren wie Transport), z.B. China (Chen and Chen, 2007a), (Chen and Chen, 2007b), Saudi Arabien (Dincer et al., 2004), Türkei (Ediger and Camdall, 2007), (Utlu and Hepbasli, 2005), (Utlu and Hepbasli, 2006), (Utlu and Hepbasli, 2007a), Jordanien (Jaber et al., 2008), Japan (Kondo, 2009), Niederlande (Ptasinski et al., 2006), Malaysia (Saidur et al., 2007), USA (Warr et al., 2008) und vergleichende Analysen für Österreich, Japan, Großbritannien und USA (Warr et al., 2010). Für unsere Zwecke sind natürlich die Analysen welche sich mit Raumwärme beschäftigen besonders interessant: (Dovjak et al., 2010) untersuchen den Exergiekonsum in verschiedenen Gebäudefällen für Raumwärme in Slowenien. (Schweiker und Shukuya, 2010) analysieren den Exergiekonsum für Heizen und Kühlen abhängig von thermischer Sanierung und Verhaltensänderungen durch Fallstudien an verschiedenen Gebäuden. (Yildiz and Güngör, 2009): führen Energie- und Exergieanalysen von Raumwärme in ausgewählten Gebäudetypen durch. Des weiteren ist der Heizsektor teilweise auch in verschiedenen Studien des Wohn- und Gewerbesektors mit abgedeckt (z.B. (Kondo, 2009), (Saidur et al., 2007), (Utlu and Hepbasli, 2005). Letzterer bietet eine exergetische Analyse mit Bezug auf einen

Ausblick auf den Wohnsektor bis ins Jahr 2020. Hingegen wissen wir nichts von einer exergetischen Analyse des Raumwärme- und Warmwassersektors welche die historischen Daten mit Simulationsergebnissen für die nächsten Jahrzehnte kombiniert, speziell auch für den Fall Österreich.

Unsere Analyse fügt ein Beispiel für den österreichischen Raumwärme- und Warmwassersektor zu dieser Literaturliste hinzu. Weiters bietet es dynamische Aspekte der Integration von exergetischen Analysen in Szenarien bis zum Jahr 2050.

Die Ergebnisse (dargestellt in Abbildung 12, Abbildung 13 und Abbildung 14) zeigen dass ein steigender Gebrauch von Technologien erneuerbarer Wärme zu einem relativ steil abfallendem Energiekonsum führt. Auf der einen Seite liegt dies an den Maßnahmen zur thermischen Sanierung und der Reduzierung der Energienachfrage. Auf der anderen Seite liegt dies auch am Rückgang des Exergiegehalts. Der leichte Rückgang im Exergiegehalt welcher in den letzten Jahrzehnten stattgefunden beschleunigt stark im zweiten und dritten Szenario.

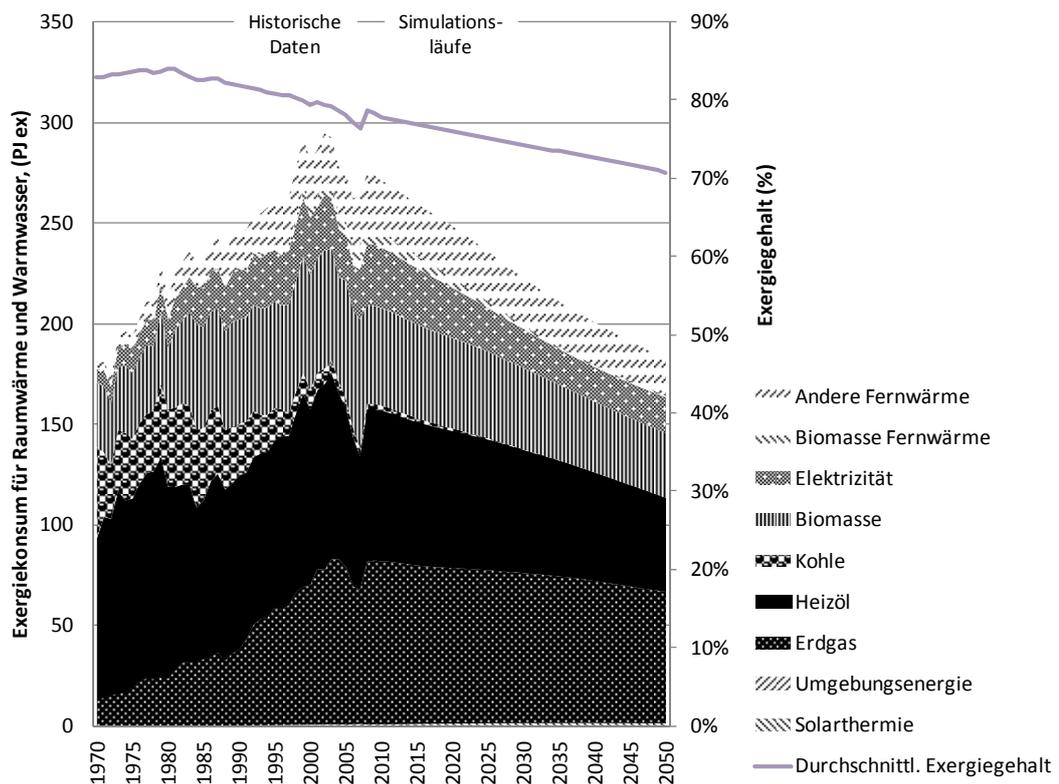


Abbildung 12: Exergiekonsum für Raumwärme und Warmwasser in Österreich (Heizgradtage berichtigt), „Frozen Technology“ Referenzszenario

Quellen: (Statistik Austria, 2009), (Müller et al., 2010), eigene Berechnungen

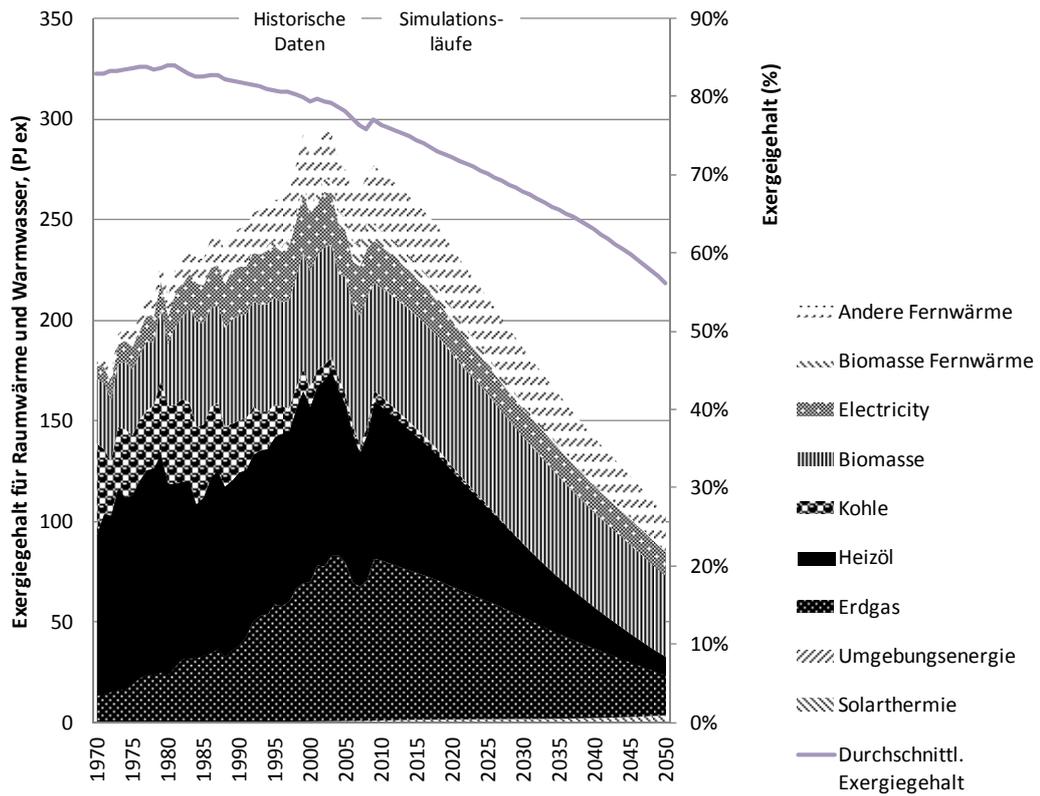


Abbildung 13: Exergiekonsum für Raumwärme und Warmwasser in Österreich (Heizgradtage berichtigt), "Business as usual" Szenario

Quellen: (Statistik Austria, 2009), (Müller et al., 2010), eigene Berechnungen

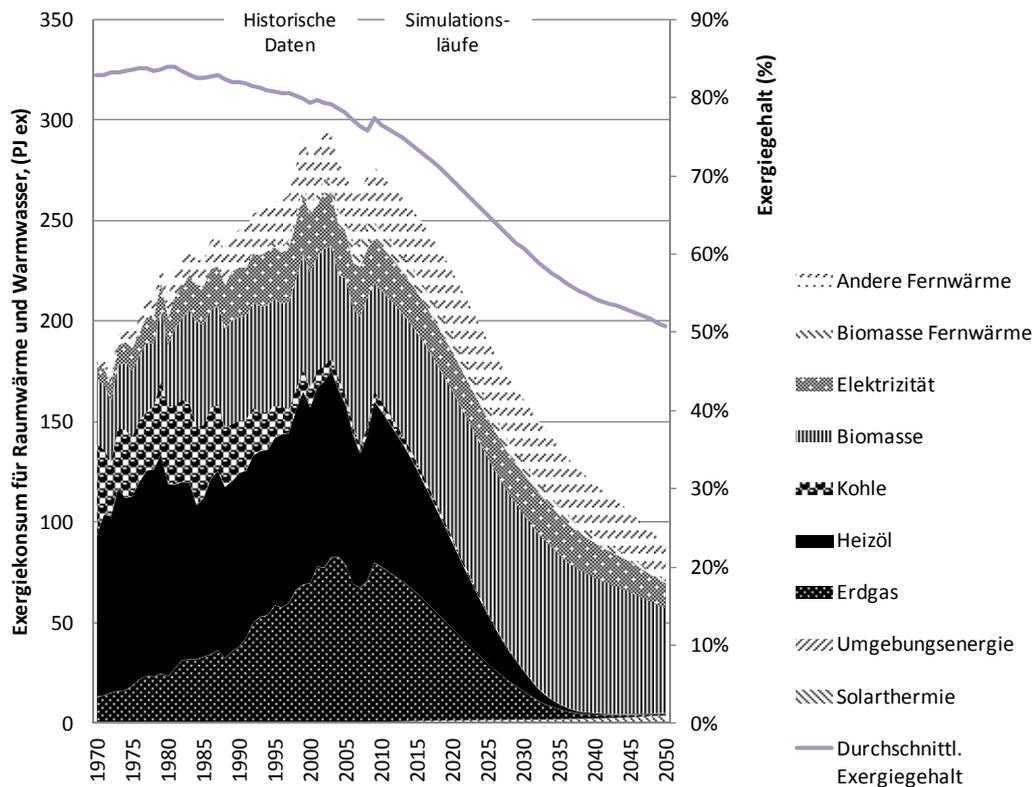


Abbildung 14: Exergiekonsum für Raumwärme und Warmwasser in Österreich (Heizgradtage berichtigt), Szenario basierend auf erneuerbarer Wärme
 Quellen: (Statistik Austria, 2009), (Müller et al., 2010), eigene Berechnungen

Abbildung 15 vergleicht die exergetische Effizienz in den drei untersuchten Szenarien. Für diese Berechnung wurden folgende Schritte durchgeführt: (1) Berechnung des Nutzwärmeverbrauchs (basierend auf dem Endenergieverbrauch und typischen Energieeffizienz-Werten ($\eta_{i,t}$) für verschiedene Heizsysteme basierend auf (Diefenbach et al., 2002),

(2) Berechnung des Exergiegehaltes von nutzbarer Wärmeenergie unter Verwendung des Anteils an Raumwärme ($\alpha_{sh,t}$) und Warmwasser ($\alpha_{hw,t}$) im untersuchten Zeitraum und (3) Division des Exergiegehaltes von nutzbarer Wärmeenergie durch die Summe des Exergiekonsums jedes Energieträgers ($EX_{i,t}$).

$$\xi_t = \frac{EX_{sh,t} + EX_{hw,t}}{\sum_i EX_{i,t}} = \frac{\sum_i Q_{fe,i,t} \cdot \eta_{i,t} \cdot (ex_{sh} \cdot \alpha_{sh,t} + ex_{hw} \cdot \alpha_{hw,t})}{\sum_i Q_{fe,i,t} \cdot ex_{i,t}} \quad \text{Formel 9}$$

Aufgrund der Verbesserungen in der Energieeffizienz als auch aufgrund von Verbesserungen im Heizsystememix erhöhte sich die exergetische Effizienz im österreichischen Raumwärme- und Warmwassersektor von 1970 bis 2008 von ungefähr 5% auf mehr als 9%. Der Sprung im Übergang der historischen Daten (basierend auf Statistik Austria, 2009) auf die bottom-up Simulationen lassen sich mit Dateninkonsistenzen und verschiedenen methodischen Vorgehensweisen zwischen der Sammlung der historischen Daten und der Berechnung im Modell erklären (z.B. in Bezug auf das Niveau von Umgebungstemperatur wie bereits vorher erwähnt). Aufgrund des unterschiedlichen Energieträgermixes und vor allem aufgrund des unterschiedlichen Anteils von thermischer Energie und Umgebungsenergie liegt gesamte exergetische Effizienz im Jahr 2050 im Bereich von weniger als 13% (im fossilen Szenario) bis zu mehr als 18% im erneuerbare Wärme Szenario.

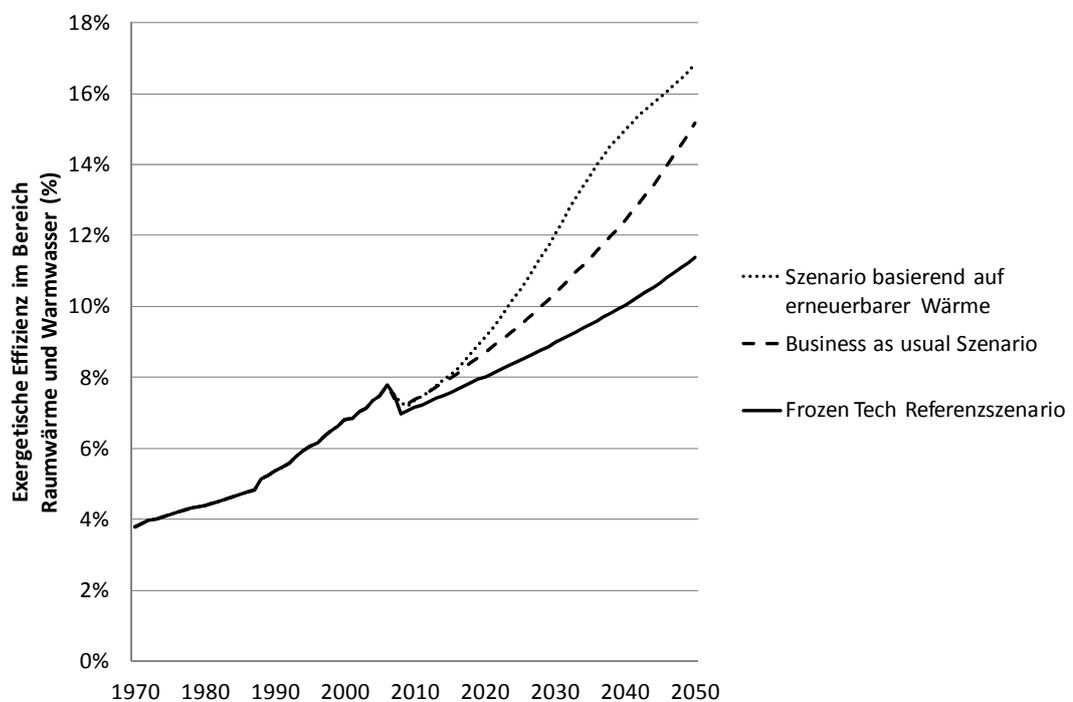


Abbildung 15: Vergleich der exergetischen Effizienz im Raumwärme und Warmwassersektor in Österreich von 1970-2050 in den drei untersuchten Szenarien

Abbildung 16 zeigt das Wachstum von Schlüsselindikatoren des österreichischen Raumwärme- und Warmwassersektors von 1970 bis 2005 (historische Daten) und von 2007 bis 2050 (Szenarien). Trotz der Tatsache dass die beheizte Gebäudefläche zunimmt (Hanika et al., 2005), verringert sich der Konsum nutzbarer Energie aufgrund von gesteigerter thermischer Sanierung. Der Konsum nutzbarer Exergie steigt mit einer etwas niedrigeren Rate da es ein steigendes Niveau der Warmwasser/Raumwärme-Relation gibt. Der finale Energiekonsum kann aufgrund der reduzierten thermischen Sanierung und des höheren Anteils an Solarenergie

und Umgebungsenergie reduziert werden. Auf jeden Fall kompensiert der gestiegene Anteil der Biomasse einiges von diesem Trend aufgrund der niedrigeren Effizienz von Biomassekesseln verglichen mit z.B. Erdgaskesseln. Vor allem im Szenario basierend auf erneuerbarer Wärme sinkt der finale Exergiekonsum dramatisch.

Tabelle 6 gibt einen Überblick sowohl über den Energie- und Exergiekonsum als auch den Energieträgermix im österreichischen gebäudebezogenen Wärmesektor von 1970-2050 basierend auf historischen Daten und verschiedenen Simulationsergebnissen.

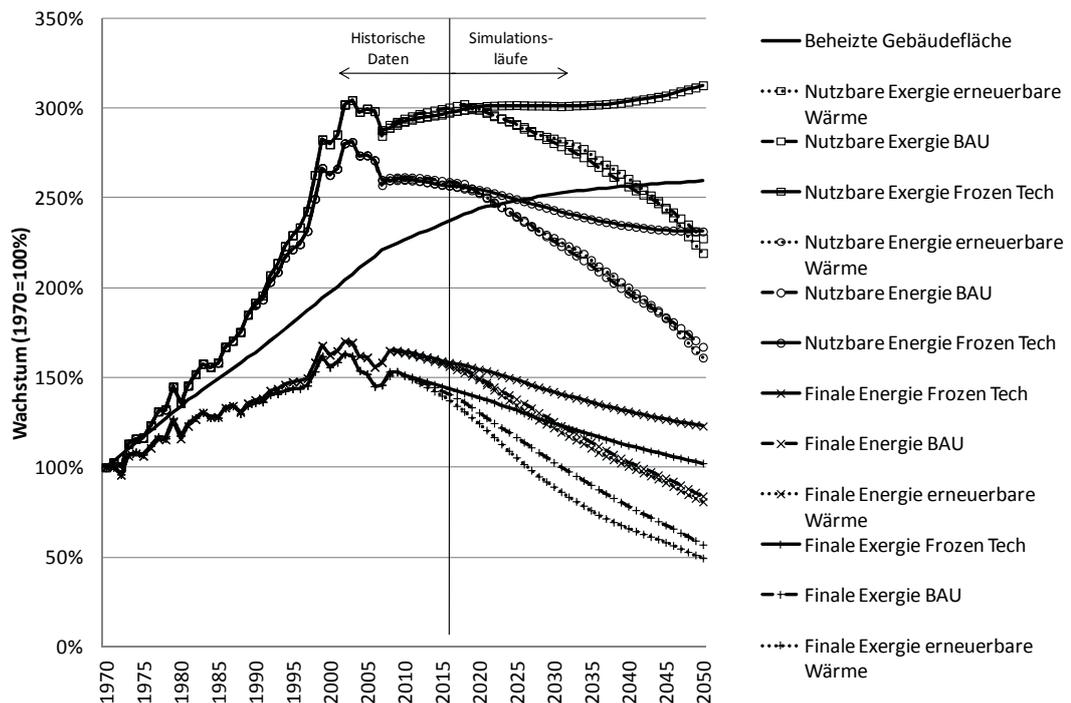


Abbildung 16: Gegenüberstellung von exergetischer Effizienz im Sektor Raumwärme und Warmwasser von 1970-2050 in den drei untersuchten Szenarien, Österreich
 Quellen: (Statistik Austria, 2009), (Statistik Austria, 2004a), eigene Berechnungen

Was die Referenztemperatur anbelangt wurde eine Sensitivitätsanalyse ausgeführt. Eine Variation der Referenztemperatur von +5K führt zu einer Reduzierung der gesamten exergetischen Effizienz auf 11,4%, 15,2% und 16,8% im „Frozen Technology“ Referenzszenario, im „Business as usual“-Szenario und dem Szenario basierend auf erneuerbarer Wärme. Dies bedeutet eine Differenz von ca. 1,5% und 2,1%. Aufgrund der beachtlichen klimatischen Differenzen in verschiedenen Regionen Österreichs und der Variation in den unterschiedlichen Außentemperaturen während der Heizperiode sollte dieser Aspekt in weiterführender Forschung näher, und zwar in einer stärkeren regionalen und dynamischen Auflösung, untersucht werden.

Tabelle 6: Zusammenfassung von Energie- und Exergiekonsum und Energieträgermix gemäß historischer Daten und Simulationsergebnissen

	Historic data				Frozen technology reference scenario					Business as usual scenario					RES-H based scenario				
	197	198	199	200	201	202	203	2040	2050	2010	202	203	204	205	201	202	203	204	205
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Share of final energy consumption																			
Solar thermal	0%	0%	0%	1%	1%	1%	0%	0%	0%	2%	3%	4%	6%	12%	2%	3%	5%	7%	15%
Ambient energy	0%	0%	1%	2%	1%	1%	0%	0%	0%	1%	3%	6%	8%	10%	1%	5%	11%	14%	11%
Natural gas	7%	11%	15%	23%	28%	29%	28%	26%	23%	26%	24%	22%	18%	13%	26%	17%	6%	1%	0%
Heating oil	43%	45%	34%	29%	26%	25%	29%	31%	32%	25%	21%	16%	11%	6%	26%	15%	4%	0%	0%
Coal	25%	18%	10%	3%	2%	1%	0%	0%	0%	2%	1%	0%	0%	0%	2%	1%	0%	0%	0%
Biomass	20%	16%	23%	22%	19%	18%	17%	16%	16%	20%	23%	26%	28%	30%	21%	30%	39%	41%	40%
Electricity	3%	6%	8%	8%	6%	4%	2%	2%	2%	6%	5%	5%	6%	6%	6%	6%	8%	8%	7%
District heat biomass	0%	0%	0%	1%	4%	4%	4%	3%	3%	3%	3%	2%	1%	1%	3%	4%	4%	3%	2%
Other district heat	2%	4%	8%	11%	14%	17%	20%	22%	24%	14%	17%	20%	22%	23%	14%	18%	23%	26%	25%
Share of final exergy consumption																			
Solar thermal	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	1%	1%	3%	0%	1%	1%	2%	5%
Ambient energy	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Natural gas	7%	11%	15%	25%	30%	32%	31%	29%	27%	29%	28%	27%	24%	19%	28%	20%	9%	2%	1%
Heating oil	44%	45%	35%	31%	29%	28%	33%	35%	38%	28%	24%	19%	14%	9%	28%	19%	6%	1%	0%
Coal	25%	18%	11%	4%	2%	1%	0%	0%	0%	2%	1%	0%	0%	0%	2%	1%	0%	0%	0%
Biomass	18%	14%	21%	20%	18%	18%	16%	16%	16%	20%	24%	28%	33%	39%	20%	33%	48%	56%	58%
Electricity	4%	7%	10%	10%	7%	5%	3%	2%	3%	8%	7%	7%	9%	11%	8%	9%	12%	14%	13%
District heat biomass	0%	0%	0%	2%	3%	4%	3%	3%	3%	3%	3%	2%	1%	1%	3%	4%	4%	3%	2%
Other district heat	2%	5%	7%	9%	11%	12%	14%	14%	15%	11%	13%	15%	17%	18%	10%	14%	20%	22%	21%
Total consumption space heating and hot water (PJ)																			

Final energy consumption	218	253	300	355	359	329	279	234	193	358	326	273	224	183	356	324	266	219	176
Final exergy consumption	182	214	248	284	280	252	212	174	141	276	238	188	143	105	276	228	163	121	91
Useful energy	118	160	225	311	308	292	254	217	183	309	298	267	233	197	307	299	269	236	190
Useful exergy	9	12	17	24	24	24	21	19	16	24	24	22	20	18	24	24	23	20	17
Exergy content(%)	84%	85%	83%	80%	78%	77%	76%	75%	73%	77%	73%	69%	64%	57%	77%	70%	61%	55%	52%
Exergetic efficiency (%)	5%	5%	7%	8%	9%	9%	10%	11%	12%	9%	10%	12%	14%	17%	9%	11%	14%	17%	19%

4.4 Synthese und Schlussfolgerung

Die Ergebnisse in dieser Analyse zeigen, dass es ein großes Potential von steigender exergetischer Effizienz im österreichischen Raumwärme- und Warmwassersektor gibt. Ein Teil dieses Potentials wurde bereits in der Periode zwischen 1970 und 2008 realisiert: in dieser Zeit stieg die exergetische Effizienz um ca. 4% aufgrund einer höheren energetischen Effizienz von Heizsystemen und einer moderaten Reduktion des Energiegehalts von angewandten Energieträgern. Trotzdem resultierte das hohe Wachstum des Energiekonsums, auch ausgelöst durch Wachstum in Wohnraum und Komfortniveau, (Unander, 2004) in einer signifikanten Steigung des exergetischen Konsums. Die Szenarien bis zum Jahr 2050 zeigen dass eine viel stärkerer Anstieg der exergetischen Effizienz machbar wäre: in den ambitioniertesten Szenarien welche in diesem Papier vorgestellt wurden könnte die exergetische Effizienz um mehr als 11% gesteigert werden. Gleichzeitig könnte der Exergiegehalt des Energiekonsums in diesem Sektor um fast 30% zurückgehen. Zusammen mit den Maßnahmen für thermische Sanierung könnte dies zu einer Reduktion des exergetischen Konsums von 2008 bis 2050 um ca. zwei Drittel führen.

Das Konzept der Exergie führt zu einem tieferen Verständnis der verschiedenen Qualitäten von Energieträgern und Energiedienstleistungen. Vor allem im Falle von Raumwärme mit seiner niederexergetischen Charakteristik der bereitgestellten Energiedienstleistung geht die exergetische Betrachtung weit über die reine energetische Analyse hinaus. Während energetische Analysen nicht zwischen verschiedenen Qualitätsniveaus von Energieträgern und Energiedienstleistungen unterscheiden, könnte das reine Ziel Treibhausgasemissionen zu verringern dazu führen dass die hohe Qualität und damit das hohe exergetische Potential von Bioenergie vernachlässigt wird, für welche Verwendungszwecke mit höherer Qualität als für Raumwärme existieren würden. Exergetische Analysen berücksichtigen beide Aspekte und sind deswegen ein wichtiges Element der Analysen in der Politikanalyse. Die exergetischen Analysen in diesem Papier zeigen das große Potential die Effizienz in Heizsektor zu steigern und im Speziellen die Nutzbarmachung von riesigen Potentialen von niederexergetischen Energiequellen für die Bereitstellung der niederexergetischen Energiedienstleistung für komfortablen Wohnraum(Raumwärme).

Trotzdem zeigt die Gegenüberstellung zwischen den Szenarien auch dass diese Entwicklung nur mit den entsprechenden Rahmenbedingungen stattfinden kann: Das Szenario „Frozen Technology“ zeigt eine Steigerung der exergetischen Effizienz von nur 4% bis 2050. Eine der Bedingungen welche benötigt werden ist ein entsprechendes Energiepreisniveau. Ein solches Energiepreisniveau könnte entweder aufgrund von Marktmechanismen und Ressourcenknappheiten oder aufgrund von Besteuerung von hochexergetischen Energieformen eintreten. Im Moment ist eine Besteuerung indirekt und teilweise bereits Teil der österreichischen Energiebesteuerung (z.B. höhere Besteuerung von Elektrizität und Heizöl als von Fernwärme). Trotzdem gibt es aktuell kein Anzeichen dass eine solche „Energiebesteuerung“ auf der politischen Agenda auftauchen könnte. Eine andere

Voraussetzung ist eine unterstützende Politik für thermische Sanierung und niederexergetische Heizsysteme, vor allem für erneuerbare niederexergetische Heizsysteme.

Die Szenarien zeigen dass eine Transition von niederexergetischen Systemen möglich ist. Und sie zeigen auch dass Diffusionseinschränkungen mit einbezogen werden müssen. Zeitkonstanten in den Gebäudebeständen und den bestehenden Heizsystemen sind relativ hoch und es braucht einen verhältnismäßig hohen Aufwand um eine schnellere Wandlungsrate in den Heizungssysteme zu erreichen, etc.

Die oben erwähnte Transition zu den niederexergetischen Systemen und die klare Reduktion des Exergiekonsums im Raumwärme- und Warmwassersektor ist möglich trotz einer wachsenden Anzahl von Gebäuden und der entsprechenden Heizfläche (Abbildung 16). Die letztere kann als die entsprechende Energie-(oder Exergie-) dienstleistung verstanden werden. Warr und Ayres, siehe z.B. (Ayres, 2004), (Warr et al., 2010), (Warr und Ayres, 2010) diskutieren den Einfluss von Exergiedienstleistungen auf ökonomisches Wachstum mit dem Ergebnis dass Energieeffizienzverbesserungen eine „Quelle von Wachstum“ (Warr et al., 2010) seien da sie die Kosten von Produkten und Dienstleistungen senken. Dies könnte ein Hinweis auf die Vermutung sein, dass die Reduktion des finalen exergetischen Konsums mit simultanen wachsendem Niveau von exergetischen Dienstleistungen zu einem entsprechenden makroökonomischen Rebound-Effekt führen könnte (durch das induzierte ökonomische Wachstum hervorgerufen). Trotzdem ist dies nicht in diesem Papier enthalten, auch wenn wir denken dass es interessant sein könnte diesen Aspekt mehr ins Detail zu untersuchen.

Mehrere andere Aspekte konnten nicht im Detail in diesem Papier diskutiert werden. Die folgenden Fragen bleiben für eine weiterführende Forschung offen:

- Was ist das zukünftige Potential von Fernwärme und KWK im Lichte niedrigerer Wärmemengen für Gebäude? Wie würde dies die exergetische Effizienz und den exergetischen Konsum in diesem Sektor beeinflussen?
- Was ist der Einfluss von verschiedenen Szenarien der thermischen Gebäudesanierung auf den exergetischen Konsum und die exergetische Effizienz?
- Was ist der Einfluss einer erhöhten Menge von Abwärme aus industriellen Prozessen für die Fernwärme?

Die Analyse von Energiesystemen unter dem Lichte des exergetischen Konsums und der exergetischen Effizienz führt zu einer anderen Art und Weise von Einblick in diese Systeme und hilft mögliche Einsparpotentiale für Exergie und Energie – und letztendlich Treibhausgase – zu identifizieren. Vor allem der Raumwärmesektor bietet aufgrund seiner niederexergetischen Wärmeenergiecharakteristik ein großes Feld für entsprechende Aktivitäten und Maßnahmen

5 Der Tradeoff von Kapital und Energieeinsatz

5.1 Einleitung

Heizsysteme zeigen verschiedene Spezifikationen und Einflüsse, z.B. in Bezug auf ökonomische Charakteristiken. Dies bezieht sich im Besonderen auf den Anteil der variablen Kostenkomponenten, d.h. die Kostenstruktur bezüglich Kapitalkosten, Betriebskosten und Energiekosten. Die Energiekosten jedes Energieträgers können sich deutlich unterscheiden, genau wie die Qualität des Energieträgers und der Energiedienstleistung. Einer der Schlüsselindikatoren für die Messung der Qualität eines Energieträgers ist sein Exergiegehalt. Im Prinzip könnte man annehmen dass wenn jemand Energie kauft sich dafür interessiert wie groß die Portion der Energie ist, welche die Arbeit für sie leisten soll (also die Exergie), als für die nicht nutzbaren Formen der Energie. Deswegen lautet eine unserer Hypothesen, dass in einem theoretischen Konzept eines gut funktionierenden Energiemarkts mit ausreichender Auswahl und ohne Marktverzerrungen und Transaktionskosten, etc. der Preis eines Energieträgers eher seinen Exergiegehalt spiegelt als seinen Energiegehalt. Es kann also erwartet werden dass niederexergetische Energieträger (z.B. niederenthalpische Wärme) ein niedrigeres Preisniveau aufweisen als hochexergetische Energieträger (z.B. Elektrizität oder Erdgas). Für eine gegebene Endnutzung wie Heizen allerdings sollten die Gesamtkosten von Energieträger und Kapitalinvestitionen für die Bereitstellung der Energiedienstleistung für alle Systeme ungefähr gleich sein, wenigstens in dem Fall dass die Systeme ein vergleichbares Komfortniveau bereitstellen und Marktverzerrungen unbedeutend sind. Auf diesen Voraussetzungen aufbauend könnte man die folgenden Hypothesen aufstellen:

- Die Preise von etablierten Energieträgern im Markt spiegeln den Exergiegehalt wider
- Die Gesamtwärmeerzeugungskosten für weitverbreitete Systeme sind auf einem gleichen Niveau innerhalb eines Landes oder einer Region unabhängig vom Energieträger und
- Es gibt einen Trade off zwischen Kapitalinput (z.B. hohe Investments für Technologien) und Exergiegehalt für angewandte Energieträger. In anderen Worten, je niedriger der Exergiegehalt, desto höher sind die Kapitalanforderungen, was am Ende zumindest einen Teil der niedrigeren Energiekosten für die niederexergetischen Energieträger wieder ausgleicht.

Das Ziel dieses Abschnittes ist es herauszufinden in welchem Ausmaß es möglich ist diese Hypothesen zu belegen. In diesem Papier fokussieren wir uns im Besonderen auf die letztgenannte Hypothese. Demzufolge zielt dieses Papier auf die Untersuchung einer Sammlung von Bedingungen:

- in welchem Ausmaß die Preise für verschiedene Energieträger in Wirklichkeit ihren Exergiegehalt widerspiegeln und

- in welchem Ausmaß es einen Trade off zwischen Kapitalinput und dem Exergiegehalt von angewandten Energieträgern für verschiedene Heizsysteme gibt.

Unsere Analyse nutzt Daten aus ausgewählten europäischen Ländern: Österreich, Finnland, Niederlande und Schweden. Diese Länder zeigen auf der einen Seite große Gemeinsamkeiten bezüglich der physischen Qualität der Gebäude, des Energiekonsums/Kopf, des BIP/Kopf und den Mehrwertsteuersätzen. Auf der anderen Seite gibt es Unterschiede im Klima, den Traditionen bei Heizsystemen und beim Gebäudebestand. Angesichts der vorher genannten Ziele können diese Daten eine robuste Basis für eine erste komparative Analyse darstellen.

5.1.1 Methodische Vorgehensweise und Beschränkungen

Unsere methodische Vorgehensweise besteht aus den folgenden Schritten welche für jedes der in diesem Papier abgedeckten Länder (AT, FI, NL, SE) durchgeführt werden:

- Einen charakteristischen Gebäudetyp mit verschiedenen Heizsystemen mit unterschiedlichen Energieträgern definieren um diese in der Analyse zu vergleichen;
- Verschiedene Kostenkomponenten von Heizsystemen untersuchen. Diese sind auf der einen Seite Kosten für Investment, Betriebs und Wartung für verschiedene Heizsysteme und deren Komponenten. Variable Energiekosten auf der anderen Seite werden durch den Energiepreis repräsentiert, welchen die Konsumenten für einen bestimmten Brennstoff oder Energieträger aufbringen. Wir unterscheiden im Besonderen zwischen Nettoenergiepreisen und Energiesteuern;
- Den Exergiefaktor für jeden berücksichtigten Energieträger definieren;
- Den Exergiefaktor mit dem Energiepreis (mit und ohne Steuern) für jeden Energieträger vergleichen;
- Den spezifischen Exergiegehalt (Exergiefaktor) mit den gesamten monetären Kosten der Wärmeerzeugung für verschiedene Heizsysteme vergleichen. Die gesamten monetären Kosten der Wärmeerzeugung in diesem Papier sind definiert als die Summe der monetären Ausgaben welcher ein ansässiger Konsument für den Bezug einer ausreichenden Summe und Qualität von thermaler Energie für die Wohnstätte bezahlt. Dies inkludiert Energiepreise (ohne Steuern), Energiesteuern und die gesamten Fixkosten (Investitionskosten, Betriebs- und Wartungskosten).
- Letztendlich kalkulieren wir den Anteil der variablen Energiekosten von den gesamten Wärmeerzeugungskosten für verschiedene Heizsysteme und setzen diesen Indikator in Relation zum Exergiegehalt von angewandten Energieträgern. Dieser Indikator (Anteil der variablen Energiekosten von den gesamten Wärmeerzeugungskosten) zeigt die Kostenstrukturen des Heizsystems: Je höher dieser Anteilswert ist, desto niedriger sind die Investitionskosten (Kapitalanforderungen) verglichen mit den Energiekosten. Ein niedriger Wert dieses Indikators bedeutet dann also dass eine teure Technologie angewendet wird welche sich günstiger Energieträger bedient.

Wenn man diesen Indikator mit dem angewandten Exergiegehalt vergleicht führt das zu Einsichten in welchem Ausmaß es zu einem Tradeoff bei hohen Investitionsanforderungen für die Nutzbarmachung der niederexergetischen Energieträger kommt.

Diese Vorgehensweise führt uns wie wir glauben zu neuen und interessanten Einblicken in das Ausmaß in welchen die aktuellen Marktpreise den Exergiegehalt von Energieträgern mit einbeziehen. Dabei betrachten wir einige kritische Aspekte dieser Vorgehensweise, wie unten beschrieben:

- Der Vergleich der Analyse ist nicht unkompliziert wenn man die Differenzen im Klima, Gebäudebestand, angenommenen Technologien und ökonomischen Bedingungen betrachtet.
- Steuern auf Energieträger sind in jedem Land anders und haben einen erheblichen Einfluss auf den Ausgang unserer Analyse. Deswegen wird innerhalb der Fälle zwischen Preisen mit und ohne Energiesteuern unterschieden.
- Energiepreise zeigten innerhalb der letzten Jahre eine bemerkenswerte Volatilität. Während die Preisvolatilität nicht dieselbe für alle Energieträger war, beeinflusst das Energiepreisniveau das Verhältnis des Kapitals zu den Energiekosten stark. Wir nutzen Energiepreisniveaus des Jahres 2005 in allen untersuchten Fallstudien um nicht die starken Preisvolatilitäten der Jahre 2007 und 2009 zu reflektieren. Doch wir sind uns bewusst dass das Referenzjahr für Energiepreise von entscheidendem Einfluss als Parameter ist.
- Es wäre interessant Sensibilitätsanalysen in Bezug auf verschiedene Preisniveaus hinzuzufügen und das Konzept für verschiedene Preise nach zukünftigen Energiepreisszenarien anzuwenden.
- Neben den Energiesteuern haben andere energiepolitische Instrumente einen Einfluss auf die ökonomische Leistung und Charakteristiken von Heizsystemen. Dies inkludiert Investitionsförderungen aber auch Regulierungen, vor allem mit Bezug auf Fernwärme etc. Wir fokussieren uns in diesem Projekt nicht auf diese Aspekte und überlassen diese nachfolgenden Forschungsarbeiten.

5.1.2 Definition der monetären Wärmeerzeugungskosten

Die folgenden Finanzströme werden unterschieden (siehe Formeln 9-12):

-
- Variabler Preis für Energieträger c_{en} exklusive Steuern
- Energiebezogene Steuern $c_{en,tax}$ basierend auf dem Energiesteuersatz ($f_{tax,en}$) dieses spezifischen Energieträgers
- Gesamte Fixkosten, bestehen aus
 - Levelized investment costs des Heizsystems I_{hs} (€), welche den Kaitalerholungsfaktor α nutzen. Für die Berechnung der levelized investment costs nutzen wir den Zinssatz (i) von 5% und eine Abschreibungszeit von (T) von 15 Jahren;

- Jährliche Betriebs- und Wartungskosten $c_{O\&M}$ (€/a), inklusive der festen jährlich bezahlten Raten $c_{en,fix}$ an das Energieversorgungsunternehmen unabhängig des aktuellen Energiekonsums.

$$c_{tot} = c_{en} + c_{en,tax} + \frac{C_{fix}}{e_{en,f}} \left[\frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right] \quad \text{Formel 9}$$

$$c_{en,tax} = c_{en} \cdot f_{tax,en} \left[\frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right] \quad \text{Formel 10}$$

$$C_{fix} = c_{O\&M} + c_{en,fix} + \alpha I_{hs} \left[\frac{\text{€}}{\text{yr}} \right] \quad \text{Formel 11}$$

$$\alpha = \frac{(1+i)^T - 1}{(1+i)^T \cdot i} \left[\text{yr}^{-1} \right] \quad \text{Formel 12}$$

Formel 10, Formel 11, Formel 12, Formel 13

Alle finanziellen Parameter werden ohne die Mehrwertsteuer berechnet. Da die Mehrwertsteuer immer "oben aufgesetzt" wird, beeinflusst sie nur das Gesamtkostenniveau eines Landes, hat aber keinen Einfluss auf Preisvergleiche innerhalb eines Landes. Die relevanten Mehrwertsteuersätze in den analysierten Ländern (Österreich, Finnland, Niederlande und Schweden) sind 20%±1% (2010).

Subventionen und andere Fördersysteme haben auch einen Einfluss auf die Wettbewerbsfähigkeit und die gesamten Wärmeerzeugungskosten von verschiedenen Heizsystemen. In unserer Analyse könnten diese einen analogen Effekt auf Energiesteuern haben. Um den Fokus auf den Kernfragen zu belassen wurde der Einfluss von Subventionen in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt. Mehrere nationale Institutionen haben Finanzdaten bezüglich Energiepreisen und ökonomischen Variablen bereitgestellt. Diese sind z.B. (Müller et al., 2009), (RES, 2009), (Regionalenergie Steiermark, 2010). (Finnish Energy Industries, 2006), (Statistics Finland, 2007), (Statistics Finland, 2009), (Motiva, 2007), (CBS, 2009) (Energiekamer, 2005). (Statistiska centralbyrån, 2007a), (Statistiska centralbyrån, 2007b).

Ein Teil dieser Daten kann im Anhang nachgesehen werden.

5.2 Ergebnisse

Dieser Absatz fasst die Ergebnisse unserer Analyse zum Thema Tradeoff von Kapital und Energieeinsatz zusammen.

Abbildung 17 und

Abbildung 18 zeigen die Brennstoffkosten (jeweils exklusive und inklusive Energiesteuern) für die untersuchten Heizsysteme in jedem der Länder in Relation zum Exergiefaktor von jedem Energieinput der Systeme.

Die Graphen zeigen an dass Heizungssysteme, welche Formen von hoher Exergie (Elektrizität, Öl, Gas) nutzen, generell höhere Energiekosten aufweisen aufgrund von höheren Energiepreisen und teilweise höherer Energiesteuern. Trotzdem gibt es auch Ausnahmen welche näher diskutiert werden sollten: (1) Die variablen Energiekosten der Haushalte für Fernwärme in den Niederlanden oder Schweden sind relativ hoch verglichen mit dem niedrigen Exergiegehalt von Fernwärme. Es gibt im Wesentlichen zwei Gründe hierfür: Auf der einen Seite ist der Anteil der variablen Energiekosten von Fernwärme immer auch eine Frage der Tarifstruktur. Diese Struktur ist normalerweise stark von der (lokalen) Energiepolitik beeinflusst. Zudem ist das allgemeine Preisniveau von Fernwärme in vielen Ländern Thema bei energiepolitischen Entscheidungen. Zum Beispiel gibt es in den Niederlanden Regulierungen betreffend der Fernwärmepreise welche sich auf die Wärmeerzeugungspreise der konkurrierenden Heizsysteme beziehen (Erdgas). (2) Biomasse zeigt im Allgemeinen relativ niedrige Brennstoffkosten im Vergleich zum Exergiegehalt. Hier müssen wir berücksichtigen dass feste Brennstoffe andere Charakteristiken aufweisen als flüssige, gasförmige oder elektrische Energieträger. Folglich gibt es zusätzliche Spezifikationen und Qualitätsindikatoren von Energieträgern neben ihrem Exergiegehalt.

Wenn man diese spezifischen Aspekte der Fernwärme und der Biomasse berücksichtigt, können wir schlussfolgern dass Heizsysteme welche hochexergetische Energieformen nutzen generell höhere Energiekosten aufweisen, vor allem wenn Energiesteuern mit inbegriffen sind.

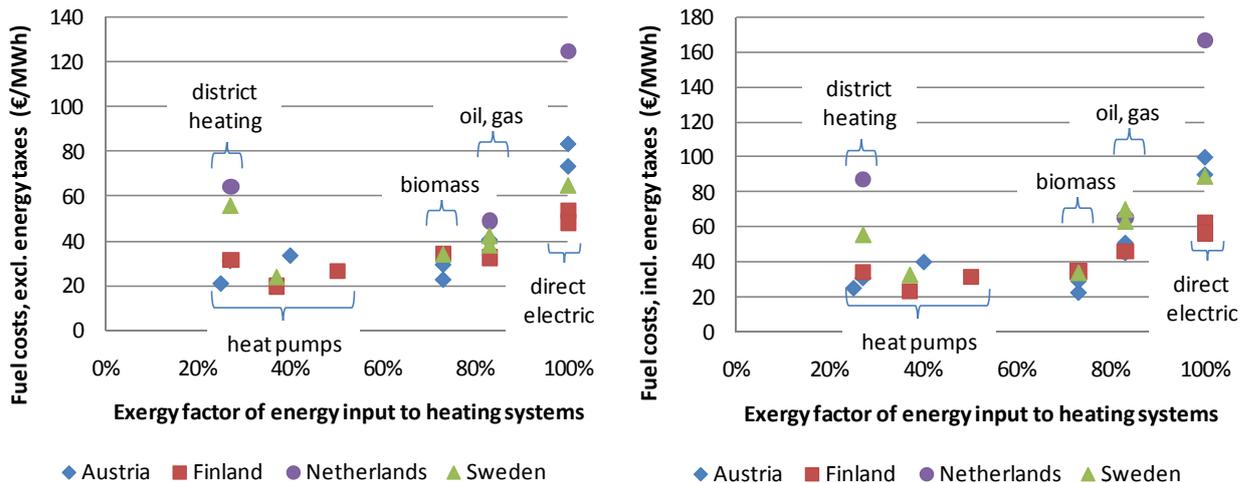


Abbildung 17: Brennstoffkosten (ohne Energiesteuern) und Exergiefaktoren für verschiedene Heizsysteme
 Abbildung 18: Brennstoffkosten (mit Energiesteuern) und Exergiefaktoren für verschiedene Heizsysteme

Im Folgenden berechnen wir den Anteil der variablen Energiekosten auf die gesamten Wärmeerzeugungskosten für jede Technologie und für jedes Land (alle inklusive Energiesteuern) sowie für jedes Heizsystem in jedem der Länder. Ein niedriger Anteil an variablen Energiekosten weist darauf hin dass ein relativ hoher Anteil der gesamten Wärmeerzeugungskosten aufgrund der Investitionskosten zustande kommt. Ein hoher Anteil zeigt dass nur ein kleiner Umfang von Investitionen nötig ist um nützliche Wärme in diesem Wärmesystem bereitzustellen. Abbildung 19 fasst die Resultate dieser Analyse zusammen: Es zeigt einen eher starken Zusammenhang zwischen dem Anteil der variablen Energiekosten (hauptsächlich von Energiepreisen, Besteuerung von Energieträgern und der Effizienz des Energiesystems beeinflusst) auf die gesamten Wärmeerzeugungskosten und dem Exergiefaktor der genutzten Energieträger für viele Datenpunkte. Dies zeigt dass je niedriger der Exergiefaktor ist desto höher sind die Investitions- und Kapitalanforderungen für die Nutzbarmachung dieser niederexergetischen Energiequelle. Große Ausreißer können erklärt werden wenn man die gezogenen Systemgrenzen(Fernwärme) oder die Besonderheiten dieser Heizsysteme (z.B. Biomasseheizsysteme) berücksichtigt. Da die Preisstruktur der Endnutzer angesetzt wurde, ist zumindest ein Teil der Upfront-Investitionen berücksichtigt. Dies ist vor allem offensichtlich für die Tarifstrukturen der Fernwärme in Schweden und den Niederlanden. Die Biomassetechnologien die in dieser Studie berücksichtigt wurden nutzen, anders als die anderen Technologien, rohe Energieträger, was wiederum bedeutet dass all die nötigen Aufbereitungsprozesse und vergleichbare Prozesse die im Voraus nötig sind innerhalb der Systemgrenzen durchgeführt werden müssen.

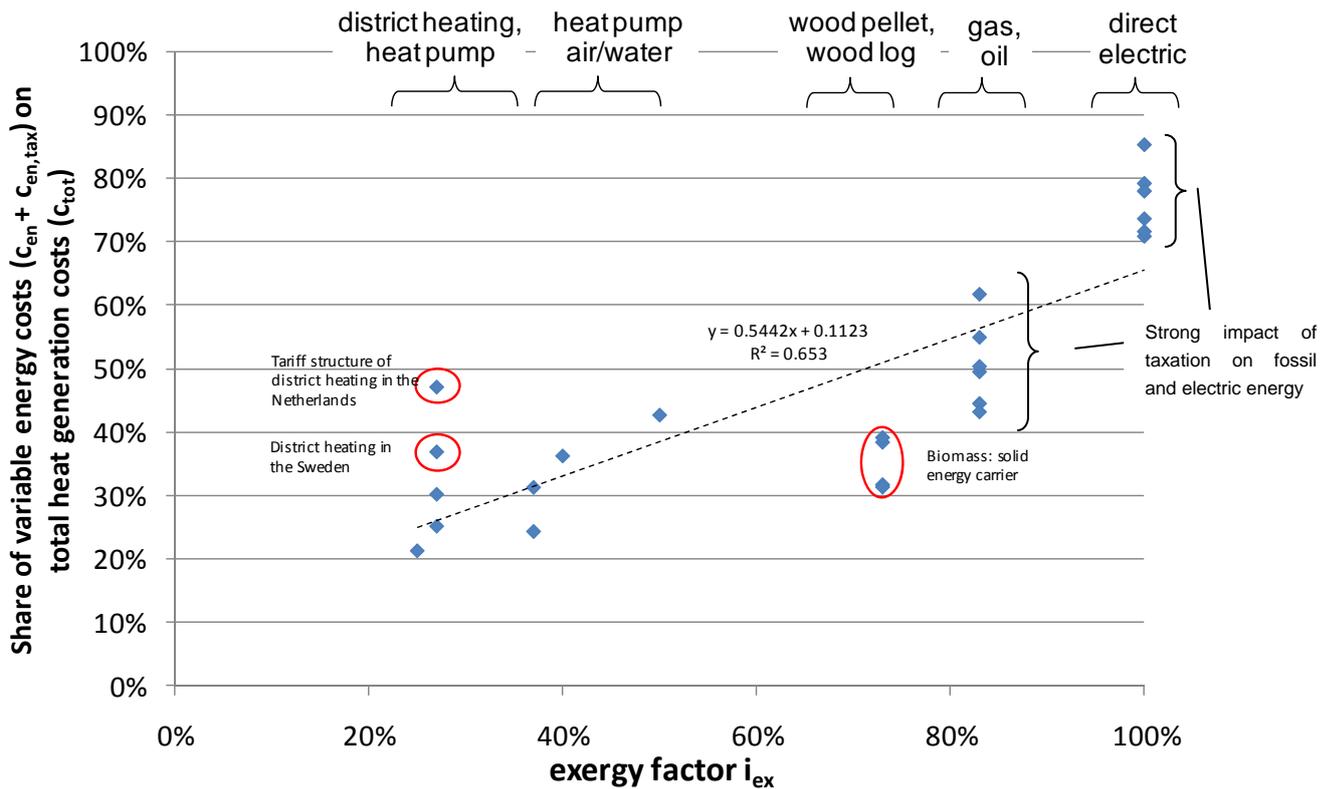


Abbildung 19: Anteil der variablen Energiekosten auf die gesamte Wärmeenergieerzeugung für alle Technologien und Fallstudien

5.3 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse dieser Analyse zeigten, dass, auch wenn der Exergiegehalt der Energieträger zu einem gewissen Teil in den variablen Kosten zu finden ist, dies nicht unbedingt für die gesamten Wärmeerzeugungskosten der Fall sein muss. Der Grund ist dass zusätzliche Ausgaben für das Kapital notwendig werden um diese niederexergetischen Ressourcen zu nutzen. Die Kapitalkosten gleichen also die niedrigeren variablen Kosten der niederexergetischen Energieträger wieder aus.

Dies kann auch als Möglichkeit der Substitution von Exergie durch Kapital formuliert werden und demzufolge den Konsum der hochexergetischen Ressourcen durch zusätzlichen Kapitaleinsatz reduzieren. Dies unterstützt, für die Fälle die hier untersucht werden, die Behauptung dass Exergie und Kapital zu einem gewissen Grad durch sich selbst ersetzt werden können. Wie in der Literatur nachzulesen ist, haben Exergieexperten Normen vorgeschlagen (z.B. exergoökonomischer Faktor, exergetischer Kostenfaktor) um die Beziehung zwischen monetären und exergetischen Kosten zu definieren und zu quantifizieren (obgleich dies in der Literatur vor allem für KWK und großindustrielle Anlagen getan wurde).

In unserer Analyse stellte sich heraus, dass die Nutzung von niederexergetischen Energieträgern normalerweise die Anschaffung von teureren Anlagen erfordert, was die höheren Kapitalkosten erklärt, aber auch Gelegenheiten für technische Verbesserungen beinhaltet. Im Falle von Österreich: Wenn Technologiefortschritte zu einer Verringerung der Kapitalkosten von 20% für eine niederexergetische Heizalternative führen würden, z.B. für Wärmepumpen, könnte dies zu einem potentiellen Rückgang in den Gesamtkosten von ungefähr 20€/MWh führen. Für eine hochexergetische Heizalternative, z.B. direktes elektrisches Heizen in Österreich, ist der Anteil der Kapitalkosten viel niedriger. Sogar wenn Technologiefortschritte zu niedrigeren Kapitalkosten von 20% führen würden, dann würde dies nur zu einem Rückgang der Gesamtkosten von 5 €/MWh führen. Deswegen erscheinen die Aussichten auf Technologiefortschritte generell bei niederexergetischen Alternativen vielversprechender als wenn man den schieren Umfang des physischen Kapitals alleine bedenkt. Verschiedene Fragen bleiben für weitere Forschungen offen. Diese beziehen sich im Besonderen auf die folgenden Themen:

- Ausweitung der Quellen von Energieträgern und – systemen (z.B. solarthermische Systeme)
- Ausweitung der Systemgrenze (z.B. Inkludierung der Kapitalkosten für Gas- oder Fernwärmenetze)
- Ausweitung des Exergiekonzeptes für die für ein Investment benötigte Energie (z.B. Boiler, Fernwärmenetz, etc.)

6 Best practice Beispiele

Das Ziel dieses Abschnittes ist es, aufbauend auf den Richtlinien, die im Zuge der Annex 49 Arbeitsgruppe für Niedrigexergie-Systeme [Schmidt 2009] und der Annex 37 Arbeitsgruppe für Niedrigexergie-Systeme in Gebäuden [Ala-Juusela 2003] beschrieben wurden, in Österreich eingesetzte Systeme zu identifizieren und deren Eignung als Best-Practice-Beispiele zu evaluieren. Ausgewählte Best-Practice Beispiele werden detaillierter beschrieben.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde gezielt nach dem Vorhandensein von innovativen LowEx Komponenten in Österreich gesucht, die als Best-Practice-Beispiele angesehen werden können. Konkret besteht die Methodik, die in diesem Arbeitspapier angewendet wurde, aus den folgenden Schritten:

- Identifikation von „low-ex“-Komponenten.
In diesem Schritt wird dargestellt, welche Komponenten in Energiesystemen als „low-ex“ Komponenten gelten, also Technologien oder (Teil-) Systeme, die niederexergetische Energiequellen nützen, oder zu nützen in der Lage sind. Dabei wurden im Wesentlichen Ergebnisse aus der Literatur, in erster Linie auf Basis der Arbeiten in IEA ECBCS Annex 37 und Annex 49 zurückgegriffen. Es wird dabei in diesem Schritt kein Anspruch auf Vollständigkeit gelegt.
- Darstellung der methodischen Ansätze zur Bewertung der exergetischen Effizienz dieser Komponenten
- Sichtung aktueller Forschungs-, Pilot- und Demonstrationsprojekte
In diesem Schritt werden aktuelle Projekte, insbesondere aus der Programmlinie „Nachhaltig Wirtschaften“ gesichtet und auf das Vorhandensein von Low-ex-Komponenten bewertet. Auf Basis dieser Analyse werden, so weit möglich, Best-Practice-Beispiele identifiziert.
- Darstellung ausgewählter Best-Practice-Beispiele

Die Sichtung von in Frage kommenden Best-Practice-Beispielen umfasst die Endberichte der letzten fünf Jahre (ab 2006) aus den Programmlinien „Haus der Zukunft“, „Fabrik der Zukunft“, „Energiesysteme der Zukunft“, „Energie der Zukunft“, die Teil des Nachhaltig Wirtschaften Programms sind.

Über das Impulsprogramms Nachhaltig Wirtschaften, welches 1999 als mehrjähriges Forschungs- und Technologieprogramm vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie gestartet wurde, wurden eine Vielzahl innovativer Projekte gefördert. Im „Haus der Zukunft“ Programm sind zahlreiche Studien über Passivhäuser erfasst. Gebäude, die dem Passivhausstandard genügen, verfügen zumeist über Luftwärmetauscher und sind durch ihre Gebäudearchitektur auf eine optimale Ausnutzung der solaren Strahlung

ausgelegt. Da in diesem Arbeitspapier auf besonders innovative Nutzung von LowEx-Systemen Wert gelegt werden soll, wurden Gebäude bzw. Projekte, die keine zusätzlichen LowEx-Komponenten aufweisen konnten, nicht weiter berücksichtigt.

Als Best-Practice-Beispiele werden insbesondere Projekte gesehen, die eine innovative Verknüpfung mehrerer LowEx Komponenten aufweisen.

6.1 Beschreibung ausgewählter LowEx Komponenten

6.1.1 Identifikation von Low-Ex-Komponenten

Der wesentliche Punkt dieses Papers ist die Identifikation von Komponenten, die bereits im Rahmen der Annex 49 und Annex 37 Arbeitsgruppe eingehend beschrieben und als LowEx-Systeme hervorgehoben wurden, in aktuellen österreichischen Forschungs- und Demonstrationsprojekten. Der erste Schritt bestand daher in der Definition und Identifikation derartiger Komponenten.

Tabelle 7 zeigt eine Auflistung der definierten Komponenten, wie sie in Annex 37 erarbeitet wurden [Ala-Juusela 2003]. Diese Tabelle enthält eine umfassende Liste von zum Teil recht disaggregierten Sub-Systemen und Technologien. Für den Zweck in diesem Arbeitspapier ist es nötig, diese stärker zusammenzufassen. Diese Zusammenfassung richtet sich also danach, die so identifizierten Komponenten praktikabel zur Sichtung der Forschungsprojekte verwenden zu können.

Tabelle 7: Auswahl von Low-Ex-Komponenten nach IEA ECBCS Annex 37 [Ala-Juusela 2003]

What	Suitable for	State of the art	Costs	Cooling temp. [°C]	Heating temp. [°C]
Surface heating and cooling					
Floor heating					
Embedded coils in slabs	Non-Residential	Commerical		10-15	25-30
Coils in surface layers	Residential and non-res.	Commerical		16-20	28-35
Hollow core slabs	Non-Residential	Commerical	+ -	15-18	25-30
Suspended floors	Residential and non-res.	Commerical	+ -	16-20	30-40
Phase Change in floor heating	Non-Residential	Experimental	++	-	25-50
Wall heating and cooling					
Pipes in surface layers (wet/half wet,mounted)	Residential and non-res.	Commerical		10-15	25-50
Pipes in surface layers (half-dry embedded)	Residential and non-res.	Commerical		10-15	25-50
Pipes in surface layers (wet, embedded)	Residential and non-res.	Commerical		10-15	25-50
Pipes in surface layers (dry systems)	Residential and non-res.	Commerical		10-15	25-50
Double walls	Residential and non-res.	Experimental	++	15-18	25-35
Dynamic Insulation	Residential	Experimental	+ -		25-30
Capillary tubes	Residential and non-res.	Commerical	+ -	10-15	25-30
Ceiling cooling and heating					
Radiative panel	Non-Residential	Commerical	+ -	10-15	25-50
Cooling beams	Non-Residential	Commerical	+ -	10-15	25-50
Ceiling integrated system	Residential and non-res.	Commerical		10-15	25-50
Evaporative roof surfaces	Non-Residential	Commerical		15-20	-
Ceiling panel cooling by double-roofing with	Residential	Experimental			
Local heaters					
Low temperature radiators/convectors	Residential and non-res.	Commerical	+ -	-	30-50
Radiators integrated in the interior design			+ -		
High Temperature Radiators	Residential and non-res.	Commerical		10-20	20-40
Base board heaters	Residential and non-res.	Commerical		-	80-130
Transparent insulation	Residential and non-res.	Commerical	++	-	40-95
Air heating and cooling					
Air to air heat exchanger					
Sensible Only Heat Exchangers /	Residential and non-res.	Commerical	+ -		40-95
Counter flow air to air heat exchanger/	Residential and non-res.	Commerical	+ -	10-15	20-50
Total (Latent) Heat Exchangers / Regenerator	Non-Residential	Commerical	++		25-50
Altering Heat Exchangers	Residential	Commerical	+ -		40-95
Water to air heat exchanger					
Supply air conditioning	Non-Residential	Commerical	++	-	40-90
Fan coil units				10-15	25-30
Steam / vapour to air heat exchanger					
Supply air conditioning	Non-Residential	Commerical	++		100-120
Other heat exchanger					
Supply air façade	Non-Residential	Commerical	+ -	-	20-100
Evaporative cooling					-
Passive system					
Atria	Non-Residential	Commerical	+ -		
Solar chimneys	Non-Residential	Innovative	++		
Generation / conversion of cold and heat					
Boilers					
Condensing boilers	Residential and non-res.	Commerical	+ -	-	
Pulsating gas boiler	Residential	Commerical	+ -	-	50-80
Ground heat					
Ground coils	Residential and non-res.	Commerical		8-18	-
Bore hole	Residential and non-res.	Commerical	+ -	8-18	18-22
Slab on ground	Non-Residential	Commerical	+ -	14-22	16-22
Heat pumps					
Compressor heat pumps	Residential and non-res.	Commerical	+ -	10-15	25-50
Absorption heat pumps	Non-Residential	Commerical	+ -	10-15	-
Solar collectors					
Flat plate collectors	Residential and non-res.	Commerical	+ -	-	20-80
Evacuated tube collector	Residential and non-res.	Commerical	++	-	20-120
Unglazed flat-plate collector	Residential	Commerical		-	20-80
Combined heat and power generation					
Cogeneration units with gas motor	Residential and non-res.	Commerical	+ -	-	80-90
Cogeneration units with microturbines	Non-Residential	Experimental	++	-	
Cogeneration units with stirling motor	Non-Residential	Experimental	++	-	
Fuel cells					
Fuel cells	Non-Residential	Experimental		-	
Biological systems / Metabolic					
Bacteria	Non-Residential	Innovative	+ -	-	20-60
Animals	Residential and non-res.	Innovative	++	-	20-35
Plants	Residential and non-res.	Experimental	++	20-25	-

Die Zusammenfassung der Komponenten mit niedrigem Exergie-Bedarf, die als zukunftsweisende Best-Practice Systeme genannt werden können, ergibt die folgenden Cluster:

- **Kontrollierte Wohnraumlüftung**
Der meiste Energieverbrauch fällt bei Gebäuden für die Regulierung des Raumklimas an. Der Exergiegehalt von Raumluft ist allerdings gering (Bei einem Temperaturunterschied zwischen Innenraumtemperatur und Außenluft liegt er bei 7%). Niedrig-Exergetische Raumwärmebereitstellung wird durch Wärmerückgewinnung mittels Wärmetauscher zwischen Zu- und Abluft realisiert.
- **Feuchterückgewinnung**
Die in der Luftfeuchtigkeit der Raumluft enthaltene Wärmemenge kann durch Luftfeuchtetauscher zurückgewonnen werden und so einen Beitrag zu Niedrig-exergetischer Raumklimatisierung stellen. Feuchterückgewinnung stellt somit eine Erweiterung der kontrollierten Wohnraumlüftung dar. Eingesetzt werden in der Regel Membranen oder Sorptionsmittel.
- **Heizen und Kühlen mit Grundwasser und Erdwärme**
Die Temperatur in oberflächennahen Bodenschichten liegt im Sommer unter und im Winter über den Außentemperaturen. Diese Temperaturunterschiede können zur Wohnraumbeheizung bzw. -kühlung genutzt werden. Die Verwendung von Grundwasser bietet prinzipiell den Vorteil, dass aufgrund der höheren Wärmeübertragungskapazität von Wasser bessere Jahresarbeitszahlen (und somit bessere Exergieeffizienz) der Wärmepumpe erzielt werden können, ist aber abhängig von der Verfügbarkeit bzw. vom Grundwasserstand.
- **Solare Kühlung**
Von solarer Kühlung spricht man allgemein, wenn Sonnenenergie zum Antrieb eines Kühlprozesses eingesetzt wird. Wird ein Sonnenkollektor nur für Brauchwasserbereitung und Heizung eingesetzt, so kann es im Sommer zu nicht nutzbaren Überschüssen kommen. Der Einsatz von solarer Kühlung hat den Vorteil, dass hohe Solarstrahlung und Kühllast gleichzeitig auftreten. Die exergetische Beschreibung von Systemen zur Raumkühlung hat in der Annex 49 Arbeitsgruppe große Aufmerksamkeit erhalten. Eingesetzt werden bisher vor allem Absorptionskältemaschinen und solarunterstützte Kühlung mit Sorptionsmitteln.
- **LowEx-Gebäudearchitektur**
Die Gebäudearchitektur, wie sie bei Passivhäusern des Öfteren zum Einsatz kommt, ist auf eine optimale Anpassung an den Verlauf des Sonnenstandes angepasst. Dadurch kann zusätzlich niedrigexergetische solare Wärmestrahlung bei niedrigem

Sonnenstand bzw. im Winter eingebracht werden und der Einfall der solaren Strahlung bei hohem Sonnenstand bzw. im Sommer minimiert werden. Es wird darauf abgezielt, die Wärmeübertragung (der solaren Strahlung) im Sommer zu verringern und im Winter zu erhöhen.

- Bauteilaktivierung

Voraussetzung für eine niedrigexergetische Bereitstellung von Raumwärme ist bei der zumeist geringen Temperaturdifferenz eine hinreichend große Fläche zur Wärmeübertragung. Typische Bauteile bestehen aus Betonelementen eingebetteten Kunststoffrohren, die in Wänden und Böden (Fußbodenheizung) verbaut werden. Sie können zur Beheizung ab einer Mindesttemperatur von 23°C bzw. zur Kühlung ab 19°C eingesetzt werden.

6.1.2 Beurteilungsmethodik und Abschätzung des Exergiebedarfs ausgewählter Komponenten

Energieträger

Exergieeffizienz ist eine gute Basis um Raumheizung- und Raumkühlung zu vergleichen, da sie in Systemen mit demselben Exergieoutput helfen kann jene mit dem geringsten Verlust an Exergie zu identifizieren.

Die exergetische Analyse folgt prinzipiell den Überlegungen in im Annex 49 Zwischenbericht [Schmidt 2009] dargelegt wurden sowie Arbeiten die im Rahmen der Arbeitsgruppe erstellt wurden [Torio et al. 2009; vgl. Kranzl et al. 2010]

Prinzipiell gilt, dass in einem reversiblen Prozess nur der mit dem Carnot-Faktor $1 - (T_u/T)$ multiplizierte Anteil der zugeführten Wärme (dQ) in Arbeit umwandelbar ist. Der Anteil der Anergie kann nicht als Arbeit gewonnen werden. Aus der obigen Gleichung ist auch zu erkennen, dass Wärme (T) die bei Umgebungstemperatur (T_u) zur Verfügung steht nicht in Exergie umgewandelt werden kann. Für die Exergie gilt im Gegensatz zur Energie kein Erhaltungssatz. [Dubbel 2007]

Die thermische Exergie, die bei der Verbrennung eines Energieträgers frei wird, kann über das nutzbare Temperaturverhältnis bestimmt werden.

Zur Beschreibung der in Ofenräumen ablaufenden Verbrennungsprozesse ist die kalorische von der theoretischen Verbrennungstemperatur zu unterscheiden. Wird ein Brennstoff mit Luft (in einer adiabaten Brennkammer) verbrannt, so stellt sich in dem entstandenen Heizgas die kalorische Verbrennungstemperatur ein, nachdem alle brennbaren Bestandteile in ihre höchste Oxidationsstufe (in der Regel H₂O und CO₂) umgesetzt wurden. Die kalorische

Temperatur wird jedoch selbst bei adiabater Verbrennung nie erreicht, da diese aufgrund chemischer Gleichgewichtsbedingungen nicht vollständig abläuft (dies insofern, als CO₂ und H₂O dissoziieren) [Spur and Stöferle 1998]. Die exakte theoretische Verbrennungstemperatur muss aufgrund der unterschiedlichen molaren Wärmekapazitäten der einzelnen Rauchgase iterativ ermittelt werden.

Als vereinfachte Abschätzung der Verbrennungstemperatur, die für den Vergleich der exergetischen Effizienz an dieser Stelle als hinreichend genau herangezogen wird, kann auf die Arbeit von Kranzl et al. [2010] zurückgegriffen werden.

Tabelle 8: Exergiegehalt ausgewählter Energieträger [Kranzl et al. 2010]

Unit	ambient temperature °C	(usable, possible) temperature °C	exergy content %
Electricity			100%
mechanical energy (engine)			100%
space heat	0	20	7%
process heat	0	300	52%
Woody biomass	0	800	75%
FT-Diesel	0	1500	85%
Maize silage / Manure mix	0	800	75%
biogas crude	0	800	75%
biogas fed into gas grid	0	1800	87%

Der Exergiegehalt der Raumwärme wird analog berechnet. In dieser Arbeit wird, falls nicht anders angemerkt, von einer Temperaturdifferenz von 20°C ausgegangen. Dies resultiert in einem Exergiegehalt von rund 7%.

Umgebungswärme / Wärmepumpen

Bei jenen Formen der Bereitstellung von Raumwärme, die schwer nutzbare Nieder-Exergetische Wärmequellen mittels Wärmepumpen heranzieht, wurde die Jahresarbeitszahl zur Bestimmung des Exergieanteils (Ex%) am bereitgestellten Wärmestrom herangezogen.

$$Ex_{\%} = \frac{1}{JAZ} * 100\%$$

Die Jahresarbeitszahl (JAZ) ist der Maßstab für die Effizienz einer Wärmepumpenanlage. Sie sagt aus welcher Heizungswärmestrom (\dot{Q}_{therm}) im Verhältnis zum eingesetzten Strom

(Pel) von der Wärmepumpe im Laufe eines ganzen Jahres im betreffenden Haus erzeugt wurde. Dieser Berechnungsmethodik liegt die Annahme zugrunde, dass Umgebungswärme als Anergie - also mit einem Exergiegehalt von 0 – vorliegt. Strom hat einen Exergiegehalt von 100%.

$$JAZ = \frac{\dot{Q}_{therm}}{P_{el}}$$

Der exergetische Wirkungsgrad (η_{Ex}) ist definiert als:

$$JAZ = \frac{\dot{Q}_{therm}}{P_{el}}$$

Bei den Jahresarbeitszahlen von Wärmepumpen konnten in den letzten Jahren erhebliche Verbesserungen festgestellt werden [Faninger 2007]. Für Luft/Luft Wärmepumpen können üblicherweise zumindest JAZ von 3, bei Luft/Wasser Wärmepumpen zumindest JAZ von 4 erreicht werden. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass die tatsächliche JAZ in hohem Maße nicht nur von der Wärmequelle sondern auch von der Vorlauftemperatur und damit dem Wärmeverteilsystem und der thermischen Qualität eines Gebäudes abhängt.

Eine JAZ von 3 entspricht einem Exergiegehalt des bereitgestellten Wärmestroms von etwa 33% bzw. entspricht eine JAZ von 4 einem Exergiegehalt von etwa 25%. Wird am Beispiel der Raumwärmeaufbringung eine Temperaturdifferenz von 20°C unterstellt, ergibt sich somit ein exergetischer Wirkungsgrad von 21% bzw. 28%. Im Vergleich dazu liegt der exergetische Wirkungsgrad bei einer Beheizung mit Strom (100% Exergiegehalt) etwa bei 7%.

Tabelle 9: Exergetische Wirkungsgrade von Wärmepumpen

		Wärmetauscher Luft/Luft	Wärmetauscher Luft/Wasser	Elektrische Beheizung	Heizöl
Jahresarbeitszahl	JAZ	3	4	(1)	
Exergiegehalt	Ex _{out}	33%	25%	100%	88%
exergetischer Wirkungsgrad der Raumwärmeaufbringung	η_{Ex}	21%	28%	7%	8%
Exergieeffizienz-Steigerung gegenüber einer Beheizung mit Heizöl		264%	352%	-12%	

Die kontrollierte Wohnraumbelüftung folgt dem Prinzip eines Luft/Luft Wärmetauschers – der exergetische Wirkungsgrad liegt bei einer Jahresarbeitszahl von 3 bei 21%.

Raumfeuchtetauscher

Das Innenraumklima unterscheidet sich vom Referenz-Außenklima nicht nur durch einen Temperaturunterschied sondern auch durch die Luftfeuchtigkeit, die einen bestimmten Enthalpiegehalt aufweist.

Die physikalische Exergie feuchter Luft berechnet sich wie folgt:

$$Ex_{phys,Luft,Feucht} = (c_{p,trocken} + \omega * c_{p,Dampf}) * \left[(T - T_0) - T_0 * \ln \frac{T}{T_0} \right] + (1 + \omega) R_a T_0 \ln \frac{p}{p_0}$$

Da bei Raumklimatisierung Atmosphärendruck herrscht, ist üblicherweise kein mechanisches Exergiepotential vorhanden. Es wird im Folgenden angenommen, dass es keine Druckdifferenz zwischen Innenraum Umgebung herrscht.

Die spezifische Wärmekapazität von trockener Luft ($c_{p,trocken}$) beträgt 1,003 kJ/kgK, jene von Wasserdampf ($c_{p,Dampf}$) 1,872 kJ/kgK. Bei einer Temperatur von 20°C liegt das maximale Massenverhältnis von Wasserdampf zu Luft ($\omega = m_v/m_a$) - entsprechend 100% Luftfeuchtigkeit - bei 0.0147 kg/kg.

Chemische Exergie, die etwa durch Kondensation freigesetzt wird, ist in dieser Berechnung vernachlässigt.

Die optimale Luftfeuchtigkeit für ein behagliches Raumklima liegt zwischen 40% und 65%. Eine 65%ige Luftfeuchtigkeit entspricht einem Massenverhältnis von 0.0087 kg/kg.

Die maximale Exergieeinsparung entspricht einer vollständigen Anreicherung der Zuluft mit der Luftfeuchtigkeit der Abluft. Tatsächlich können etwa 80% der Luftfeuchte getauscht werden. Eingesetzt werden in der Regel Membranen (z.B. ausgeführt als wasserdurchlässige Folien in rekuperativen Systemen) oder Sorptionsmittel in Regeneratoren (Rotationswärmetauscher).

Für die die Berechnung wird eine Außentemperatur von 0°C und eine Innentemperatur von 20°C angenommen.

Tabelle 10: Maximal erreichbare Exergieeinsparung durch Luftfeuchtetauscher

rel. Luftfeuchtigkeit	%	0	20	40	60	80	100
m_{Wasser}/m_{Luft}	kg/kg	0,000	0,003	0,006	0,006	0,012	0,015
$Ex_{Raumluft}$	kJ/kg	0,700	0,704	0,708	0,708	0,716	0,720
max. Exergieeinsparung	%	0,00%	0,54%	1,08%	1,08%	2,18%	2,74%
$c_{pLuft,trocken}$	1,003						
$c_{p,Wasserdampf}$	1,872						
T_0	273,15						
T	293,15						

Solare Kühlung

Verdunstungskühlung

Torio [et al. 2009] präsentiert eine auf Exergie basierende Analyse von Klimatisierungssystemen.

Da die Exergieanalyse kein normiertes Berechnungsschema ist, sind unterschiedliche Rechenwege, mit teils unterschiedlichen Ergebnissen möglich.

Ein Weg um Verdunstungskühlung exergetisch zu erfassen ist die Exergie der Luft in chemische, thermische und mechanische Komponenten zu unterteilen. Verdunstungskühlung wird durch Verlust der chemischen Exergie im primären und sekundären Luftkreislauf erreicht um die thermische Exergie der Primärluft zu erhöhen.

Wepfer [nach Torio et al 2009] findet unter den Annahmen einer Außentemperatur $T_A=35^\circ\text{C}$, Umgebungsdruck = 1 atm und eines Wasser zu Luft Massenverhältnisses von 0.01406 kg/kg für Verdunstungskühlung eine Exergieeffizienz von 38%

Sorptionskühlung

Die Exergieeffizienz für Sorptionskühlung mit Solarthermie wird ähnlich der von konventionellen Kältemaschinen definiert, beinhaltet aber den Exergieoutput der Solarthermieanlage als Input für das Gesamtsystem.

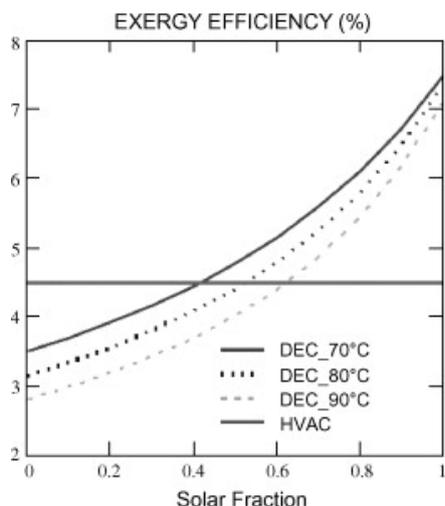


Abbildung 20: Exergieeffizienz für eine konventionelle Kältemaschine und Solare Kühlung mit verschiedenen Zulufttemperaturen und Anteile der Solarenergie [Torio et al. 2009]

Bemerkenswert ist, dass trotz der höheren JAZ im Sommer die Exergieeffizienz für die Gebäudekühlung signifikant geringer ist als für die Beheizung. Das resultiert aus dem geringen Temperaturunterschied zwischen Innenraum- und Außentemperatur, der zu einem sehr geringen Exergiebedarf zur Raumkühlung führt [Torio 2009]. Daher ist der Gebäudekühlung eine niedrige Exergieeffizienz immanent und folglich aus exergetischen Gesichtspunkten möglichst zu vermeiden bzw. passiv zu realisieren. Der Einsatz von solarer Kühlung hat den Vorteil, dass die im Sommer oft überschüssige Wärmeenergie aus Solarkollektoren eingesetzt werden kann.

6.2 Ergebnis-Cluster

6.2.1 Haus der Zukunft

Die meisten Best-Practice-Beispiele, die Niedrigexergie-Komponenten aufweisen können, wurden erwartungsgemäß im Programm Haus der Zukunft gefunden. Es konnten sieben erfolgreich eingesetzte Technologien identifiziert werden. Niedrigexergetische Aufbringung von Raumwärme wird in allen untersuchten Beispielen zumindest über einen Luftwärmetauscher realisiert. Weit verbreitet ist auch der zusätzliche Einsatz von Solarthermieanlagen.

Aus der umfangreichen Liste an Projekten wurden jene ausgewählt, die aus unserer Sicht in besonderem Ausmaß low-ex-Komponenten integrieren. Wir weisen allerdings darauf hin, dass eine derartige Auswahl nur schwer nach eindeutigen Kriterien zu treffen ist und viele andere Objekte ebenfalls in der einen oder anderen Weise low-ex-Technologien anwenden.

Tabelle 11: Best-Practice Beispiele für Low-Ex-Systeme aus der Programmlinie Haus der Zukunft

Projekt	Programmlinie	RaumluftWT	RaumfeuchteWT	ErdWT	GrundwasserWT	Solarthermie	solare Kühlung	LowEx-Gebäudearchitektur	(Photovoltaik)	Referenz
Lehm Bürogebäude Tattendorf	HdZ	X	X		X	X		X		[Wagner et al. 2009a]
Passivhaus Roschégasse 20	HdZ	X		X				X		[Wagner et al. 2009b]
Sunny Energy Building	HdZ	X	X		X	X	X	X	X	[Rauhs et al. 2009]
Holz-Passivhaus Mühlweg	HdZ	X				X				[Kogler 2008]
Einfamilienpassivhaus Pettenbach	HdZ	X		X				X	X	[Lang et al. 2007]
Ökologischer Freihof Sulz	HdZ	X				X				[Sonderegger et al. 2007]
alpines Passivhaus Schiestlhaus Hochschwab	HdZ	X				X			X	[Wolfert et al. 2006]
S-House	HdZ	X			X	X				[Wimmer et al. 2006]

Das Projekt Lehm –Passivhaus Tattendorf [Wagner et al. 2009a] zeichnet sich durch die gezielte Auswahl der Baumaterialien nach bauökologischen Gesichtspunkten aus.

Hinsichtlich niedrig exergetischer Komponenten ist insbesondere die Verwendung von großflächigen Lehm-Heizelementen in Verbindung einer Solarthermie-Anlage (Nachheizung mittels E-Heizstab) zu nennen. Zur Kühlung der Räume kann aus einem Brunnen kaltes Wasser gefördert werden, das über einen Wärmetauscher Kühlenergie an den Heizkreis abgibt. Ein zusätzlicher positiver Effekt auf den Feuchtigkeitshaushalt wird durch den Lehm-Verbundwerkstoff erreicht, der aufgrund seiner materialspezifischen Eigenschaften als Feuchtepuffer wirkt. Zur Nachheizung der Zuluft ist ein Bio-Ethanol Brenner vorhanden.

Die Anlage Roschégasse in Wien ist mit 114 Wohneinheiten die derzeit größte Passivhaus-Wohnanlage Österreichs [Wagner et al. 2009b]. Durch die großen, kompakt gehaltenen Baukörper ergibt sich ein sehr niedriger Energiebedarf. Die Vorwärmung oder Vorkühlung der Außenluft über erfolgt über einen Luft/Sole - Wärmetauscher. Der Erdwärmekreis arbeitet mit 11 Tiefensonden á 100 m und wird mittels Ringleitungen mit den Heiz- und Kühlregistern über Dach verbunden. Für jedes Stiegenhaus gibt es einen eigenen Ansaugturm. Am Beispiel Roschégasse kann gezeigt werden, dass eine Niedrig-Exergetische Raumwärmeaufbringung auch in großen Wohneinheiten realisiert werden kann.

Das Sunny Energy Building [Rauhs et al. 2009] in Wien hat den Anspruch durch die Kombination von verschiedenen Maßnahmen eine größtmögliche Energieeinsparung zu erreichen. Die Planung wurde im Zuge eines integralen Prozesses von einem Team von mehr als 10 verschiedenen Planern und Konsulenten gemeinsam erarbeitet.

Gemäß der Zielsetzung wird eine Reihe an Niedrig-Energie-Komponenten eingesetzt, die auch LowEx-Charakter aufweisen. Herauszuheben ist eine großflächige Bauteilaktivierung, die die Nutzung von geringen Temperaturpotentialen ermöglicht sowie die solare, sorptionsgestützte Klimatisierung, eine innovative Form der Gebäudeklimatisierung, die im ENERGYbase erstmals in Österreich in diesem Ausmaß zum Einsatz gekommen ist [Rauhs et al. 2009].

Am Holz-Passivhaus Mühlweg [Kogler 2008] wurde der Versuch unternommen ein Demonstrationsprojekt zu realisieren, das sich in weiterer Folge auch im frei finanzierten Wohnbau etablieren kann. Dazu wurde industrielle Vorfertigung der tragenden Holzstruktur inklusive Fassade forciert. Aus Kostengründen wurde vom verstärkten Einsatz von LowEx-Komponenten in der Ausführung Abstand genommen. Durch den verstärkten Einsatz einer Solarthermie-Anlage können jedoch bereits 2/3 des Wärmebedarfs gedeckt werden.

Am Einfamilienhaus Pettenbach [Lang et al. 2007] wurde der erste Umbau eines Altbaus auf Passivhausstandard demonstriert. Als Best-Practice nach Niedrig-Exergetischen Gesichtspunkten ist besonders die Nutzung der Abwärme der Senkgrube zur Luftvorerwärmung anzumerken.

Der ökologische Freihof Sulz [Sonderegger et al. 2007] ist ein denkmalgeschütztes Objekt und wurde als öffentlich-gewerbliches Gebäude unter ökologischer und energetischen Kriterien saniert. Die erforderliche Raumwärme wird kombiniert durch eine Biomasse-Contracting-Heizung, eine Solaranlage und die Nutzung der Abwärme aus der gewerblichen Tätigkeit bereitgestellt.

Das Passivhaus Schiestlhaus am Hochschwab [Wolfert and Rezac 2006] wurde als Prototyp eines ökologischen alpinen Schutzhauses mit Passivhaustechnologie konzipiert. Warmwasser wird mit niedrigem Exergieinsatz über eine Solarthermie-Anlage sowie über einen Wärmetauscher im Feststoffbrennherd gewonnen. Zur Spitzenlastabdeckung wird ein Pflanzenölbetriebenes BHKW eingesetzt. Die Raumwärmeaufbringung wird aus Wärmerückgewinnung aus Abwässern durch Absetzbecken im Haus und Wärmetauschern in der Dunstabzugshaube sowie in der Abluft unterstützt. Prinzipiell werden Verbraucher mit geringem Exergiebedarf eingesetzt. Das Haus wurde auf eine optimale Ausnutzung der Sonneneinstrahlung hin positioniert.

Das S-House [Wimmer et al. 2006] demonstriert die Verbindung nachwachsender Baustoffe mit denen der Passivhaustechnologie. Dadurch wurde der Ressourcen- und Energieverbrauch, ohne die Baukosten zu erhöhen, um den Faktor zehn verringert werden.

Der Heizenergiebedarf wird mit einem eigens entwickelten Holz befeuerten Speicherofen, der seine Energie an den Abluftstrang des Lüftungssystems abgibt, abgedeckt. Die Wärme wird über Wärmetauscher an die Zuluft übertragen und im Gebäude verteilt. Das Lüftungssystem verfügt außerdem über einen Erdwärmetauscher, durch den die Außenluft vorgewärmt oder vorgekühlt werden kann. Eine Solarthermie-Anlage liefert Energie für die Brauchwarmwasserbereitung in einen Pufferspeicher.

6.2.2 Fabrik der Zukunft

Im Programm "Fabrik der Zukunft" konnten keine erfolgreichen Projekte identifiziert werden, die explizit den Einsatz von LowEx-Systemen zum Gegenstand gehabt haben. Herauszuheben wäre ein Projekt, das sich mit Solarkollektoren für Prozesswärme über 100°C befasst hat. Prozesswärme bis zu einem Temperaturniveau von etwa 100°C kann problemlos mit am Markt erhältlichen Sonnenkollektoren (Flachkollektoren bzw. Vakuumröhrenkollektoren) erzeugt werden. Ein großer Anteil der benötigten Prozesswärme liegt aber auch im Temperaturbereich zwischen 100°C und 200°C. Solche Temperaturniveaus können jedoch nur noch mit konzentrierenden Systemen erreicht werden, da bei herkömmlichen Kollektoren die Wärmeverluste bei diesen Temperaturen zu hoch werden und damit der Wirkungsgrad stark abnimmt.

Die Ergebnisse des Projektes lassen allerdings in Österreich nicht auf eine überdurchschnittliche weitere Verbreitung des betrachteten Produkts schließen. [Jähniq et al. 2006]

„Die Nutzung von solarer Wärme in Produktionsprozessen steht erst am Anfang und erfordert noch einen beträchtlichen Aufwand zur Umsetzung und eine Weiterentwicklung der Entwurfsmethoden.“ [vgl. Schnitzer et al. 2007]. Ein Nachfolgeprojekt zur Entwicklung von Parabolrinnenkollektoren zur Kälteerzeugung läuft derzeit. [Jähniq 2010]

6.2.3 Energiesysteme der Zukunft

Tabelle 12: Best-Practice-Beispiele für LowEx-Systeme aus der Programmlinie Energiesysteme der Zukunft

Projekt		Relevanz für LowEx-Systeme	Referenz
Dezentrale Energieerzeugung für Fernwärme	EdZ	LowEx-Prozesswärme	[Bucar et al. 2006]
Bioenergie Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung	EdZ	Prozesswärme zur (Fern-)Kühlung	[Krottil und Ragossnig 2009]
Regenerative Energieversorgung einer Industrieregion	EdZ	Best-Practice Regionen	[Tragner et al. 2007]

Im Rahmen der Energiesysteme der Zukunft untersuchen insbesondere die beiden Studien „Dezentrale erneuerbare Energie für bestehende Fernwärmenetze“ [Bucar et al. 2006] und „Bioenergie-Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung-Versorgung“ [Krottil and Ragossnig 2009] Technologien und Projektbeispiele die für eine niedrigexergetische Aufbringung von Wärmeenergie für Gebäude und Gemeinden in Betracht kommen.

Eine detaillierte Beschreibung der Projekte findet sich in Absatz 6.3.

Als Modellregionen, die sich im „Sinne der Programmlinie“ entwickelt haben werden von Tragner [et al. 2007] die Gemeinde Güssing und das Auenland Carnuntum angeführt. Entscheidendes Auswahlkriterium war das Ziel, eine vollständige Deckung der Energieversorgung mit erneuerbaren Ressourcen zu erreichen.

Exergetische Betrachtung zur Raumwärmeaufbringung ausgewählter Modellregionen

Im Auenland Carnuntum wird lt. Angaben des Vereins Energiepark der Endenergieverbrauch an Strom zu über 100% aus erneuerbaren Quellen gedeckt. Der Anteil der erneuerbaren Energieträger am Endenergieverbrauch der Wärme beträgt lediglich 13,6% (Gesamtanteil erneuerbarer Energieträger am Endenergieverbrauch 34,85%.) Eine genaue Aufschlüsselung der Energieträger ist für die Region in Tragner [2007] nicht gegeben, es muss daher an dieser Stelle auf eine weitere Berechnung der Exergieeffizienz der Gemeinde verzichtet werden. Prinzipiell lässt sich jedoch sagen, dass fossile Energieträger gerade im

Bereich der der Raumwärmebereitstellung eine vergleichsweise schlechte Exergieeffizienz aufweisen.

Da im Bereich Raumwärme derzeit das größte Exergieersparungspotential gesehen wird und der überwiegende Anteil des Endenergieverbrauchs der Region im Bereich Wärme anfällt, kann von der Region Auenland Carnuntum in exergetischer Hinsicht noch nicht von einer Best-Practice-Region gesprochen werden.

Die Gemeinde Güssing deckt ihren Endenergiebedarf an Wärme lt. Daten im Bericht derzeit zu 49% aus erneuerbaren Ressourcen. (Der Eigenversorgungsgrad der Stadt Güssing mit Wärme liegt bei 94%).

Die Berechnung des Exergiegehalts der Energieträger erfolgt wie in 4.2 beschrieben. Für die Berechnung des exergetischen Wirkungsgrades wurde eine Raumtemperatur von 20°C (entsprechend etwa 7% Exergiegehalt) angenommen. Daten der Raumwärmeaufbringung nach Energieträgern wurden für die Region Güssing nach Koch [et al. 2006] bzw. für Österreich nach Müller [2010] angenommen.

Im Folgenden wurde der exergetische Wirkungsgrad der Raumwärmebereitstellung nach den anteilig eingesetzten Primärenergieträgern in der Region Güssing mit 12,8% ermittelt. Im Vergleich dazu liegt der exergetische Wirkungsgrad der Raumwärmebereitstellung österreichweit bei 12,2%.

Tabelle 13: Vergleich des exergetischen Wirkungsgrades der Raumwärmeaufbringung

	Nutztemperatur [°C]	Exergie- gehalt [%]	exergetischer Wirkungsgrad [%]	Primärenergieträger Raumwärmeaufbringung				exergetischer Wirkungsgrad der Raumwärmeaufbringung	
				Region Güssing [MWh]	Österreich [GWh]	Region Güssing [%]	Österreich [%]	Region Güssing	Österreich
Fernwärme	70	20%	33%	31200	14848	17,6%	15%	5,9%	5,0%
Heizöl	2000	88%	7,754%	54317	29407	30,6%	30%	2,4%	2,3%
Holz	800	75%	9%	63110	15989	35,6%	16%	3,3%	1,5%
Kohle	2200	89%	8%	1870	1882	1,1%	2%	0,1%	0,1%
Strom	-	100%	7%	17938	5803	10,1%	6%	0,7%	0,4%
Gas	1800	87%	8%	7804	25816	4,4%	26%	0,3%	2,0%
Wärmepumpe / Solar	Annahme: JAZ* 4	25%	27%	786	2044	0,4%	2%	0,1%	0,6%
Pellets, Stroh, Hackgut	800	75%	9%	352	3473	0,2%	3%	0,0%	0,3%
Insgesamt [MWh]				177377	99262	100,0%	100%	12,8%	12,2%
Quelle der Primärenergieträger: [nach Koch 2006 S.70, Müller 2010]									
Region Güssing Sonstige (0,4%) wurden vernachlässigt									
Daten Österreich für 2007									
*) Jahresarbeitszahl									
T _{ausen} (0°C)	273,15 K								
Temperaturdifferenz	20 K								

Es zeigt sich, dass der exergetische Wirkungsgrad der Region Güssing nicht wesentlich über jenem für gesamt Österreich liegt. Das ist insbesondere auf eine Konzentrierung von Fernwärme in städtischen Gebieten zurückzuführen, die für Österreich einen ähnlichen Anteil aufweist wie für die Region Güssing.

6.3 Detaillierte Beschreibung ausgewählter Best-Practice-Beispiele

6.3.1 Sunny Energy Building

Ein gut dokumentiertes Beispiel für den Einsatz innovativer, nachhaltiger Energiesysteme ist das Sunny Energy Building (ENERGYbase – Bürohaus der Zukunft), das im Rahmen der „Haus der Zukunft“ Programmlinie (www.hausderzukunft.at) realisiert wurde.

Zur Abschätzung des Betriebsverhaltens der innovativen Komponenten wurden vorab Detailanalysen und thermische Simulationsrechnung durchgeführt. Zu nennen sind insbesondere Detailuntersuchungen zum Betriebsverhalten der thermisch aktivierten Bauteiltemperierung und zur solaren Klimatisierung sowie thermisch-hygrische Simulationen für Pflanzenpuffereinbindung. Aus den Simulationen können Daten zur Auslegung und Dimensionierung der Bauteile getroffen werden. Eine derartige Planung für das Zusammenwirken der verschieden eingesetzten LowEx Komponenten leistet einen wesentlichen Beitrag zur Optimierung des Energie- und Exergiebedarfes.

Komponenten, die LowEx-Charakter aufweisen und als zukunftsweisende Best-Practice Beispiele identifiziert wurden, stellen sich wie folgt dar [vgl. auch Rauhs et al. 2009]:

- **Temperierung mit thermisch aktivierten Bauteilsystemen**
Eine Grundtemperierung der Büroeinheiten wird über thermisch aktivierte Bauteilsysteme (Flächenkühlsystem unter Nutzung von thermisch aktivierter Baukörpermasse) bewerkstelligt. Die Wärmezufuhr bzw. -abfuhr wird von der Lüftungsfunktion entkoppelt und nutzt die thermische Speicherfähigkeit von geeigneten Bauteilen des Gebäudes. Dieses System arbeitet thermisch träge und zeichnet sich durch die Begrenzung der thermischen Leistung aus.
- **Heizen und Kühlen mit Grundwasser**
Die günstigen geologischen Bedingungen des Standortes lassen eine Nutzung von Grundwasser durch eine gekoppelte Wärmepumpe zur winterlichen Beheizung des Gebäudes zu. Eine direkte Nutzung des Kühlpotenzials vom Grundwasser erfolgt im Sommer. Über einen Wärmetauscher zwischen den beiden hydraulischen Kreisen werden zur Kühlung geeignete Temperaturen bereitgestellt. Wasser/Luft Wärmetauscher sind eine erprobte Technologie, die einen Beitrag zur niedrig-exergetischen Raumklimatisierung leisten kann.
- **Solare Klimatisierung**

Eine solare Gebäudeklimatisierung übernimmt die technische Aufgabe der Zuluftkonditionierung. Die solare Klimatisierung wurde mittels Sorptionskühlung, Desiccant Evaporative Cooling (DEC), umgesetzt. Dieses exergieeffiziente Klimatisierungsverfahren nutzt im Wesentlichen drei Prozessschritte der Luftbehandlung:

- 1.) Lufttrocknung - mit einem so genannten Sorptionsrotor,
- 2.) Wärmerückgewinnung und
- 3.) adiabate Verdunstungskühlung.

Die Regeneration des beladenen Trocknungsrotors erfolgt unter Verwendung von Solarenergie. Die solare, sorptionsgestützte Klimatisierung ist eine innovative Form der Gebäudeklimatisierung, die im ENERGYbase erstmals in Österreich in diesem Ausmaß zum Einsatz gekommen ist.

Die exergetische Beschreibung von Systemen zur evaporativen Kühlung hat in der Annex 49 Arbeitsgruppe große Aufmerksamkeit erhalten.

- Pflanzenpuffereinbindung

Es wurden Pflanzenpufferräume zur ökologischen Luftbefeuchtung im Gebäude integriert. Pufferräume, in denen 500 Pflanzen einer speziell für die Luftbefeuchtung gezüchteten Art im Winter und in der Übergangszeit die Luft befeuchten, sind eine absolute Neuheit, weil sie als abgeschlossene Feuchtegeneratoren arbeiten und regelbar, präzise steuerbar, und damit erstmals als berechenbare Größe in ein haustechnisches System integrierbar sind.

- LowEx-Gebäudearchitektur

Die Gebäudearchitektur, wie sie bei Passivhäusern des Öfteren zum Einsatz kommt, ist auf eine optimale Anpassung an den Verlauf des Sonnenstandes angepasst. Dadurch kann zusätzlich niedrigexergetische solare Wärmestrahlung bei niedrigem Sonnenstand bzw. im Winter eingebracht werden und der Einfall der solaren Strahlung bei hohem Sonnenstand bzw. im Sommer minimiert werden.

6.3.2 Dezentrale Energieerzeugung für Fernwärme

Fernwärme ist eine verbreitete Technologie zur Nutzung niedrigexergetischer Abwärme.

Der österreichische Fernwärmebedarf wird vorwiegend durch kommunale oder kommunalnahe Versorgungsunternehmen gedeckt. Schwerpunkte der Fernwärmeversorgung sind Wien, Graz, Linz, Salzburg, Klagenfurt, St. Pölten und Wels. Aber auch in kleineren Gemeinden wird immer stärker auf die Versorgung mit Fernwärme gesetzt.

In der Studie [Bucar et al. 2006] wird die Einspeisung in ein lokales Fernwärmenetz aus Geothermie, Biomasse KW-Kopplung und Solarthermie behandelt. Es werden zahlreiche Beispiele beleuchtet und verglichen. Als innovatives Projektbeispiel der Einspeisung von solarthermischer Wärmeenergie wird die UPC-Arena (ehem. Arnold Schwarzenegger Stadion) hervorgehoben. Ein Hemmnis für den weiteren Ausbau ist der mangelnde Absatz für Wärme im Sommer.

Bioenergie Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung

Aufgrund des Nachteils der fehlenden Wärmeabnahme bioenergiebetriebener Anlagen im Sommer (Hitzeperiode) wird versucht anhand von drei konkreten KWK-Anlagen aufzuzeigen, wie dieser wirtschaftliche Nachteil bei KWK-Systemen durch eine Anlagenerweiterung abgedeckt werden könnte.

Das Verwaltungsgebäude des Umweltdienstes Burgenland und das Landeskrankenhaus Oberpullendorf sind bereits mit einer Absorptionskälteanlage in Verbindung mit dem KWK - System Oberpullendorf ausgestattet.

Tabelle 14: Vergleich der Exergieeffizienz verschiedener Kraft-Wärme-Kopplungs-Varianten

		theoretische Verbrennungs- temperatur	Exergiegehalt Brennstoff	Heizwerk		Verstromung		mit Wärme- auskopplung	mit Wärme-/ Kälteauskopp lung
				Ex _{Brennstoff}	Ex _{in,Heizwerk}	η _{Ex,Heizwerk}	Ex _{in,el}	η _{Ex,el}	η _{Ex,KWK}
Holz		800	75%	73%	8%	73%	48%	51%	53%
Gas		1800	87%	86%	7%	86%	41%	43%	45%
Öl		2000	88%	87%	7%	87%	40%	42%	44%
Exergieoutput	Ex _{out}				6,1%		35%	37%	39%
Elektrischer Wirkungsgrad	η _{el}				0%		35%	35%	35%
Thermischer Wirkungsgrad	η _{th}				90%		0%	27,5%	55%
Gesamtwirkungsgrad	η _{ges}				90%		35%	63%	90%
Raumwärme (bei 20°C)	Ex _{rw}		7%						
Elektrizität	Ex _{el}		100%						
abs. Nullpunkt [°C]	T _{Abs}		273,15						

Der niedrige Exergetische „Wert“ von Raumwärme resultiert in einer schlechten Exergieeffizienz von Heizwerken (8% für Holz bzw. 7% für Öl und Gas) und zu einer nur geringfügig verbesserten Exergieeffizienz von KWK und KWKK Anlagen gegenüber reiner Verstromung.

Dennoch kann durch die Nutzung von KWKK Anlagen ein beträchtliches Exergieeinsparungspotential gegenüber elektrischer Raumkühlung realisiert werden.

Im Bereich der Klimatisierung von Gebäuden ist noch wenig Literatur hinsichtlich spezifischer Kennzahlen (Kühllast, Kältebedarf) zu finden. In dieser Richtung zeigt sich ein klarer Bedarf an weiterführender Forschung, da der Energiebedarf für die Klimatisierung zusehends an Bedeutung gewinnt. [Krottil und Ragossnig 2009]

6.4 Synthese

Es konnten wie folgt sechs in Österreich eingesetzte Low-Ex Systeme für Gebäude identifiziert werden:

- Kontrollierte Wohnraumlüftung
- Feuchterückgewinnung
- Heizen und Kühlen mit Grundwasser und Erdwärme
- Solare Kühlung
- LowEx-Gebäudearchitektur
- Bauteilaktivierung

Ein gut dokumentiertes Beispiel für den Einsatz von LowEx-Systemen ist das Sunny Energy Building (ENERGYbase – Bürohaus der Zukunft), das im Rahmen der „Haus der Zukunft“ Programmlinie (www.hausderzukunft.at) realisiert wurde. Komponenten mit niedrigem Exergie-Bedarf, die als zukunftsweisende Best-Practice Beispiele zur Anwendung kommen, sind: Wärme- und Feuchterückgewinnung, Heizen und Kühlen mit Grundwasser, Solare Kühlung und gebäudearchitektonische Maßnahmen die sich positiv auf den Exergiebedarf auswirken.

Hervorzuheben ist insbesondere der Einsatz von solarer Kühlung, die den Vorteil hat, dass hohe Solarstrahlung bzw. geringer Wärmebedarf und Kühllast gleichzeitig auftreten. Die exergetische Beschreibung von Systemen zur Raumkühlung hat in der Annex 49 Arbeitsgruppe große Aufmerksamkeit erhalten.

Es ist davon auszugehen, dass der Kühlbedarf in Zukunft weiter steigen wird. Da aufgrund der geringen Temperaturdifferenzen der Gebäudekühlung eine relativ geringe Exergieeffizienz immanent ist, können insbesondere in diesem Bereich verfügbare Technologien zu einer exergetischen Optimierung einen Beitrag leisten.

Auf Gemeindeebene kann die Einspeisung in lokale Fernwärmenetze aus verschiedenen Quelle wie industrieller Abwärme, Geothermie, Solarthermie oder Wärme aus Biomasse KWK und sonstigen KWK einen wesentlichen Beitrag zur Bedarfsdeckung an niedrigexergetischer Wärmeenergie zur Raumklimatisierung und Warmwasserbereitstellung leisten.

Ein Hemmnis für den Ausbau von Fernwärme ist grundsätzlich der mangelnde Absatz für Wärme im Sommer. In Kombination mit Verfahren die (Ab-)Wärme zur Kälteproduktion (z.B. Absorptions-Kälte-Anlagen) verwenden ist hier ein großes Einsparungspotential zu verorten.

Das Verwaltungsgebäude des Umweltdienstes Burgenland und das Landeskrankenhaus Oberpullendorf sind bereits mit einer Absorptionskälteanlage in Verbindung mit dem KWK-System Oberpullendorf ausgestattet, das es ermöglicht die Fernwärme aus dem KWK-System zur Kühlung des Gebäudes zu Nutzen.

Prinzipiell ist das Konzept der exergetischen Bewertung derzeit nicht weit verbreitet, daher hat sich noch keine einheitliche Auswertung unter exergetischen Gesichtspunkten etabliert. Eine stärkere Einbeziehung in die Analyse von Gebäuden könnte einen wertvollen Beitrag leisten um Einsparungspotentiale aufzuzeigen.

7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die zentrale Schlussfolgerung und Aussage aus der Beteiligung an Annex 49 kann folgendermaßen zusammengefasst werden:

Der Einsatz passender Energieträger für die jeweiligen Anwendungen (nämlich hinsichtlich des benötigten Exergie-Niveaus) kann zu einer drastischen Steigerung des exergetischen Wirkungsgrades und damit des Exergie- und Energieverbrauchs sowie der damit in Zusammenhang stehenden Treibhausgasemissionen führen.

Was also zählt, ist neben dem gesamten Niveau konsumierter Energieträger sowie bereitgestellter Energiedienstleistungen auch die Qualität dieser konsumierten Energieträger, nämlich im Sinne ihres jeweiligen Exergiegehalts. Der Überfluss an (fossiler) Energie hat in der Vergangenheit dazu geführt, dass Energieträger mit hohem Exergiegehalt (z.B. Strom, Erdgas, Erdöl) für alle möglichen Anwendungen eingesetzt werden, unabhängig davon, ob dieses hohe Exergie-Niveau benötigt wurde. Ein derartiges Muster wird durch die Vereinfachung von Planung, Gestaltung von Technologie (-komponenten) und Systemen geprägt und angeregt. Das Paradigma „jeder Anwendung den passenden Energieträger“ erfordert mehr Aufwand und Intelligenz in der Planung, in der Gestaltung von Technologie (-komponenten) sowie kreative, innovative Lösungen.

Dieses mehr an Technologie ist im Allgemeinen auch mit einem mehr an Investition (Kapital) verbunden. Konkret konnte durch die österreichischen Beiträge zu Annex 49 gezeigt werden, dass ein Trade-Off zwischen Kapital und Exergiegehalt der eingesetzten Energieträger existiert. Die Formel $S=f(E, \eta(T))$, die (z.B. in Haas et al 2009) den Zusammenhang zwischen der Bereitstellung einer bestimmten Energiedienstleistung (Service, S) durch Energieeinsatz (E) und der Effizienz (η), die wiederum eine Funktion der Technologie (T) darstellt, ist noch stärker gültig, wenn E als Exergie-Einsatz interpretiert wird: Je geringer der Exergiegehalt eines eingesetzten Energieträgers, desto mehr an Technologie (und Investition in diese Technologie) ist nötig, um diesen nieder-exergetischen Energieträger nutzbar zu machen. Es zeigt sich auch, dass Preise für Energieträger durchaus ihren Exergie-Gehalt widerspiegeln, allerdings gleichzeitig auch die für ihren Einsatz nötigen Investitionen (z.B. ein Fernwärmenetz zur Nutzbarmachung von Abwärme oder eine Wärmepumpe zur Nutzbarmachung von Erdwärme).

Die Analysen im vorliegenden Projekt haben – am Beispiel des österreichischen Sektors Raumwärme und Warmwasser – gezeigt, dass ein beträchtliches Potenzial zur Steigerung der exergetischen Effizienz liegt, und dass zumindest ein relevanter Anteil in den kommenden Jahrzehnten erschlossen werden kann. Raumwärme stellt aufgrund ihres nieder-exergetischen Charakters (Raumwärme besitzt ein nur ein relativ geringfügig höheres Temperatur-Niveau als die Umgebungswärme) ein besonders großes Feld für exergetische Effizienzsteigerungen dar. Anhand der Untersuchung von low-exergy-best-practice-

Beispielen in Österreich lässt sich erkennen, dass nieder-exergetische Komponenten (z.B. Solarthermie, Wärmerückgewinnung, Abwärmenutzung) durchaus in relevantem und breiten Ausmaß eingesetzt werden. Beispiele für eine innovative Verknüpfung mehrerer low-exergy-Komponenten lassen sich eben falls finden, wenn auch in deutlich geringerem Ausmaß. Die explizite exergetische Optimierung von Energie-Systemen findet derzeit praktisch nur in großindustriellen thermodynamischen Prozessen statt, nicht jedoch auf Gebäude- oder Siedungsebene.

Von besonderem Nutzen kann die Anwendung des Exergiekonzepts sein, wenn es um den Vergleich von Systemen mit mehreren Energie-Outputs unterschiedlichen Exergie-Gehalts geht. Dies ist zum Beispiel bei der Biomasse der Fall. Der exergetische Vergleich zeigt z.B. das exergetische Effizienz-Potenzial der KWK in Relation zum Einsatz der Biomasse als Kraftstoff oder zur reinen Wärmebereitstellung. Dies kann einen Hinweis darauf geben, wo langfristig der höchste Nutzen des Biomasse-Einsatzes liegen kann. Gleichzeitig stellt sich vor allem kurzfristig die Frage nach dem richtigen Referenz-System: Im Vergleich zu einer Strom-direkt oder einer Erdgas-Heizung kann Biomasse unter Umständen auch unter dem exergetischen Gesichtspunkte Vorteile bringen, nicht nur im Hinblick auf die Treibhausgasemissionen.

Im Detail sind bei der exergetischen Analyse immer noch methodische Fragen zu klären. Dies betrifft zum Beispiel die Wahl der Referenz-Temperatur oder der Systemgrenzen (z.B. bei der Solarthermie). Im Zuge der Analysen von Annex 49 konnten hier – nicht zuletzt durch den internationalen Austausch – Fortschritte erzielt werden (konkret zum Beispiel für den gut untersuchten Fall der solaren Kühlung). Fragen, die dabei noch offen geblieben sind, werden im Folgenden angeführt.

Als Ausblick bzgl. des Themas nieder-exergetischer Energiesysteme formulieren wir in erster Linie jene Fragen und Aspekte, die aus unserer Sicht offen geblieben sind und daher in künftigen Arbeiten und Projekten zu klären sind. Es wird dabei auf jene Punkte fokussiert, die sich auf die Schwerpunkte der österreichischen Beteiligung beziehen:

In methodischer Hinsicht sind dies vor allem die folgenden Punkte:

- Die Bewertung des Exergie-Gehalts von Energieformen unterscheidet sich je nach Anwendungsfall. Hier existieren unterschiedliche Ansätze in der Literatur jedoch nach unserem Kenntnisstand kaum eine klare Gegenüberstellung der Ansätze und vor allem eine Klärung ihres jeweils sinnvollen Einsatzbereichs.
- Die Wahl der Referenz-Umgebungs-Temperatur (bzw. des Referenz-Umgebungs-Systems) erfolgt zum Teil statisch, zum Teil dynamisch. Hier erscheint auch eine genauere Analyse der Auswirkungen dieser Annahmen sinnvoll.
- Die Systemgrenzen haben oft eine starke Auswirkung auf die Ergebnisse. Dies ist besonders augenscheinlich für den Fall der Solarthermie (wird die exergetische Effizienz der Solaranlage bei der Umwandlung von Sonnenlicht in Wärme

berücksichtigt oder nicht). Auch wenn hier – unter anderem im Zuge von Annex 49 – Arbeiten erfolgten, erscheinen hier einige Aspekte noch klärungsbedürftig.

Im Hinblick auf mögliche Anwendungsgebiete und Forschungsfragen können die folgenden Punkte angeführt werden:

- Im Gebäude-Sektor ist die genauere Analyse der Wirkung thermischer Gebäudesanierung (insbesondere auch hinsichtlich Wärmeverteilsysteme, Vorlauftemperaturen etc). im Gebäudebestand (z.B. für Österreich) noch ein offener Punkt.
- Die Auswirkungen verschiedener Szenarien bei der Fernwärme-Aufbringung (Abwärmenutzung, Temperatur-Niveau, Einbindung von Solar- und Geothermie etc) auf die exergetische Effizienz des Sektors am Beispiel Österreich können noch nicht zufriedenstellend untersucht werden.
- Die genauere Analyse der Nutzung von industrieller Abwärme innerhalb, aber auch zwischen Betrieben und zwischen Betrieben und Fernwärmenetzen ist ein entscheidender Punkt zur kaskadischen Energie-Nutzung und der daraus sich ergebenden exergetischen Effizienzsteigerungen.
- Die genauere vergleichende exergetische Analyse von Biomasse-Nutzungsketten ist ein Standard-Beispiel für die Anwendung des Exergie-Konzepts. Dennoch sind hier viele Fragen noch offen und das Thema relativ wenig bearbeitet.
- Inwiefern die Integration des Exergie-Konzepts in politische Instrumente (zum Beispiel Besteuerung von Energieträgern nach ihrem Exergie-Gehalt) sinnvoll sein kann oder ob die entsprechenden Ideen besser in leichter verständliche Ansätze und Instrumente integriert werden, konnte aus unserer Sicht bis jetzt nicht zufriedenstellend beantwortet werden.
- Auch die Auswirkung technologischen Lernens und der Entwicklung innovativer Technologiekomponenten (insbesondere im Bereich der Wärmespeicher) auf Szenarien des Exergie-Verbrauchs konnte noch nicht hinreichend behandelt werden.
- Zumindest ein Teil dieser Aspekte ist auch Inhalt des Konzepts für ECBCS Annex 51 “Energy Efficient Communities”. Das Arbeitsprogramm für diesen Annex 51 ist in Anhang O zu finden.

Darüber hinaus ist damit zu rechnen, dass ausgewählte Punkte und Fragestellungen in möglichen Folgeprojekten auf nationaler sowie internationaler Ebene von Seiten des Auftraggebers bzw. auch anderen Akteuren behandelt werden.

Eine Empfehlung, die sich in mehreren Arbeiten und Diskussionen wiederfindet (auch im Rahmen von IEA ECBCS Annex 37 und Annex 49) ist die Forderung, dass Energiepreise (falls nötig mittels Besteuerung) ihren jeweiligen Exergiegehalt widerspiegeln sollten. Aus unserer Sicht geht diese Forderung zum Teil ins Leere, da das zumindest zum Teil bereits heute der Fall ist. Entscheidend ist, dass der Energiepreis nicht nur den Exergiegehalt, sondern auch den technologischen Aufwand (Investitionskosten) zur Erschließbarkeit der

Energie berücksichtigt (neben einer Reihe anderer Marktwirkungen). Die Empfehlung muss also in die Richtung gehen, eben diese Investitionen zu ermöglichen bzw. Anreize für diese Investitionen zu bieten.

Energiepolitische Instrumente sollten also Anreize für intelligente, innovative Lösungen bieten, die erlauben für jede Anwendung den richtigen Energieträger zu wählen. Dies umfasst auch die Förderung der entsprechenden Investitionskosten. Der Einsatz von Solarthermie für die Raumwärme und Warmwasser-Bereitstellung ist dafür ein Paradebeispiel, allerdings nicht der einzige. Die intelligente, kreative und (Unternehmens- und Gebäude-) Grenzen überschreitende Berücksichtigung des Angebots und der Nachfrage von Energieformen auf unterschiedlichem Exergie-Niveau kann bis zu Standortfragen von Industriebetrieben und Siedlungen gehen.

Aufgrund der hohen Bedeutung von Technologien bei der Nutzbarmachung nieder-exergetischer Energieformen kommt auch der Forschung und Technologieentwicklung große Bedeutung zu. Dies betrifft insbesondere Technologien im Bereich der Wärmespeicherung und -übertragung.

Die Analysen der Vergangenheit, von gegenwärtigen Best-Practice-Beispielen sowie der Szenarien bis zum Jahr 2050 geben Anlass zur Hoffnung, dass zumindest Teilschritte gesetzt werden. Bis zur Erreichung des Ziels „für jede Anwendung der passende Energieträger“ ist allerdings noch ein weiter Weg. Auf diesem Weg wird die kreative Verknüpfung von Technologiekomponenten und neue Systemintegration dieser Komponenten im Sinne von mehr Planungsmintelligenz eine zentrale Rolle spielen.

8 Anhang

Tabelle 15: Energy costs, consumer prices and technology data for the heating systems considered in Austria

		Wood log boiler	Wood pellets boiler	Gas boiler	Oil boiler	District heat (waste heat)	Heat pump air/water	Heat pump brine/water surface	Electrical convection type heater	Electrical night storage heater
Variable energy price	€/MWh	23	29	40	40	31	83	83	83	73
Energy taxes	€/MWh	0	0	5	11	0	17	17	17	17
Investment costs	€	10.728	13.645	10.915	10.298	11.085	11.417	16.417	2.565	3.794
Levelized investment costs	€/a	1.034	1.315	1.052	992	1.068	1.100	1.582	247	366
Operation and maintenance costs	€/a	297	352	202	270	443	233	194	21	30
Total fixed costs	€/MWh	67	83	66	63	98	70	93	17	24
Total heat generation costs with taxes	€/MWh	97	121	113	112	131	104	113	100	97
Total heat generation costs without energy taxes	€/MWh	97	121	120	125	131	110	118	117	114

Tabelle 16: Energy costs, consumer prices and technology data for the heating systems considered in Finland Exergy content of the energy carriers analyzed in this paper

		Wood pellets boiler	Oil boiler	District Heat	Heat pump exhaust	Heat pump ground	Direct electric heating	Storing electric heating	
Variable energy price	€/MWh	34	33	31	53	53	53	48	(1)
Energy taxes	€/MWh	0	14	2	9	9	9	8	(T)
Investment costs	€	12.780	10.584	10.112	7.762	13.650	2.989	4.034	(2)
Levelized investment costs	€/a	1.231	1.020	974	748	1.315	288	389	(c)
Operation and maintenance costs	€/a	124	96	43	92	126	64	76	(1)
Total fixed costs	€/MWh	68	56	62	42	72	18	23	(c)
Total heat generation costs with taxes	€/MWh	110	96	95	69	92	71	72	(c)
Total heat generation costs without energy taxes	€/MWh	110	112	98	73	95	80	80	(c)

Tabelle 17: Energy costs, consumer prices and technology data for the heating systems considered in the Netherlands

		Natural gas	District Heating	Electric Heating
Variable energy price	€/MWh	38	50	125
Energy taxes	€/MWh	16	23	42
Investment costs	€	11,931	10,592	3,462
Levelized investment costs	€/a	1,149	1,020	334
Operation and maintenance costs	€/a	81	50	13
Total fixed costs	€/MWh	87	87	60
Total heat generation costs with taxes	€/MWh	134	140	184
Total heat generation costs without energy taxes	€/MWh	154	164	226

Tabelle 18: Energy costs, consumer prices and technology data for the heating systems considered in Sweden

		Wood pellets boiler	Oil boiler	District Heat	Heat pump ground	Direct electric heating	Gas
Variable energy price	€/MWh	34	38	36	65	65	42
Energy taxes	€/MWh	0	32	0	24	24	21
Investment costs	€	12396	10672	19810	15844	8517	10241
Levelized investment costs	€/a	1194	1028	1909	1526	821	987
Operation and maintenance costs	€/a	323	215	120	161	0	215
Total fixed costs	€/MWh	65	53	83	72	35	51
Total heat generation costs without taxes	€/MWh	107	100	124	96	100	94
Total heat generation costs including energy taxes	€/MWh	107	139	124	105	124	115

Terminologie

η	energetic efficiency
ξ	exergetic efficiency
CExC	Cumulative Exergy consumption
ex	exergy content of energy carriers
EX	Exergy
HDD	Heating degree days
Q	Energy
RES-H	Renewable heating
T	Temperature

Subscripts:

i	energy carriers
th	thermal
t	time period (year) t
el	electrical
0	Reference state
dh	district heating
Sol	Solar energy

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Die Qualität der verschiedenen Energieformen in Bezug auf Exergie, Einteilung durch (Wall, 1977b)	20
Tabelle 2: Energieinput in Fernwärmekraftwerken in Österreich und resultierender Exergiegehaltsfaktor.....	30
Tabelle 3: Exergiegehalt der in diesem Paper analysierten Energieträger (außer unvermeidbare Exergieverluste)(a)	32
Tabelle 4. Anzahl an Gebäuden und Wohneinheiten von 2000 – 2008.	35
Tabelle 5: Angewandte Energiepreise	37
Tabelle 6: Zusammenfassung von Energie- und Exergiekonsum und Energieträgermix gemäß historischer Daten und Simulationsergebnissen	49
Tabelle 7: Auswahl von Low-Ex-Komponenten nach IEA ECBCS Annex 37 [Ala-Juusela 2003]	63
Tabelle 8: Exergiegehalt ausgewählter Energieträger [Kranzl et al. 2010]	66
Tabelle 9: Exergetische Wirkungsgrade von Wärmepumpen	67
Tabelle 10: Maximal erreichbare Exergieeinsparung durch Luftfeuchtetauscher	68
Tabelle 11: Best-Practice Beispiele für Low-Ex-Systeme aus der Programmlinie Haus der Zukunft	70
Tabelle 12: Best-Practice-Beispiele für LowEx-Systeme aus der Programmlinie Energiesysteme der Zukunft	73
Tabelle 13: Vergleich des exergetischen Wirkungsgrades der Raumwärmeaufbringung	74
Tabelle 14: Vergleich der Exergieeffizienz verschiedener Kraft-Wärme-Kopplungs-Varianten	77
Tabelle 15: Energy costs, consumer prices and technology data for the heating systems considered in Austria	84
Tabelle 16: Energy costs, consumer prices and technology data for the heating systems considered in Finland Exergy content of the energy carriers analyzed in this paper	84
Tabelle 17: Energy costs, consumer prices and technology data for the heating systems considered in the Netherlands	85
Tabelle 18: Energy costs, consumer prices and technology data for the heating systems considered in Sweden.....	85

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Energie- und Exergiefluss beim Beheizen eines Gebäudes. Fall 1: konventionelles Hoch-Temperatur-Heizsystem mit Gasbrennwertkessel	16
Abbildung 2: Energie- und Exergiefluss beim Beheizen eines Gebäudes. Fall 2: Nieder-Temperatur-Heizsystem mit Fernwärme (Abwärmenutzung).....	16
Abbildung 3: Energienutzung und -angebot in Gebäuden: Verschiedene Anwendungen benötigen unterschiedliche Energie-Qualitäten (Exergie-Niveaus). Oben ist der typische Fall dargestellt, in dem das Energieangebot ausschließlich durch hoch-exergetische Quellen erfolgt. Im unteren (low-ex) Fall werden die unterschiedlichen Anwendungen mit jeweils passenden Energieformen (z.B. Solarwärme, Abwärme, Wärmerückgewinnung) bereitgestellt.....	17
Abbildung 4: Energieoutput von Fernwärmekraftwerken, Österreich.....	27
Abbildung 5: Energieinput in Fernwärmekraftwerke, Österreich	27
Abbildung 6: Exergieinput in Fernwärmekraftwerke in Österreich und resultierende exergetische Effizienz der Fernwärme	28
Abbildung 7: Exergieinput pro Wärmeoutput in Fernwärmekraftwerken, Österreich.....	29
Abbildung 8: Entwicklung der Bruttogeschoßflächen von 2000 – 2050	36
Abbildung 9: <i>Energieträgermix für Raumwärme und Warmwasser in Österreich, „Frozen Technology“ Referenzszenario</i>	40
Abbildung 10: <i>Energieträgermix für Raumwärme und Warmwasser in Österreich, „Business as usual“ Szenario</i>	41
Abbildung 11: <i>Energieträgermix für Raumwärme und Warmwasser in Österreich, Szenario basierend auf erneuerbarer Wärme</i>	42
Abbildung 12: <i>Exergiekonsum für Raumwärme und Warmwasser in Österreich (Heizgradtage berichtigt), „Frozen Technology“ Referenzszenario</i>	44
Abbildung 13: <i>Exergiekonsum für Raumwärme und Warmwasser in Österreich (Heizgradtage berichtigt), „Business as usual“ Szenario</i>	45
Abbildung 14: <i>Exergiekonsum für Raumwärme und Warmwasser in Österreich (Heizgradtage berichtigt), Szenario basierend auf erneuerbarer Wärme</i>	46
Abbildung 15: <i>Vergleich der exergetischen Effizienz im Raumwärme und Warmwassersektor in Österreich von 1970-2050 in den drei untersuchten Szenarien</i>	47
Abbildung 16: <i>Gegenüberstellung von exergetischer Effizienz im Sektor Raumwärme und Warmwasser von 1970-2050 in den drei untersuchten Szenarien, Österreich</i>	48
Abbildung 17: <i>Brennstoffkosten (ohne Energiesteuern) und Exergiefaktoren für verschiedene Heizsysteme</i>	58
Abbildung 18: <i>Brennstoffkosten (mit Energiesteuern) und Exergiefaktoren für verschiedene Heizsysteme</i>	58
Abbildung 19: <i>Anteil der variablen Energiekosten auf die gesamte Wärmeenergieerzeugung für alle Technologien und Fallstudien</i>	59
Abbildung 20: <i>Exergieeffizienz für eine konventionelle Kältemaschine und Solare Kühlung mit verschiedenen Zulufttemperaturen und Anteile der Solarenergie [Torio et al. 2009]</i>	69

11 Literaturnachweis

- Al-Ghandour, A., Phelan, P.E., Villalobos, R., Jaber, J.O., 2010. Energy and exergy utilizations of the U.S. manufacturing sector. *Energy* 35, 3048-3065.
- Ala-Juusela, M., 2005. Heating and Cooling with Focus on Increased Energy Efficiency and Improved Comfort. Guidebook to IEA ECBCS Annex 37 Low Exergy Systems for Heating and Cooling of Buildings.
- Ala-Juusela, M., Rautakivi, A., 2003. Annex 37: Low Exergy Systems for Heating and Cooling of Buildings. Heating and Cooling with Focus on Increased Energy Efficiency and Improved Comfort Guidebook to IEA ECBCS Annex 37 Low Exergy Systems for Heating and Cooling of Buildings.
- Ayres, R.U., 2004. Thermodynamics and Economics, Overview, in: *Encyclopedia of Energy*. Elsevier, New York, pp. 91-97.
- Ayres, R.U., Ayres, L.W., Martins, K., 1998. Exergy, waste accounting, and life-cycle analysis. *Energy* 23, 355-363.
- Ayres, R.U., Ayres, L.W., Warr, B., 2003. Exergy, power and work in the US economy, 1900-1998. *Energy* 28, 219-273.
- Bejan, A., 1988. *Advanced Engineering Thermodynamics*. A Wiley - Interscience Publication, John Wiley & Sons.
- Biermayr, P., Weiss, W., Ehrig, R., Strasser, C., Wörgetter, M., Prügler, N., Fechner, H., Nurschinger, M., Eberl, M., 2010. Innovative Energietechnologien in Österreich. Marktentwicklung 2009. Biomasse, Photovoltaik, Solarthermie und Wärmepumpen (No. 15/2010), *Berichte aus Energie- und Umweltforschung*. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien.
- Born, R., Diefenbach, N., Loga, T., 2003. Energieeinsparung durch Verbesserung des Wärmeschutzes und Modernisierung der Heizungsanlage für 31 Musterhäuser der Gebäudetypologie. Studie im Auftrag des Impulsprogramms Hessen. Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt.
- Bucar et al. 2006. Einbindung von dezentraler energie aus erneuerbaren energieträgern in bestehende fernwärmenetze.
- Braun, F., 2009. Preferences for heating technologies: a discrete choice analysis for german households, in: *Energy, Policies and Technologies for Sustainable Economies*. Presented at the 10th IAEE European Conference, Vienna.
- Capros, P., 2007. Primes - Baseline Scenario for EU-27.
- Capros, P., 2008. PRIMES scenario on meeting both EU targets by 2020 – i.e. on climate change (20% GHG reduction) and renewable energies (20% RES by 2020). National Technical University of Athens.
- CBS, 2009. *Statistics Netherlands*.
- Chen, B., Chen, G.Q., 2007a. Resource analysis of the Chinese society 1980-2002 based on exergy--Part 3: Agricultural products. *Energy Policy* 35, 2065-2078.
- Chen, G.Q., Chen, B., 2007b. Resource analysis of the Chinese society 1980-2002 based on exergy--Part 1: Fossil fuels and energy minerals. *Energy Policy* 35, 2038-2050.

- Chen, G.Q., Chen, B., 2009. Extended-exergy analysis of the Chinese society. *Energy* 34, 1127-1144.
- Dalton, M., O'Neill, B.C., Zigová, K., 2010. Energy consumption preferences and changes in household structure. The case of united states, in: *Energy, Policies and Technologies for Sustainable Economies*. Presented at the 10th IAEE European Conference, Vienna.
- Deng, J., Wang, R., Wu, J., Han, G., Wu, D., Li, S., 2008. Exergy cost analysis of a micro-trigeneration system based on the structural theory of thermoeconomics. *Energy* 33, 1417-1426.
- Dewulf, J., Van Langenhove, H., Muys, B., Bruers, S., Bakshi, B.R., Grubb, G.F., Paulus, D.M., Sciubba, E., 2008. Exergy: Its Potential and Limitations in Environmental Science and Technology. *Environ. Sci. Technol.* 42, 2221-2232.
- Diefenbach, N., Loga, T., Born, R., Großklos, M., Herbert, C., 2002. Energetische Kenngrößen für Heizungsanlagen im Bestand. Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt.
- Dincer, I., Hussain, M.M., Al-Zaharnah, I., 2004. Energy and exergy use in public and private sector of Saudi Arabia. *Energy Policy* 32, 1615-1624.
- Dincer, I., 2002. The role of exergy in energy policy making. *Energy Policy* 30, 137-149.
- Dovjak, M., Shukuya, M., Olesen, B.W., Krainer, A., 2010. Analysis on exergy consumption patterns for space heating in Slovenian buildings. *Energy Policy* 38, 2998-3007.
- Dubbel H. 2007. *Dubbel. taschenbuch für den maschinenbau* 22. ed. Springer, Berlin.
- Ediger, V.S., Camdall, Ü., 2007. Energy and exergy efficiencies in Turkish transportation sector, 1988-2004. *Energy Policy* 35, 1238-1244.
- Energiekamer, 2005. *Besluiten transporttarieven gas en elektriciteit*.
- Entrop, A., Brouwers, H., Reinders, A., 2010. Evaluation of energy performance indicators and financial aspects of energy saving techniques in residential real estate. *Energy and Buildings* 42, 618-629.
- Faninger G. 2007. *Der wärmepumpenmarkt in Österreich 2006*. Berichte aus energie-und umweltforschung 11c/2007.
- Finnish Energy Industries, 2006. *Energiavuosi 2005 Kaukolämpö*,
- Gaggioli, R.A., Wepfer, W.J., 1980. Exergy economics: I. Cost accounting applications. *Energy* 5, 823-837.
- Giraudet, L.-G., Guivarch, C., Quirion, P., 2009. A model of the french residential demand for heating energy to evaluate the prospective impact of policy instruments, in: *Energy, Policies and Technologies for Sustainable Economies*. Presented at the 10th IAEE European Conference, Vienna.
- Goto, H., Ariu, T., 2009. An analysis of residential customer's preferences for household energy systems, in: *Energy, Policies and Technologies for Sustainable Economies*. Presented at the 10th IAEE European Conference, Vienna.
- Haas, R., Auer, H., Biermayr, P., 1998. The impact of consumer behavior on residential energy demand for space heating. *Energy and Buildings* 27, 195-205.

- Haas, R., Müller, A., Kranzl, L., 2009. Energieszenarien bis 2020: Wärmebedarf der Kleinverbraucher. Ein Projekt im Rahmen der Erstellung von energiewirtschaftlichen Input-parametern und Szenarien zur Erfüllung der Berichtspflichten des Monitoring Mechanisms. Im Auftrag der Umweltbundesamt GmbH. Wien.
- Hanika, A., Bauer, E., Fassmann, H., Lehart, G., Marik, S., Münz, R., 2005. ÖROK-Prognosen 2001 - 2031 / Teil 2:Haushalte und Wohnungsbedarf nach Regionen und Bez.Österreichs (No. 166/II), ÖROK-Schriftenreihe. Wien.
- Hansen, P., 2009. Entwicklung eines energetischen Sanierungsmodells für den europäischen Wohngebäudesektor unter dem Aspekt der Erstellung von Szenarien für Energie- und CO₂-Einsparpotenziale bis 2030. Forschungszentrum Zentralbibliothek, Jülich.
- IEA, 2004. 30 years of energy use in IEA countries, 30 years of energy use in IEA countries.
- Jaber, J.O., Al-Ghandoor, A., Sawalha, S.A., 2008. Energy analysis and exergy utilization in the transportation sector of Jordan. *Energy Policy* 36, 2995-3000.
- Jähniq et al. 2006. Entwicklung und optimierung eines parabolrinnenkollektorsystems zur erzeugung von prozesswärme für industrielle produktionsprozesse.
- Jähniq D. 2010. Solarthermische kälteerzeugung mit parabolrinnenkollektorsystem und dampfstrahlkältemaschine. <http://www.fabrikderzukunft.at/results.html/id5030>.
- Koch et al. 2006. Energieautarker bezirk güssing.
- Kogler G. 2008. Sozialer wohnbau, holz-passivhaus am mühlweg, 1210 wien.
- Kondo, K., 2009. Energy and exergy utilization efficiencies in the Japanese residential/commercial sectors. *Energy Policy* 37, 3475-3483.
- Koroneos, C., Spachos, T., Moussiopoulos, N., 2003. Exergy analysis of renewable energy sources. *Renewable Energy* 28, 295-310.
- Kotas, T.J., 1985. *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*. Butterworths: Anchor Brendon Ltd.
- Kranzl, L., Stadler, M., Huber, C., Haas, R., Ragwitz, M., Brakhage, A., Gula, A., Figorski, A., 2006. Deriving efficient policy portfolios promoting sustainable energy systems— Case studies applying Invert simulation tool. *Renewable energy* 31, 2393–2410.
- Kranzl, L., Brakhage, A., Gürtler, P., Pett, J., Ragwitz, M., Stadler, M., 2007. Integrating policies for renewables and energy efficiency: Comparing results from Germany, Luxembourg and Northern Ireland. Presented at the eceee 2007 summer study, La colle sur Loup, France.
- Kranzl, L., Müller, A., Hummel, M., 2011. Renewable heating: perspectives and the impact of policy instruments. *Energy Policy* (forthcoming).
- Kranzl, L., Müller, A., Hummel, M., Beurskens, L., 2010. Assessment of the effectiveness and economic efficiency of selected support options for Austria. A Working Document prepared as part of the IEE project“Policy development for improving RES-H/C penetration in European Member States (RES-H Policy)”. Vienna.
- Kranzl L, Müller A, Kalt G. 2010. The trade-off between exergy output and capital costs: the example of bioenergy utilization paths.
- Kranzl L, Müller A, Kalt G. 2010. The trade-off between exergy output and capital costs: the

example of bioenergy utilization paths.

- Krottil R, Ragossnig A. 2009. Energiesysteme der zukunft - publikationen.
<http://www.energiesystemederzukunft.at/publikationen/view.html/id769>.
- Lang G, Lang M, Krauß B. 2007. Erstes einfamilien-passivhaus im altbau - umsetzung des passivhausstandards und -komforts in der altbausanierung von einfamilienhäusern am beispiel efh pettenbach. <http://www.hausderzukunft.at/results.html/id3868>
- Loga, T., Großlos, M., Knissel, J., 2003. Der Einfluss des Gebäudestandards und des Nutzerverhaltens auf die Heizkosten - Konsequenzen für die verbrauchsabhängige Abrechnung. Eine Untersuchung im Auftrag der Viterra Energy Services AG, Essen. Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt.
- Lozano, M., Valero, A., 1993. Theory of the exergetic cost. Energy 18, 939-960.
- Motiva, 2007. Pientalon Lämmitysjärjestelmä. Motiva.
- Müller, A., 2010. Hat Heizen Zukunft? Eine langfristige Betrachtung für Österreich. Presented at the Symposium Energieinnovation, Graz.
- Müller, A., Kranzl, L., Haas, R., 2009. Energieszenarien bis 2020: Wärmebedarf der Kleinverbraucher. Projektendbericht im Rahmen der Erstellung von energiewirtschaftlichen Inputparametern und Szenarien zur Erfüllung der Berichtspflichten des Monitoring Mechanisms. Energy Economics Group, Vienna University of Technology, Vienna, Austria.
- Müller, A., Biermayr, P., Kranzl, L., Haas, R., Altenburger, F., Weiss, W., Bergmann, I., Friedl, G., Haslinger, W., Heimrath, R., Ohnmacht, R., 2010. Heizen 2050: Systeme zur Wärmebereitstellung und Raumklimatisierung im österreichischen Gebäudebestand: Technologische Anforderungen bis zum Jahr 2050. Gefördert vom Klima- und Energiefonds.
- Müller, A., Kranzl, L., Tuominen, P., Boelman, E., Molinari, M., Entrop, A., 2010. Exergy based prices for energy carriers in heating systems – what can we learn from them? Energy and Buildings (forthcoming).
- Nast, M., Leprich, U., Ragwitz, M., Bürger, V., Klinski, S., Kranzl, L., Stadler, M., 2006. Eckpunkte für die Entwicklung und Einführung budgetunabhängiger zur Marktdurchdringung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt\{ Endbericht. Im Auftrag des deutschen Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- Oladiran, M.T., Meyer, J.P., 2007. Energy and exergy analyses of energy consumptions in the industrial sector in South Africa. Applied Energy 84, 1056-1067.
- Piskernik Ludwig et al. 2007: „Bewusstseinsbildende Maßnahmen zur Förderung des effizienten Umgangs mit Energie – Ergebnisse einer empirischen Studie“ Beitrag zur 5. Internationalen Energiewirtschaftstagung an der TU-Wien.
- Poredos, A., Kitanovski, A., 2002. Exergy loss as a basis for the price of thermal energy. Energy Conversion and Management 43, 2163-2173.
- Ptasinski, K.J., Koymans, M.N., Verspagen, H.H.G., 2006. Performance of the Dutch Energy Sector based on energy, exergy and Extended Exergy Accounting. Energy 31, 3135-3144.

- Rauhs G, Schneider U, Preisler A. 2009. Sunny energy building: energybase - bürohaus der zukunft. <http://www.hausderzukunft.at/results.html/id4800>.
- Regionalenergie Steiermark, 2010. Kostenübersicht Heizsysteme. (No. 21), Berichte aus dem TFZ. Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, Straubing.
- Reiter, D., Hirschbichler, A., Strebl, M., Reuter, A., Hamacher, T., 2009. Developing a Roadmap for the future energy infrastructure in Salzburg, in: Energy, Policies and Technologies for Sustainable Economies. Presented at the 10th IAEE European Conference, Vienna.
- RES, 2009. Kostenvergleich für Privathaushalte, Stand KW37, 2009.
- Sager Christina, Ala-Juusela Mia: "Low-ex concepts" ECBCS Annex 49 Newsletter No. 2 September 2007.
- Saidur, R., Masjuki, H.H., Jamaluddin, M.Y., 2007. An application of energy and exergy analysis in residential sector of Malaysia. Energy Policy 35, 1050-1063.
- Sandnes, B., 2003. Energy efficient production, storage and distribution of solar energy. PhD Thesis.
- Schmidt, D., Torio, H., 2009. Low Exergy Systems for High Performance Buildings and Community Systems. Annex 49 Midterm Report. Stuttgart.
- Schmidt Dietrich: "Calculation tool for an exergy optimised building design" Version 7.7 IEA ECBCS Annex 49.
- Schriefl, E., 2007. Modellierung der Entwicklung von Treibhausgasemissionen und Energieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser im Österreichischen Wohngebäudebestand unter Annahme verschiedener Optimierungsziele.
- Schweiker, M., Shukuya, M., 2010. Comparative effects of building envelope improvements and occupant behavioural changes on the exergy consumption for heating and cooling. Energy Policy 38, 2976-2986.
- Sciubba, E., 2001. Beyond thermoeconomics? The concept of Extended Exergy Accounting and its application to the analysis and design of thermal systems. Exergy, An International Journal 1, 68-84.
- Sciubba, E., Bastianoni, S., Tiezzi, E., 2008. Exergy and extended exergy accounting of very large complex systems with an application to the province of Siena, Italy. Journal of Environmental Management 86, 372-382.
- Shukuya, M., Hammache, A., 2002. Introduction to the Concept of Exergy - for a better Understanding of Low-Temperature-Heating and High-Temperature-Cooling Systems (No. 2158), VTT Research Notes. Espoo.
- Sonderegger A, Nadler-Kopf B, Bertsch G. 2007. Sanierung ökologischer freihof sulz.
- Spur G, Stöferle T. 1998. Handbuch der fertigungstechnik: 6 bände. Hanser Fachbuch.
- Stadler, M., Kranzl, L., Huber, C., Haas, R., Tsioliaridou, E., 2007. Policy strategies and paths to promote sustainable energy systems—The dynamic Invert simulation tool. Energy policy 35, 597–608.
- Statistik Austria, 2004a. Gebäude- und Wohnungszählung 2001. Wien.

- Statistik Austria, 2004b. Arbeitsstättenzählung 2001. Wien.
- Statistik Austria, 2006. Wohnungen 2005. Wien.
- Statistik Austria, 2009. Energiestatistik: Energiebilanzen Österreich 1970 bis 2008. Statistik Austria.
- Statistics Finland, 2007. Rakennuskanta, Statistical databases.
- Statistics Finland, 2009. Buildings and free-time residences, statistics.
- Statistiska centralbyrån, 2007a. Energi statistik för flerbostadshus 2006 (Energy statistics for multi-dwelling buildings in 2006) (No. EN 16 SM 0702, ISSN 1404-5869). Statistiska centralbyrån.
- Statistiska centralbyrån, 2007b. Energi statistik för småhus 2006 (Energy statistics for one- and two-dwelling buildings 2006) (No. EN 16 SM 0701 , ISSN 1404-5869). Statistiska centralbyrån.
- Statistiska centralbyrån, 2007c. Energi statistik för småhus, flerbostadhus och lokaler 2006 (Energy statistics for dwelling and non-residential premises for 2001-2006) (No. EN 16 SM 0704). Statistiska centralbyrån.
- Streicher, W., Schnitzer, H., Titz, M., Tatzber, F., Heimrath, R., Wetz, I., Hausberger, S., Haas, R., Kalt, G., Damm, A., Steininger, K., Oblasser, S., 2010. Energieautarkie für Österreich 2050. Feasibility Study. Endbericht., Energie der Zukunft.
- Szargut, J., Morris, D.R., 1985. Calculation of the standard chemical exergy of some elements and their compounds, based upon seawater as the datum level substance. Bull Pol Acad Sci Tech 1985, 292-305.
- Szargut, J., Morris, D.R., Stewart, F.R., 1988. Exergy Analysis of Thermal, Chemical and Metallurgical Processes. Hemispheric Publishing Corporation.
- Torío, H., Angelotti, A., Schmidt, D., 2009. Exergy analysis of renewable energy-based climatisation systems for buildings: A critical view. Energy and buildings 41, 248–271.
- Torio, H., Schmidt, D., 2010. Development of system concepts for improving the performance of a waste heat district heating network with exergy analysis. Energy and Buildings 42, 1601-1609.
- Torio H, Angelotti A, Schmidt D. 2009. Exergy analysis of renewable energy-based climatisation systems for buildings: a critical view. Energy and buildings 41:248-271.
- Tragner et al. 2007. Energiesystem - industrieregion.
- Tribus, M., Evans, R.B., 1962. A Contribution to the Theory of Thermoconomics. UCLA, Dpt. of Engineering. Report No. 62–63, Los Angeles, USA.
- Tsatsaronis, G., Moran, M.J., 1997. Exergy-aided cost minimization. Energy Conversion and Management 38, 1535-1542.
- Ukidwe, N.U., Bakshi, B.R., 2007. Industrial and ecological cumulative exergy consumption of the United States via the 1997 input-output benchmark model. Energy 32, 1560-1592.
- Unander, F., 2004. 30 years of energy use in IEA countries. International Energy Agency.
- Utlu, Z., Hepbasli, A., 2005. Analysis of energy and exergy use of the Turkish residential-commercial sector. Building and Environment 40, 641–655.

- Utlu, Z., Hepbasli, A., 2006. Estimating the energy and exergy utilization efficiencies for the residential-commercial sector: an application. *Energy Policy* 34, 1097–1105.
- Utlu, Z., Hepbasli, A., 2007b. Parametrical investigation of the effect of dead (reference) state on energy and exergy utilization efficiencies of residential-commercial sectors: A review and an application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11, 603-634.
- Utlu, Z., Hepbasli, A., 2007a. Assessment of the Turkish utility sector through energy and exergy analyses. *Energy Policy* 35, 5012-5020.
- Valero, A., 2006. Exergy accounting: Capabilities and drawbacks. *Energy* 31, 164-180.
- Valero, A., Serra, L., Uche, J., 2006. Fundamentals of Exergy Cost Accounting and Thermoconomics. Part I: Theory. *J. Energy Resour. Technol.* 128, 1-8.
- Wagner W, Prein A, Mauthner F. 2009b. Energietechnische, baubiologische und nutzerspezifische begleituntersuchung zu innovativen baukonzepten, der im rahmen haus der zukunft umgesetzten projekte.
- Wagner W, Jähnig D, Prein A. 2009a. Lehm - passiv bürohaus tattendorf.
- Wall, G., 1977a. Exergy a useful concept within resource accounting (No. Report No. 77-42). Institute of Theoretical Physics, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
- Wall, G., 1977b. Exergy - a useful concept within resource accounting (No. 77-42). Institute of Theoretical Physics, Göteborg.
- Warr, B.S., Ayres, R.U., 2010. Evidence of causality between the quantity and quality of energy consumption and economic growth. *Energy*.
- Warr, B., Ayres, R., Eisenmenger, N., Krausmann, F., Schandl, H., 2010. Energy use and economic development: A comparative analysis of useful work supply in Austria, Japan, the United Kingdom and the US during 100 years of economic growth. *Ecological Economics* 69, 1904-1917.
- Warr, B., Schandl, H., Ayres, R.U., 2008. Long term trends in resource exergy consumption and useful work supplies in the UK, 1900 to 2000. *Ecological Economics* 68, 126-140.
- Wimmer R, Hohensinner H, Drack M. 2006. S-house - phase errichtung: planen und bauen für die zukunft. <http://www.hausderzukunft.at/results.html/id3133>.
- Wolfert C, Rezac M. 2006. Alpiner stützpunkt - schiestlhaus am hochschwab - phase errichtung. <http://www.hausderzukunft.at/results.html/id2765>.
- Yildiz, A., Güngör, A., 2009. Energy and exergy analyses of space heating in buildings. *Applied Energy* 86, 1939-1948.