

DYNAMISCHE EXERGETISCHE ANALYSE VON GEBÄUDEN ANHAND DER GESAMTSYSTEMSIMULATION IN DER OBJEKT-ORIENTIERTEN PROGRAMMIERSPRACHE MODELICA

Azadeh Badakhshani und Dirk Müller
RWTH Aachen, E.ON Energy Research Center
Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik
Email: abadakhshani@eonerc.rwth-aachen.de

KURZFASSUNG

Exergie bezeichnet den Anteil an der Gesamtenergie eines Systems oder Stoffstroms, der bei einer Überführung in das thermodynamische Gleichgewicht mit der Umgebung Arbeit verrichten kann. In einer exergetischen Analyse wird nicht nur das System selbst, sondern auch seine Umgebung betrachtet. Das bedeutet beispielsweise, dass eine Wärmemenge, die bei einem hohen Temperaturniveau vorliegt, wertvoller ist als die gleiche Wärmemenge bei einem niedrigeren Temperaturniveau. Normalerweise wird, um den Exergiebedarf eines Gebäudes zu bestimmen, eine konstante Referenztemperatur angenommen. Allerdings zeigt dieser Ansatz Abweichungen zu dem tatsächlichen Exergiebedarf des Gebäudes, den man erhält, wenn der zeitliche und örtliche Verlauf der Temperaturen für die Exergieberechnung verwendet wird (Seifert et al, 2009).

In dieser Studie wurden Gebäude mit verschiedenen Übergabesystemen (Radiator und Fußbodenheizung) und verschiedenen Versorgungssystemen (Kessel und Wärmepumpe) simuliert.

Durch die Simulation wurde der Exergiebedarf dynamisch bestimmt. Die exergetischen Verluste in der Wärmeerzeugung, Wärmeverteilung und Wärmeübergabe wurden jeweils miteinander verglichen. Der benötigte Exergieeffizienz, die Exergieverluste und der Exergiebedarf wurden für die Berechnung der Exergiekennzahlen verwendet, um die verschiedenen Systeme exergetisch zu evaluieren.

Die Simulation wurde in der Objekt-orientierten Programmiersprache Modelica durchgeführt. Die für die Simulation benutzten HVAC- und Gebäude-Modelicabibliotheken wurden in unserem Institut entwickelt.

ABSTRACT

In an exergy analysis not only the system itself but also its surroundings are considered. It is common to determine the exergy demand of a building using a constant reference temperature. However, the mean value of outside temperature as a constant reference temperature can lead to wrong exergy demand estimates because of transient effects in buildings with changing room temperatures (Seifert et al., 2009).

In this work a building with a certain exergy demand has been simulated for different cases with different supply and heat delivery systems. Our simulation considers two different supply systems: a normal boiler and a heat pump and two heat delivery systems: a radiator and floor heating. Based on the simulated exergy losses due to transmission and ventilation, the exergy demand of a building can be determined and compared to the transferred exergy of the heat delivery system and installation. The exergy losses in distribution, generation and delivery have been determined and compared with each other. Finally, the exergy demand, and the exergy of generation and distribution have been used to define the characteristic figures of the entire system. This simulation approach can be used as an evaluation measure for exergy efficiency in buildings and their installation. The hydraulic and thermal behaviour of the building is simulated via the object oriented programming language Modelica. The HVAC and building components used in the models were developed in our institute.

EINLEITUNG

Der Begriff „Exergie“ stammt aus dem zweiten thermodynamischen Hauptsatz. Nach dem ersten thermodynamischen Hauptsatz ist Energie eine Erhaltungsgröße, die in verschiedenen Formen vorkommt und von einer Form zu einer anderen konvertierbar ist.

Der zweite thermodynamische Hauptsatz besagt, dass es eine Unsymmetrie bezüglich der Umkehrbarkeit der Energieumwandlungsprozesse gibt (Baehr et al, 2009). Während mechanische Arbeit oder elektrische Energie vollständig in Wärme umgewandelt werden kann, ist die Umwandlung von Wärme in Arbeit jedoch irreversibel. Exergie ist die maximale Arbeit, die erzeugt werden kann, wenn das System ins thermodynamische Gleichgewicht mit der Umgebung kommt.

Exergie bezeichnet die Qualität der Energie. In einer exergetischen Analyse wird die Umgebung berücksichtigt. Von daher ergänzt eine exergetische Analyse die energetische Bewertung von Systemen und stellt die Optimierungsmöglichkeiten dar, die durch eine reine Betrachtung der Energiebilanz im System nicht zu erfassen sind. Der Qualitätscharakter

der Exergie hilft die Energieressourcen effizienter auszunutzen.

Im Bereich der Gebäude- und Anlagentechnik wird das Konzept der Exergie zur Bewertung der Systeme immer mehr benutzt (Dincer, 2002 und Schmidt, D. 2004). In diesem Bereich hat sich seit einigen Jahren der Begriff „LowEx“ für exergieeffiziente Gebäude- und Anlagentechnik etabliert (LowEx.net und LowEx.info).

Für die Bewertung eines Gebäudes und dessen Versorgungssystems werden einerseits der Exergiebedarf und andererseits die Aufwandsexergie der Anlagentechnik betrachtet. Dabei wird jede Komponente in Hinsicht auf die exergetischen Verluste analysiert. In dieser Studie wurde anhand der exergetischen Kennzahlen sowohl eine komponentenbasierte Analyse als auch eine Gesamtsystemanalyse durchgeführt. Das heißt, es wurde die eingesetzte Exergie mit dem Exergiebedarf des Gebäudes verglichen, um das Gesamtsystem zu bewerten.

Die Simulationen wurden in der Objekt-orientierten Programmiersprache Modelica durchgeführt. Für die Erstellung der Modelle wurden zwei von der Modelica Association entwickelte Komponenten-Bibliotheken benutzt: die Modelica Standard Bibliothek und Modelica-Fluid. Die restlichen Komponenten für die Modellierung des Gebäudes und der Anlagentechnik wurden in unserem Institut, Lehrstuhl für Gebäude und Raumklimatetechnik der RWTH Aachen entwickelt.

BERECHNUNG DES EXERGIEBEDARFS

Der Heizwärmebedarf eines Gebäudes ist wie folgt definiert:

$$\dot{Q}_H = (\dot{Q}_T + \dot{Q}_V) - (\dot{Q}_S + \dot{Q}_i) \quad (1)$$

wobei \dot{Q}_H der Heizwärmebedarf ist, \dot{Q}_T und \dot{Q}_V jeweils die Transmission- und Ventilationsverluste sind. \dot{Q}_S ist der solare Wärmegewinn und \dot{Q}_i kennzeichnet die internen Lasten, die durch interne Wärmequellen wie Menschen, Beleuchtung und technische Geräte entstehen.

Der Exergiegehalt eines Wärmestroms kann durch die Multiplikation des Wärmestroms mit dem Carnot-Faktor errechnet werden, wobei der Carnot Faktor mit der Umgebungstemperatur und der Temperatur zu bilden ist, bei der der Wärmestrom die Systemgrenze verlässt (Baehr et al, 2009). Von daher ist der Exergiebedarf eines Gebäudes durch folgende Formel gegeben:

$$E\dot{x}_H = \eta_{Carnot} \cdot \dot{Q}_H = \left(1 - \frac{T_u}{T_R}\right) \cdot \dot{Q}_H \quad (3)$$

T_u ist die Referenztemperatur und T_R steht für die Raumtemperatur.

Die Auswahl der richtigen Referenztemperatur spielt hierbei eine wesentliche Rolle. Abbildung 1 zeigt für die Wetterzone Berlin und Potsdam (Vierte Wetterzone von Deutschlands Testreferenzdaten TRY04) den dynamischen Verlauf der Temperatur, den Jahresmittelwert und den Mittelwert der Temperatur in jedem Monat.

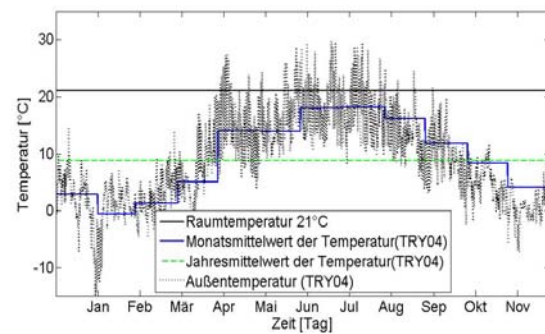


Abbildung 1 Verlauf der Außentemperatur in TRY04

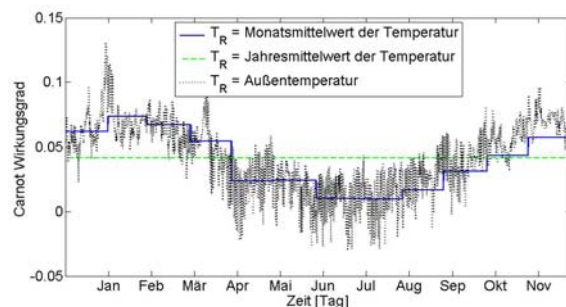


Abbildung 2 Carnot Wirkungsgrad (T_R ist 21°C)

Abbildung 2 stellt den berechneten Carnot-Wirkungsgrad für eine Raumtemperatur von 21°C dar, wobei drei verschiedene Referenztemperaturen benutzt wurden:

- die Außentemperatur
- der Mittelwert der Außentemperatur im Jahr
- der Mittelwert der Außentemperatur in jedem Monat.

Je nachdem wie groß die Abweichung zwischen Raum- und Referenztemperatur ist, ist der Carnot Faktor entsprechend größer oder kleiner. Die Wahl der Referenztemperatur ist daher von großer Bedeutung und beeinflusst den berechneten Exergiebedarf.

Abbildung 3 zeigt die Simulationsergebnisse für den Exergiebedarf eines Gebäudes in einer Heizperiode. Es handelt sich um die Simulation eines gut gedämmten Gebäudes (ca. 80 m² Grundfläche). Die Außenwände haben eine Dämmschicht aus Polystyrolschaum (XPS) mit einer Dicke von 0,14 m

und einer Wärmeleitfähigkeit von 0,03 W/mK. Die Fenster haben eine 2-fache Verglasung. Der U-Wert des Fensterrahmens ist 0,157 W/m²K und die Fensterscheiben haben einen U-Wert von 0,8 W/m²K.

Für die Berechnung des Energiebedarfs wurde das Modell eines idealen Wärmeübertragers benutzt. Der Wärmefluss über den Wärmeübertrager wird so eingestellt, dass die Raumtemperatur auf einer konstanten Temperatur von 21°C gehalten wird.

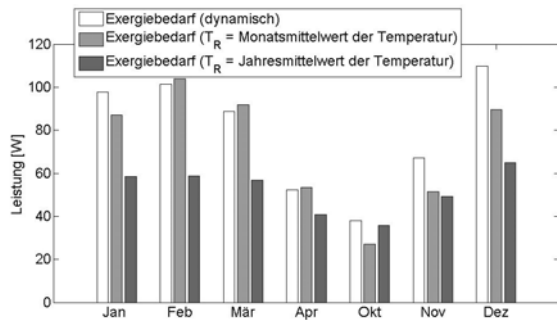


Abbildung 3 Exergiebedarf eines Gebäudes

In Abbildung 3 wird die Abhängigkeit des Exergiebedarfs von der Referenztemperatur deutlich. Bei der Verwendung der Jahresmittelwerttemperatur als Referenztemperatur (schwarzer Balken in der Abbildung) bleibt der Exergiebedarf für die Monate Dezember bis März fast konstant. Dies läßt die Schwächen des Ansatzes erkennen. Die Abbildung zeigt ebenfalls, dass die beiden alternativen Ansätze (Monatsmittelwert bzw. dynamische Außentemperatur) zu ähnlicheren Werten führen. Allerdings ist die Differenz der berechneten Werte auch für diese beiden Ansätze im Dezember relativ groß.

In den folgenden Simulationen und Überlegungen wird als Referenztemperatur die dynamische Außentemperatur benutzt.

EXERGETISCHE KENNZAHLEN

Die folgende Relation beschreibt die exergetische Bilanz für eine dynamische Berechnung (Seifert et al, 2009).

$$\dot{E} = \dot{E}_{\text{Bedarf}} + \dot{E}_{V,\text{Verteilung}} + \dot{E}_{V,\text{Übergabe}} + \dot{E}_{V,\text{Erzeugung}} \quad (5)$$

Hierbei entsprechen die Verteilungsverluste den Wärmeverlusten durch die Rohre und der Hilfsenergie der Pumpen. Übergabeverluste bezeichnen die Differenz zwischen der Übergabeexergie der Wärmeübergabesysteme und dem Exergiebedarf des Gebäudes. Exergetische Verluste der Erzeugung stellen die Exergievernichtigungen (Irreversibilitäten bei den

Verbrennungsprozessen) und die Exergieverluste während der Wärmeerzeugung dar.

Somit sind die exergetischen Aufwandszahlen definiert (Seifert et al, 2009) als:

$$\kappa_{\text{Wärmetransport}} = \frac{\dot{E}_{V,\text{Verteilung}} + \dot{E}_{V,\text{Übergabe}}}{\dot{E}_{\text{Bedarf}}} \quad (6)$$

$$\kappa_{\text{Erzeugung}} = \frac{\dot{E}_{V,\text{Erzeugung}}}{\dot{E}_{\text{Bedarf}}} \quad (7)$$

Eine Aufwandzahl wurde definiert um eine Gesamtsystembewertung zu ermöglichen. Dabei wird die insgesamt eingesetzte Exergie, die Summe von Hilfsexergie und Erzeugungsexergie, mit dem Bedarf verglichen:

$$\kappa_{\text{gesamt}} = \frac{\dot{E}_{\text{eingesetzt}}}{\dot{E}_{\text{Bedarf}}} \quad (8)$$

Im Folgenden werden auf Basis dieser Kennzahlen eine dynamische exergetische Analyse vorgestellt. Beispielhaft wurden Gebäude und Versorgungssysteme in Modelica abgebildet und simuliert. Die Simulationen wurden für den Monat Januar durchgeführt. In den Modellen wurden die Wetterdaten von TRY04 eingesetzt.

Die bauphysikalischen Eigenschaften der simulierten Gebäude sind identisch mit dem Gebäude, das im letzten Abschnitt vorgestellt wurde.

Beispiel 1: Vergleich der Übergabesysteme

In dem ersten Beispiel werden zwei identische Gebäude mit identischem Versorgungssystem miteinander verglichen. Der einzige Unterschied besteht darin, dass ein Gebäude als Wärmeübertrager einen Radiator besitzt und das zweite Gebäude stattdessen mit einer Fußbodenheizung (FBH) ausgestattet ist. Als Versorgungssystem wurde das Modell eines Brennwertkessels eingesetzt. Ein Thermostatventil sorgt für die Temperaturregelung in dem Gebäude. Für die Wärmeverteilung wurde ein Modell einer Pumpe benutzt, die nach drei verschiedenen Regelungsstrategien funktionieren kann: konstanter Druckabfall, konstante Drehzahl oder konstanter Volumenstrom.

Die Simulationsergebnisse sind in Abbildung 4 dargestellt. Die eingesetzte Exergie für die Versorgung ist die Exergie des Brennstoffes. Abbildung 5 vergleicht den Exergiebedarf des Gebäudes mit der Übergabeexergie der einzelnen Wärmeüberträger. Wie in der Abbildung zu sehen ist, ist im Falle des Radiators die Übergabeexergie mehr als dreimal so hoch wie der Exergiebedarf. Im Gegensatz dazu ist im Falle einer Fußbodenheizung die Übergabeexergie nur ungefähr zweimal so hoch wie der Exergiebedarf. Damit sind die Exergieverluste im Falle des Radiators wesentlich höher.

Die exergetischen Kennzahlen sind in Tabelle 1 dargestellt. Wie aus der Tabelle ersichtlich ist, sind die oben besprochenen Exergieverluste relativ klein im Verhältnis zu den Erzeugungsverlusten und dem Pumpenbedarf (Verteilungsverluste), der für den hydraulischen Ausgleich in Fußbodenheizungssystemen erforderlich ist.

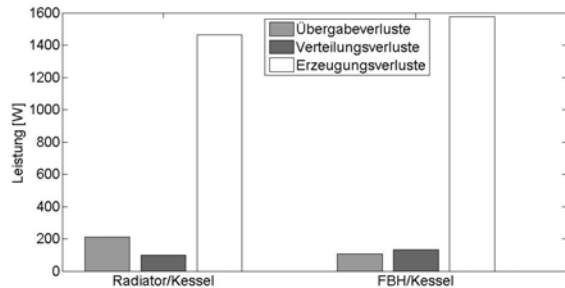


Abbildung 4 Exergetische Verluste

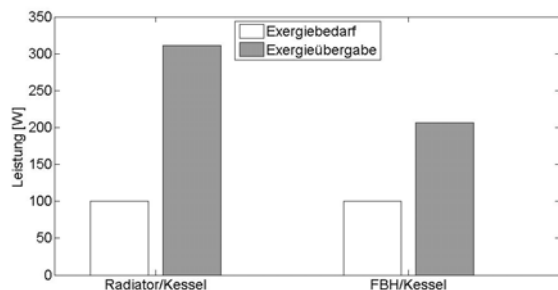


Abbildung 5 Ein Vergleich zwischen Übergabeexergie eines Radiators und einer Fußbodenheizung

Tabelle 1

Berechnete Aufwandszahlen für das erste Beispiel

	Erzeugung	Wärmetransport	Gesamt
Radiator	14	2	17,4
FBH	12,8	1,8	15,4

Beispiel 2: Vergleich der Erzeugungssysteme

In diesem Beispiel werden zwei Erzeugungssysteme exergetisch betrachtet. Ein Gebäude wird mit einem konventionellen Brennwertkessel beheizt und das andere Gebäude besitzt ein erdgekoppeltes Wärmepumpensystem. Die Vorlauftemperatur und der Volumenstrom der Erdsonden wurden konstant angenommen. Beide Gebäude sind mit einer Fußbodenheizung ausgestattet. Die Kapazität der simulierten Wärmepumpe ist so angepasst, dass es für die Beheizung eines Gebäudes mit einer Fläche von ca. 80 m² ausreicht. Die bauphysikalischen Eigenschaften der beiden Gebäude sind identisch. Die Simulation wurde für den Monat Januar durchgeführt. Abbildung 6 zeigt die graphische Darstellung des Modells mit der Erdwärmepumpe.

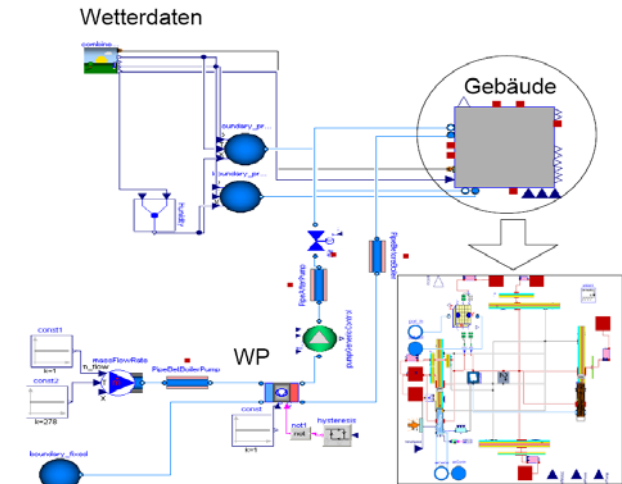


Abbildung 6 Graphische Darstellung des Wärmepumpensystems in Modelica/Dymola

Die Simulationsergebnisse sind in Abbildung 7 zusammengefasst. Tabelle 2 zeigt die berechneten exergetischen Kennzahlen. Die relativ hohen Verteilungsverluste in dem System mit Kessel (im Vergleich zum Wärmepumpensystem) kommen dadurch zustande, dass die Vorlauftemperatur im ersten Modell (mit dem Kessel) höher ist. Die Randbedingungen für die Rohre sind in beiden Modellen identisch, so dass höhere Wärmeverluste über die Rohre ergeben. Wie im letzten Abschnitt erwähnt, ist die eingesetzte Exergie für den Brennwertkessel die Exergie des Brennstoffs. Für die Erdwärmepumpe ist die eingesetzte Exergie der Strombedarf des Kompressors.

Wie Abbildung 7 zeigt, sind für das Modell mit Kessel, die Erzeugungsverluste ungefähr dreimal so hoch wie im Modell mit der Wärmepumpe. Allerdings soll erwähnt sein, dass die hydraulischen Verluste der Erdsonde in dieser Analyse nicht berücksichtigt wurden und sich die Ergebnisse für die Wärmepumpe somit besser darstellen.

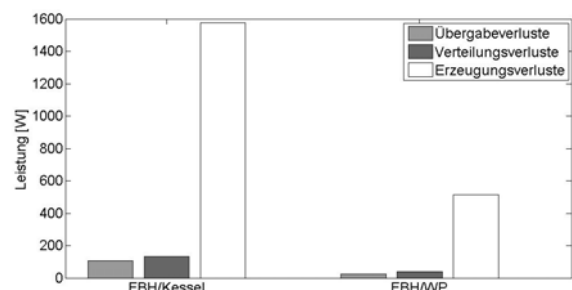


Abbildung 7 Simulationsergebnisse für das zweite Beispiel

Tabelle 2

Berechnete Aufwandzahlen für Wärmepumpen- und Kesselsystem

	Erzeugung	Wärmetransport	Gesamt
WP	3,9	1,3	5,1
Kessel	12,8	1,8	15,4

DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Die Modelle, die in dieser Studie exergetisch betrachtet wurden, sind nicht validiert. Anhand der Ergebnisse der vorliegenden Simulationsstudie ist aber zu erkennen, dass die exergetische Bilanzierung ein thermodynamisch gesichertes Verfahren zur Bewertung und zum Vergleich von Anlagensystemen und Gebäuden darstellt.

Der Exergiebedarf berücksichtigt nicht nur das System, sondern auch seine Umgebung. Dies ist ein Vorteil, weil der Ansatz damit erlaubt, den lokalen Umgebungszustand mit in den Vergleich verschiedener Systeme einzubeziehen. Um aussagekräftige Vergleiche von verschiedenen Systemen möglich zu machen, ist es notwendig, einen global gültigen Ansatz für die Berechnung der Referenztemperatur oder -allgemeiner gesagt-, des Referenzzustandes anzusetzen. Wie bei der Berechnung des Exergiebedarfs ersichtlich, liefern die verschiedenen Ansätze (Tages- oder Monatsdurchschnittstemperatur, etc.) sehr unterschiedliche Exergiebedarfswerte. Daher ist der Vergleich von Werten, die mit verschiedenen Ansätzen berechnet wurden, nicht aussagekräftig.

Die Exergiekennzahlen vergleichen Bedarf mit tatsächlichem Exergieaufwand. Die Exergiekennzahl des Wärmetransports und der Erzeugung liefern eine komponentenbasierte Evaluierung und die dritte Kennzahl, wo die insgesamt eingesetzte Exergie mit Exergiebedarf verglichen wird, dient als Bewertung des Gesamtsystems. Um eine umfassende exergetische Analyse zu machen, müssen alle Kennzahlen berücksichtigt werden.

Es ist zu beachten, dass, in der dargestellten exergetischen Analyse Strom als reine Exergie betrachtet wurde. Um eine umfassende Analyse zu präsentieren, sollten auch die Verluste während der Stromerzeugung betrachtet werden. In Beispiel 2 wurde gezeigt, dass die Exergie der Erzeugung bei der Wärmepumpe relativ gering ist. Wären die Exergieverluste bei der Stromproduktion mit einbezogen worden, dann könnte es sein, dass das System mit dem Brennwertkessel exergetisch bessere Ergebnisse bekommt. Ähnliches gilt für die Hilfsenergie der Pumpen – auch dort muss der Strombedarf genauer exergetisch bewertet werden.

AUSBLICK

In den nächsten Schritten dieses Projektes werden die Modelle validiert. Dabei ist geplant, eine Gesamtsystemsimulation durchzuführen und ein Monitorgebäude und seine Anlagentechnik in Modelica abzubilden.

Die exergetischen Kennzahlen werden weiter bearbeitet. Insbesondere der Exergiebedarf soll noch detaillierter betrachtet werden. In dieser Studie wurde nur der thermische Teil des Bedarfs berücksichtigt, aber um den Komfortzustand eines Gebäudes zu erfassen, soll in der Berechnung der Exergiebedarf für die Feuchte miteinbezogen werden.

DANKSAGUNG

Dieses Projekt wurde durch den Projektträger PtJ im Forschungszentrum Jülich unter dem Förderkennzeichen 0327466A betreut und durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie finanziert, wofür wir uns herzlich bedanken.

LITERATUR

- Baehr, H. D., Kabelac, S., 2009, Thermodynamik, Grundlagen und Technische Anwendungen, 14. Auflage, Springer, Berlin
- Dincer, I., 2002, On thermal energy storage systems and applications in buildings, Energy and Buildings, Vol. 34, p. 377-388
- LowEx.net, Network of International Society for Low Exergy Systems in Buildings, <http://www.lowex.net/>, Aufruf: 05.06.2010
- LowEx.info, Verbundvorhaben LowEx, Heizen und Kühlen mit Niedrig-Exergie <http://www.lowex.info/> Aufruf: 05.06.2010
- Schmidt, D. 2004. Design of Low Exergy Buildings - Method and a Pre-Design Tool. The International Journal of Low Energy and Sustainable Buildings, Vol. 3, p. 1-47
- Seifert, J., Richter, W., Hoh, A., Müller, D. 2009. Dynamische, exergetische Bewertung von Anlagensystemen in der Gebäudeenergie-technik, LowEx Symposium, Kassel Deutschland.