

Hans-Martin Henning
Thorsten Urbaneck u. a.

Kühlen und Klimatisieren mit Wärme



BINE-Fachbuch

Kühlen und Klimatisieren mit Wärme

Hans-Martin Henning

Thorsten Urbaneck

Alexander Morgenstern

Tomas Núñez

Edo Wiemken

Egbert Thümmeler

Ulf Uhlig

LESEPROBE

Herausgeber

 **FIZ Karlsruhe**

Leibniz-Institut für
Informationsinfrastruktur

Fraunhofer IRB  **Verlag**

 **BINE**
Informationsdienst

Der BINE Informationsdienst bietet Kompetenz in neuen Energietechniken. Der intelligente Umgang mit knappen, wertvollen Energiere Ressourcen, insbesondere in Gebäuden und der Gebäudetechnik, sowie die Nutzung erneuerbarer Energien sind die BINE-Kernthemen. Zu diesen Inhalten vereinen wir vielfältiges Know-how aus Forschung, Technik und Anwendung. Eine Übersicht über unser komplettes Produkt- und Dienstleistungsangebot finden Sie unter www.bine.info. Gerne senden wir Ihnen die Informationen auch zu.

BINE Informationsdienst ist ein Service von FIZ Karlsruhe und wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie gefördert.

Für weitere Fragen stehen Ihnen zur Verfügung:

Dr. Franz Meyer

BINE Informationsdienst, FIZ Karlsruhe, Büro Bonn

Kaiserstr. 185-197, 53113 Bonn

Tel. 02 28/9 23 79-0, bine@fiz-karlsruhe.de, www.bine.info

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.
ISBN: 978-3-8167-8324-4

ISBN Printausgabe: 978-3-8167-8324-4 | ISBN-A: 10.978.38167/83244

Herstellung: Dietmar Zimmermann | Umschlaggestaltung: Martin Kjer

Druck: DZA Druckerei zu Altenburg GmbH, Altenburg

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Fraunhofer IRB Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert werden, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, -Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

© by FIZ Karlsruhe, 2009 (Unveränderter Nachdruck 2012)

Verlag und Vertrieb: Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB

Nobelstraße 12 | 70569 Stuttgart | Telefon (0711) 970-25 00

Telefax (0711) 970-25 08 | E-Mail: irb@irb.fraunhofer.de

<http://www.baufachinformation.de>

Hinweis zu den Abbildungen: Soweit nachfolgend keine anderen Quellen genannt werden, stammen die Abbildungen von den Autoren.



Symbolverzeichnis	5
Vorwort	6
1 Warum klimatisieren – warum mit Wärme	7
1.1 Innere und äußere Wärmelasten	7
1.2 Kältebedarf in Deutschland	9
1.3 Verfahren zur Kältebereitstellung und Klimatisierung	9
1.4 Energetischer Vergleich von Kältemaschinen mit mechanischem und thermischen Antrieb	10
1.5 Wärmequellen für thermisch angetriebene Kältemaschinen	13
1.6 Klimatisieren mit Wärme entlastet das Stromnetz	18
2 Technologien zur thermisch angetriebenen Kälteerzeugung und Klimatisierung	20
2.1 Geschlossene Verfahren	23
2.1.1 Generelle Funktionsweise	23
2.1.2 Absorptionskältemaschinen	24
2.1.3 Adsorptionskältemaschinen	33
2.1.4 Aufbau und Funktion von Anlagen	37
2.1.5 Dampfstrahlkälte	41
2.1.6 Rückkühlung	49
2.2 Offene Verfahren	53
2.2.1 Generelle Funktionsweise	55
2.2.2 Verfahren mit Sorptionsrotoren	58
2.2.3 Verfahren mit flüssigen Sorptionsmitteln	64
3 Systeme zur Klimatisierung und Kälteversorgung	67
3.1 Anwendungen im kleinen bis mittleren Leistungsbereich	67
3.1.1 Systemaspekte und Systemkonfigurationen	67
3.1.2 Primärenergetische Betrachtung	75
3.1.3 Systemauslegung und Auslegungsbeispiel	81
3.2 Anwendungen im mittleren bis großen Leistungsbereich	90
3.2.1 Nah- und Fernkälte	90
3.2.2 Systemkonfigurationen	91
3.2.3 Effizienz, Kosten, Wirtschaftlichkeit	107

4	Ausgeführte Anlagen	110
4.1	Nutzung solarer Wärme	110
4.1.1	Weinlagerkühlung in Banyuls, Südfrankreich	115
4.1.2	Sorptionsgestützte Klimatisierung von Seminarräumen der IHK südlicher Oberrhein, Freiburg	116
4.1.3	Solar betriebene Klimaanlage im Solar Info Center SIC in Freiburg	118
4.1.4	Adsorptionskälteanlage im kleinen Leistungsbereich am Fraunhofer Institut für Solar Energiesysteme, Freiburg	120
4.1.5	Solar unterstützte Klimatisierung im Rahmen des Förderprogramms Solarthermie 2000plus	120
4.2	Nutzung der Abwärme von Blockheizkraftwerken	121
4.2.1	Beispiel: DEC-System im Gebäude der AMG Energia S.p.A in Palermo (Italien) – Abwärmenutzung	121
4.2.2	Mikro-KWKK am Beispiel des Fraunhofer ISE (Demonstrationsanlage im Projekt PolySMART®)	122
4.3	Nutzung der Abwärme von Heizkraftwerken	124
4.3.1	Übersicht für Deutschland	124
4.3.2	LiquiSorp-Pilotanlage zur sorptionsgestützten Klimatisierung mit flüssigen Sorbentien in der Medizinischen Klinik Freiburg	126
4.3.3	Fernkälte Gera	126
4.3.4	Fernkälte Chemnitz	127
4.3.5	Nahkälte Klinikum Chemnitz	141
4.3.6	Umweltaspekte, Emissionsminderung durch KWKK am Beispiel der Stadt Chemnitz	144
5	Ausblick	147
5.1	Forschung und Entwicklung	147
5.2	Internationale Situation	149
6	Zitierte Literatur- und Abbildungsverzeichnis	150
6.1	Zitierte Literatur	150
6.2	Abbildungsverzeichnis	152
7	Laufende und abgeschlossene Forschungsvorhaben aus der Energieforschung der Bundesregierung	154
7.1	Laufende und kürzlich abgeschlossene Forschungsvorhaben	154
7.2	Forschungsberichte	155
8	Weiterführende Literatur	156
8.1	Literatur	156
8.2	BINE Informationsdienst	158
9	Autorenangaben	159



Symbolverzeichnis

Lateinische Buchstaben

Zeichen	Bedeutung	Einheit
A	Fläche	m ²
c	spezifische Wärmekapazität	J/(kgK)
m	Masse	kg
\dot{m}	Massenstrom	kg/s
n	Anzahl	–
p	Druck	Pa
\dot{q}	Wärmestromdichte	W/m ²
Q	Wärme	J
\dot{Q}	Wärmestrom	W
t	Zeit	s
T	Temperatur	°C
S	Entropie	J/K
u	spezifische innere Energie	J/kg
U	innere Energie	J
\dot{V}	Volumen	m ³
V	Volumenstrom	m ³ /s

Griechische Buchstaben

Zeichen	Bedeutung	Einheit
α	Wärmeübergangskoeffizient	W/(m ² K)
Δ	Differenz	-
η	dynamische Viskosität	kg/(ms)
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/(mK)
ν	kinematische Viskosität	m ² /s
ρ	Dichte	kg/m ³

Indizes und Abkürzungen

Zeichen	Bedeutung
a	Außen
AbKM	Absorptionskältemaschine
AdKM	Adsorptionskältemaschine
aus	Austritt
BES	Be- und Entladesystem
BHKW	Blockheizkraftwerk
DSK	Dampfstrahlkältemaschine
eff	Effektiv
ein	Eintritt
HKW	Heizkraftwerk
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKK	Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung
m	Mittlere
max	Maximum, maximal
min	Minimum, minimal
Umg	Umgebung
Ver	Verlust

Vorwort

Saubere, frische und angenehm temperierte Luft ist entscheidend für die Behaglichkeit von Räumen. Auch die Feuchte der Raumluft und die Temperatur der umgebenden Raumflächen sind wichtige Parameter für Wohlbefinden und die Leistungsfähigkeit von Menschen. Aufgabe der Klimatechnik ist es, solche Raumbedingungen aufrecht zu erhalten.

Raumlufttechnische Anlagen – gleich welcher Art – erhöhen den Energiebedarf, das Investitionsvolumen und die Betriebskosten eines Gebäudes. Ziel jeder Gebäudeplanung sollte es daher sein, den Kühlungsbedarf zu minimieren. Dennoch ist es in vielen Fällen notwendig, aktive Systeme zur Regelung von Temperatur und Raumluftfeuchte einzusetzen. In Kongresszentren, Theatern, Warenhäusern, Hochhäusern usw. lässt sich ein behagliches Raumklima in der Regel nur mit raumlufttechnischen Anlagen zuverlässig aufrechterhalten.

Bisher werden für die Gebäudeklimatisierung hauptsächlich elektrisch angetriebene Kompressionskältemaschinen eingesetzt. Wenn diese ohne Kältespeicher betrieben werden, belasten sie das Netz oftmals gerade zu Spitzenlastzeiten mit einem hohen Leistungsbedarf.

In den USA und Japan erreichen mit Gas befeuerte Absorptionskältemaschinen große Marktanteile. Diese nutzen im Sommer freie Kapazitäten des Gasnetzes und reduzieren so die Spitzenlasten des Stromnetzes. Mit dem hohen Temperaturniveau der Gasfeuerung sind Kälteleistungen bis zum 1,2-fachen der eingesetzten Wärmeleistung erreichbar.

In den letzten Jahren wächst das Interesse an wärmegetriebenen Kühl- und Entfeuchtungsverfahren, die Wärme auf niedrigem Temperaturniveau wie z. B. Fernwärme, Abwärme und insbesondere auch solare Wärme für die Klimatisierung zu nutzen. Das vorliegende Informationspaket soll einen umfassenden Überblick über die verschiedenen Verfahren geben, die Wärme als Antriebsenergie für die Kälteerzeugung zu nutzen.

1 Warum klimatisieren – warum mit Wärme

1.1 Innere und äußere Wärmelasten

Die Klimatisierung¹ von Räumen und Gebäuden ist eine wesentliche Aufgabe der Klimatisierungstechnik. Grundsätzlich setzen sich Kühllasten aus zwei Anteilen zusammen: den sensiblen Kühllasten, die einen Einfluß auf die Raumtemperatur haben und die latenten Kühllasten, die die Raumluftfeuchte beeinflussen.

Die sensible Kühllast (Abb. 1) setzt sich aus so genannten äußeren und inneren Lasten zusammen. Äußere Lasten sind die solare Einstrahlung (insbesondere bei transparenten Bauteilen), die Wärmeleitung im Wandaufbau und das Eindringen der warmen Außenluft durch die Gebäudehülle ins Gebäude. Sie bilden im wesentlichen die zyklische Kältebelasten im Tag-Nacht-Rhythmus.

Inneren Lasten sind Wärmequellen im Gebäude: z. B. Maschinen, elektrische Geräte, Apparate, künstliche Beleuchtung, Personen und Tiere. Die Wärmeströme in den Raum und die inneren Wärmequellen führen zu einer unerwünschten Erhöhung der Raumtemperatur. Durch den Einsatz von Kühlanlagen (z. B. Klimaanlage mit Luftaustausch, Bauteilkühlung) wird die Raumtemperatur auf dem gewünschten Niveau gehalten.

Latente Lasten sind durch die Freisetzung von Wasserdampf im Raum bedingt. Einerseits wird Wasserdampf durch Personen an die Raumluft abgegeben und andererseits können weitere Feuchtequellen beispielsweise in Küchen oder Pflanzen zu einer Erhöhung der Raumluftfeuchte beitragen. Darüber hinaus ist eine Versorgung von Räumen, die von Personen genutzt werden, mit Frischluft erforderlich. Liegt die Feuchte der Aussenluft oberhalb der gewünschten Raumluftfeuchte (absolute Feuchte), so ist eine Entfeuchtung der zugeführten Frischluft notwendig. Bei Verwendung von mechanischen Lüftungsanlagen wird deshalb die Feuchte der Zuluft entsprechend abgesenkt.

¹Aufgabe der Klimatisierung ist im Wesentlichen die Einhaltung der Raumtemperatur und Raumluftfeuchte. Bei Lüftungsanlagen muss dazu der Zuluftstrom durch die Klimaanlage geheizt oder gekühlt und be- oder entfeuchtet werden. Des Weiteren können auch Anforderungen an die Reinheit der Luft gestellt werden (z. B. Reinraumtechnik). Während die Behandlung der Raumluftfeuchte in der Regel durch Feuchtbehandlung der Zuluft erfolgt, können rein sensible Kühllasten auch durch Kühlflächen (z. B. Kühldecken) abgeführt werden. Ein Trend zur Begrenzung der Raumlufttemperatur ist die thermische Bauteilaktivierung, bei der beispielsweise Betondecken temperiert werden.

An strahlungsreichen Tagen im Sommer steigt die Außentemperatur und demzufolge die Kühllast (Abb. 2). Abb. 2 verdeutlicht weiterhin, dass am Wochenende (11.08. und 12.08.2007) geringere Lasten auftreten, da die Benutzung der klimatisierten Räume (z. B. Büro oder Einkaufsstätten) stark sinkt.

Da die Kühlung nicht nur energetisch aufwendig und kostenintensiv ist, sollte die Kälte- last in jedem Fall reduziert werden. Betrachtet man die äußeren Lasten ist ein sommerlicher Wärmeschutz vorzusehen (z. B. Verschattungseinrichtungen). Hinsichtlich der inneren Lasten ist z. B. der Einsatz von Geräten mit geringem Strombedarf sinnvoll.

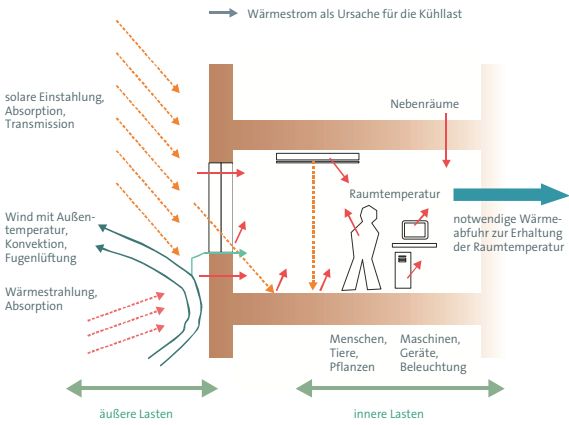


Abb. 1: vereinfachte Darstellung zu den Ursachen der Kühllast bei Gebäuden

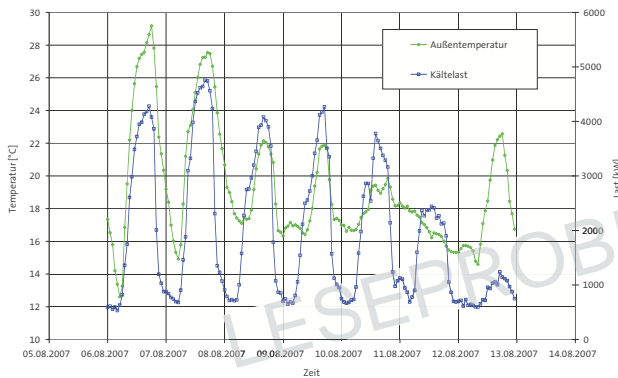


Abb. 2: Außentemperatur und typischer Verlauf der Kälte- last, Messwerte, Fernkältesystem in Chemnitz (vergleiche mit Abb. 8)

1.2 Kältebedarf in Deutschland

Nach *Franzke* [3] werden in der Bundesrepublik Deutschland ca. 79.000 GWh/a für die technische Kälteerzeugung benötigt². Abb. 3 zeigt die Verteilung auf die einzelnen Bereiche. Die Klimatisierung nimmt einen Anteil von ca. 26% der gesamten Kältebereitstellung ein, d. h. ca. 21.000 GWh pro Jahr. Hier ergibt sich ein nennenswertes Potenzial zur Reduktion im Sinne einer umweltfreundlichen Energieversorgung.

Für einen steigenden Bedarf an Kühlenergie im Bereich der Gebäude sind folgende Tendenzen verantwortlich:

- architektonische Gestaltung der Gebäudehülle mit hohen Anteilen transparenter Bauteile, Zunahme der äußeren Lasten,
- Anstieg der inneren Lasten durch technische Ausrüstung, z. B. Personal-Computer,
- zunehmende Komfortansprüche,
- längere Betriebszeiten (z. B. Ladenöffnungszeiten).

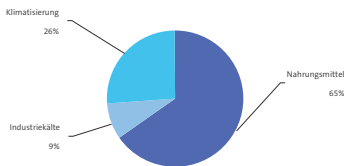


Abb. 3: Verteilung des Nutzkältebedarfs seitens der technischen Bereitstellung in der Bundesrepublik Deutschland

1.3 Verfahren zur Kältebereitstellung und Klimatisierung

Zur Deckung des Kältebedarfs sind Verfahren zur Kältebereitstellung notwendig. Im Bereich der Komfortklimatisierung sind neben Verfahren der Kälteerzeugung auch Verfahren möglich, die eine direkte Konditionierung der Zuluft ermöglichen und ohne Kaltwassererzeuger auskommen. Zunächst soll ein Überblick gegeben werden, um die vielfältigen Möglichkeiten aufzuzeigen:

- Einsatz von Maschinen oder offenen thermodynamischen Verfahren (Nutzung verschiedener physikalischer und chemischer Effekte, siehe unten),
- Nutzung von Umweltwärmesenken (Erdreich, Aussenluft, Wärmestrahlung in den Himmel, Verdunstung von Wasser usw.). Nahezu alle Effekte in diesem Bereich nutzen periodische Vorgänge in der Natur. Hier sind grundsätzlich unterschiedliche Zeitskalen möglich:
 - Nacht, tageszeitlich,
 - Winter und Übergangszeiten, jahreszeitlich,
 - durch das Klima beladene natürliche Speichermassen (z. B. Eis der Polarkappen, Oberflächengewässer, Wasser aus unterirdischen Quellen)

²Detailliertere Angaben sind in [4] zu finden.

Jedoch sind nicht alle Verfahren heute gleichermaßen verbreitet. Die Aktivierung von Umweltwärmequellen wird zunehmend insbesondere in neu errichteten Nicht-Wohngebäuden (z.B. Bürogebäuden) genutzt. Die Luftkühlung im Erdreich gehört hierzu ebenso wie die Verwendung des Erdreichs als Wärmesenke zur Kühlung von thermisch aktivierten Bauteilen. In der Übergangszeit wird vielfach freie Kühlung eingesetzt; dabei wird ein Rückkühlwerk direkt zur Bereitstellung von Kälte ausreichend niedriger Temperatur betrieben. Dennoch stellt die maschinelle Bereitstellung von Kälte zurzeit nach wie vor die wichtigste und am weitesten verbreitete Methode dar, die im Übrigen auch in Kombination mit Verfahren, die Umweltwärmesenken nutzen, eingesetzt werden kann. Folgende Verfahren der maschinellen Kühlung sind bekannt:

- Kaldampf-Maschinen, mechanische Kompression mit folgenden Verdichtern (Kolben-, Schrauben-, Scroll-, Turboverdichtern, siehe Abb. 82, Abb. 83),
- Sorptionsprozesse (Absorption, Adsorption, Abb. 13),
- Dampfstrahl-Prozess (Abb. 13),
- Verdunstungskühlung (z.B. mit offenen Kühltürmen, vgl. mit Abs. 2.1.5),
- Sonderverfahren,
 - Kaltgas-Maschinen (z. B. Stirling-Prozess, Philips-Gaskältemaschine),
 - Apparate zur Verflüssigung von Gasen (z. B. Linde-Verfahren),
 - thermoelektrische Verfahren (z. B. Peltier-Effekt),
 - magnetokalorische Verfahren.

1.4 Energetischer Vergleich von Kältemaschinen mit mechanischem und thermischen Antrieb

Im Gegensatz zu Kältemaschinen mit mechanischem Verdichter (Antrieb z.B. mit Elektromotor) wird bei den Kältemaschinen mit Sorptionsprozessen Wärme zum Antrieb des Linksprozesses genutzt. Die Dampfstrahlkältemaschinen verwenden die Energie des Dampfes zur Verdichtung eines Arbeitsmittels. All diese thermisch angetriebenen Kälteverfahren, bei denen thermische Energie zum Antrieb einer Kältemaschine verwendet wird, sind ein zentrales Thema dieser Veröffentlichung. Deshalb werden diese in den folgenden Abschnitten detailliert erläutert.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen Kompressions- und Sorptionskälteverfahren ist der Exergieanteil (Exergie \rightarrow S. 12) der Antriebsenergie. Bei der Kompressionskälte besitzt die zugeführte Arbeit 100% Exergie. Im Gegensatz dazu ist der Exergieanteil der Antriebswärme im Wesentlichen eine Funktion der Temperatur (Abb. 4).

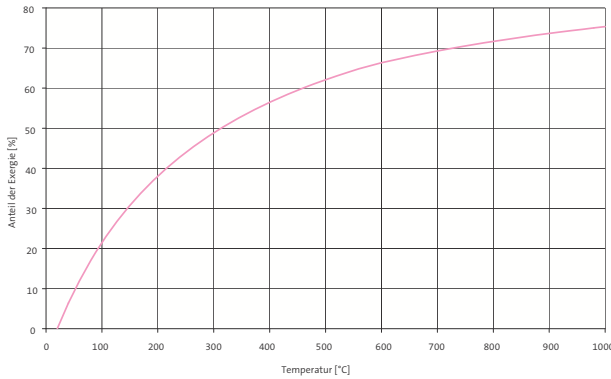


Abb. 4: Anteil der Exergie von Wärme in Abhängigkeit vom Temperaturniveau bei einer Umgebungstemperatur von 20°C

Für die Funktion einer Kältemaschine ist also die zugeführte Exergie entscheidend. Betrachtet man die energetischen Verhältnisse (Abb. 5), wird deutlich, dass bei thermischem Antrieb viel mehr Energie zugeführt werden muss. Die abzuführende Wärme ist deutlich größer als bei einem Prozess mit mechanischem Antrieb, was als nachteilig gegenüber der Kompressionskälte bewertet werden muss. Im Umkehrschluss sind hohe Antriebstemperaturen (hoher Exergieanteil) für thermische Kälteerzeugungsverfahren günstig.

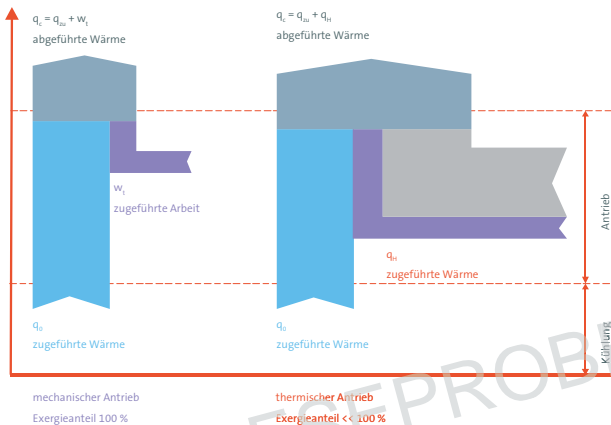


Abb. 5: vereinfachter Vergleich zum Antrieb von Kältemaschinen

Beide Verfahren arbeiten um so effizienter, je geringer der Exergiegehalt der Nutzkälte ist. Dies erreicht man über möglichst hohe Temperaturen auf der Kälteseite (z. B. Vorlauftemperatur des Kältenetzes) und über möglichst niedrige Temperaturen auf der Seite der Rückkühlung, also möglichst niedrige Temperaturen der abgeführten Wärme z. B. im Kühlkreis.

Energie

Energie liegt in verschiedenen Formen (z.B. die potenzielle Energie von Wasser in einem Staubecken bei einem Wasserkraftwerk) vor und wird auch unterschiedlich übertragen (z.B. die Strahlung der Sonne). Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik gibt uns darüber Auskunft, ob Energieübertragungsprozesse „von allein“ ablaufen (z.B. Temperatenausgleich von zwei verschiedenen temperierten Körpern) und über die Richtung der Zustandsänderung (z.B. Abkühlung eines heißen Körpers).

Auf diesen Aussagen basierend interessiert sich der Ingenieur für weitere Fragestellungen. Weil vielen Techniken Energieumwandlungen zugrunde liegen, steht zunächst die Frage der Umwandelbarkeit im Mittelpunkt. Kann man einem Körper durch Wärmezug (Abkühlung auf Umgebungstemperatur) diese Energie zu 100% in Elektroenergie umwandeln? Nein. Umgekehrt ist aber die Erwärmung eines Körpers mittels Elektroenergie ein leicht durchzuführendes Experiment. Die Thermodynamik bietet – neben den Basisgrößen Energie und Entropie – zwei weitere geeignete Größen zur Erklärung dieser Asymmetrie bei der Umwandlung bzw. Übertragung von Energie, die insbesondere bei der Analyse von Prozessen und Systemen vielfach Anwendung finden:

Exergie ist derjenige Anteil der sich in jede beliebig andere Energieform umwandeln lässt. Unter *Anergie* versteht man den komplementären Anteil, der gar nicht umgewandelt werden kann. Im oben eingeführten Beispiel ist Elektroenergie 100% Exergie und die innere Energie eines heißen Körpers besteht aus einem Teil Exergie und einem Teil Anergie. Im Folgenden soll nur die Exergie betrachtet werden. Für ein geschlossenes System kann die Exergie E wie folgt definiert werden (Gleichung 1):

$$E = (H - H_{\text{Umg}}) - T_{\text{Umg}} (S - S_{\text{Umg}}) \quad \text{Gleichung 1}$$

$$H = U + pV \quad \text{Gleichung 2}$$

Dabei ist die Enthalpie H (entsprechend Gleichung 2) selbst über die innere Energie temperatur- und druckabhängig. Der Exergiegehalt definiert sich also im Bezug zu den Vergleichsgrößen der Umgebung.

Betrachtet man die Exergie eines Wärmestroms (Gleichung 3) besitzt nur die Temperatur einen Einfluss.

$$\dot{E}_Q = \frac{T - T_{\text{Umg}}}{T_{\text{Umg}}} \dot{Q} \quad \text{Gleichung 3}$$

Bei dieser Betrachtung wird der Zustand der Umgebung lediglich über die Umgebungstemperatur T_{Umg} mit einbezogen. Der Umgebungszustand wird bei der Analyse wegen der sehr großen Masse als unveränderbar angenommen.

1.5 Wärmequellen für thermisch angetriebene Kältemaschinen

Zum Antrieb von Sorptions- und Dampfstrahlkältemaschinen wird Wärme, wenn möglich mit hoher Temperatur, benötigt. Diese ist oftmals im Sommer im Überschuss vorhanden, genau dann wenn die Kühllasten besonders hoch sind. Im Wesentlichen gibt es zwei Wärmequellen: die Abwärme bei der gekoppelten Erzeugung von Elektroenergie und Wärme, die sog. Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) und die solare Einstrahlung. Bei der Kraft-Wärme-Kopplung können folgende Arbeitsmaschinen eingesetzt werden (Abb. 6):

- Wasserdampf-Turbinen,
- Turbinen für den Organic-Rankine-Cycle (ORC)³,
- Turbinen für den Kalina-Prozess,
- Stirlingmotoren,
- Dampfmotoren,
- Gasmotoren,
- Motoren für flüssige Brennstoffe,
- Standard-Gasturbinen,
- Mikroturbinen und
- Brennstoffzellen.

Heute sind viele KWK-Techniken (siehe oben) mit unterschiedlichen Wirkungsgraden, Leistungsbereichen bzw. Systemgrößen (Klein-BHKW bis Großkraftwerk) verfügbar. Diese Techniken können verschiedenste Brennstoffe (z. B. Erdgas, Biomasse) nutzen und produzieren Abfallwärme auf verschiedenen Temperaturebenen.

Während Energie zur Gebäudeklimatisierung – hier Kühlung – bereitgestellt werden muss, ist zugleich ein Wärmeüberschuss bei der Elektroenergieerzeugung mit Kraft-Wärme-Kopplung vorhanden. Die Nutzung dieser Wärme zur Kühlung ist insofern nahe liegend.

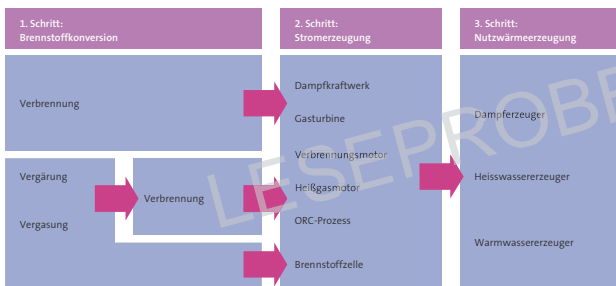


Abb. 6: Prozessschritte bei der KWK

³Hier werden ebenfalls Dampfturbinen eingesetzt. Das Arbeitsmittel ist aber nicht Wasser, sondern ein organischer Stoff oder Gemische aus organischen Stoffen.

Für die solarthermische Wärmegegewinnung sind die Strahlungsverhältnisse⁴ an der Erdoberfläche ausschlaggebend. Die Globalstrahlung liegt im Langzeitmittel für Deutschland zwischen 940 und 1220 kWh pro Quadratmeter und Jahr (vergleiche mit Abb. 7). Diese jährliche Globalstrahlung besteht zu ca. 50% aus direkter und ca. 50% aus diffuser Einstrahlung. Hierfür ist vor allem die Bewölkung verantwortlich. Je nach der Definition des Sommer- und Winterhalbjahres beträgt die sommerliche Einstrahlung 2/3 bis 4/5 der gesamten jährlichen Globalstrahlung (Abb. 7).

Bei wolkenlosem Himmel sind Leistungsdichten von bis rund 1000 W/m² an der Erdoberfläche möglich. Aufgrund der Sonnenposition bestehen jedoch starke Abhängigkeiten von Tages- und Jahreszeit.

Trotz des zeitlich schwankenden Energieangebotes ist die solarthermische Energiegewinnung zur Kühlung eine gute Alternative, da zunächst ein ausreichend hohes Energieangebot mit hohen Leistungsdichten vorhanden ist. Besonders förderlich wirkt sich weiterhin die Korrelation zwischen solarer Einstrahlung (eine wesentliche Ursache der Kühllast) und der Kältelast in Versorgungssystemen aus (Abb. 8). Die Spitzenlast ist in der Regel nur um wenige Stunden verzögert zur maximalen Einstrahlung. Mittels Kurzzeitspeicher kann die Lastverschiebung ausgeglichen werden.

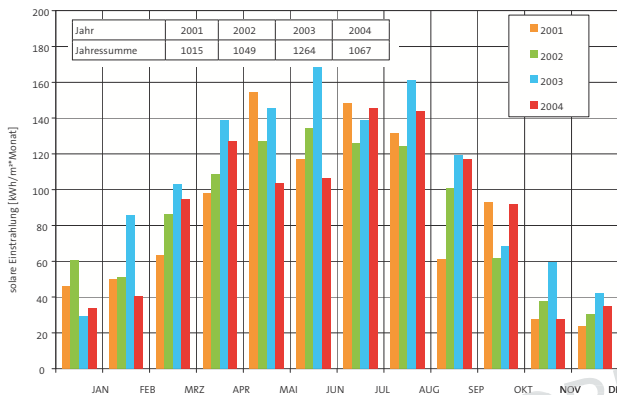


Abb. 7: Gemessene solare Einstrahlung in Absorber-ebene (35° Neigung, fast ideale Südausrichtung), Monatsbilanzen, Chemnitz, solarisPark

⁴ Unterschieden wird zwischen direkter und diffuser Strahlung. Direkte Solarstrahlung erzeugt einen Schattenwurf, diffuse Strahlung nicht. Betrachtet man beide Strahlungsarten zusammen, ist der Begriff Globalstrahlung gebräuchlich.

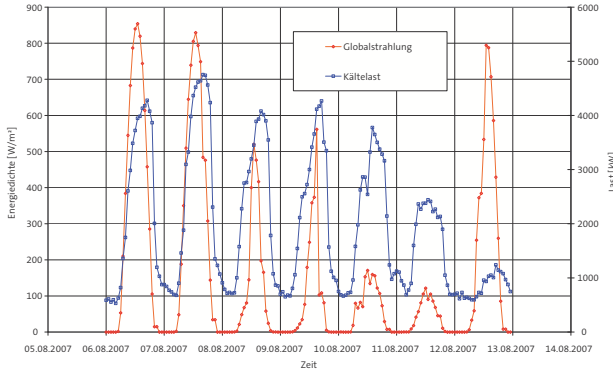


Abb. 8: Globalstrahlung in horizontaler Ebene und typischer Verlauf der Kältelast, Messwerte, Fernkältesystem in Chemnitz

Blockheizkraftwerk als Wärmequelle

Wie bereits oben benannt, gibt es grundsätzlich eine Vielzahl von physikalisch-technischen Prozessen, die eine gekoppelte Bereitstellung von Kraft und Wärme erlauben. Heute sind gasmotorische BHKW am weitesten verbreitet und in einer großen Leistungsklasse verfügbar. Für den Leistungsbereich ab ca. 100 kW kommen auch Mikroturbinen in Frage. Stirling-Anlagen, die sich grundsätzlich wegen des äußeren Verbrennungsprozesses auch für den Betrieb mit Biomasse eignen, befinden sich noch in der Entwicklung und einzelne Geräte in einer ersten Phase der Markteinführung. Diese Anlagen sind insbesondere für kleine Leistungen konzipiert. Brennstoffzellen-BHKW, die sich auf Basis unterschiedlicher Technologien in der Entwicklung befinden, versprechen eine hohe elektrische Effizienz; allerdings sind heute noch keine Geräte im kleinen Leistungsbereich für die Breitenanwendung verfügbar. Eine grobe Übersicht über die wichtigsten Techniken zur Kraft-Wärme-Kopplung in Blockheizkraftwerken gibt Abb. 9.

Technologie	Dampf-turbine	Verbrennungsmaschine		Mikroturbine	Stirling	Brennstoffzelle
		Diesel	Otto			
Brennstoffe	alle	Erdgas, Propan, Diesel, Biogas	Erdgas, Biogas, flüssige Brennstoffe, Propan	Gas, Propan, flüssige Brennstoffe, Biogas	alle	Wasserstoff bzw. verschiedene Kohlenwasserstoffe in Verbindung mit Reformier
Leistungsbereich	50kW–500 MW	5 kW–20 MW	3 kW–6 MW	15 kW–300 kW	1 kW–1,5 MW	5 kW–2 MW
Wirkungsgrad, elektrisch	7–20%	35–45%	25–43%	15–30%	10–40%	30–60%
Wirkungsgrad, gesamt	60–80%	65–90%	70–92%	60–85%	65–85%	85–90%
Teillastverhalten	schlecht	gut	gut	mittel	gut	gut
Standzeit, Jahre	25–35	20	20	10	10	10–20
ungefähre Investitionskosten € / kW _{el}	1.000–2.000	340–1.000	800–1.600	900–1.500	1.300–2.000	2.500–3.500

Abb. 9: Übersicht über BHKW-Bauarten und ihre wesentlichen technischen Merkmale; es wurden nur Technologien berücksichtigt, bei denen auch Geräte im kleinen bis mittleren Leistungsbereich vorliegen.

In Abb. 10 ist beispielhaft der Zusammenhang zwischen dem elektrischen Wirkungsgrad und der elektrischen Nennleistung von marktverfügbaren Erdgas-betriebenen BHKW angegeben [5]. Eine weitere Übersicht zum Stand und der Verfügbarkeit von KWK-Anlagen enthält [6] und eine Übersicht speziell zu Anlagen im kleinen Leistungsbereich für Anwendungen in Wohnhäusern und Kleingewerbe [7].

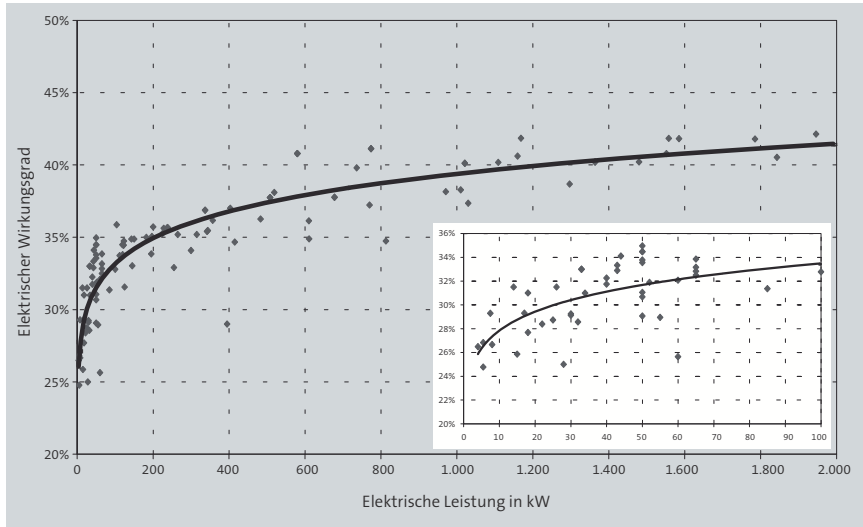


Abb. 10: Zusammenhang zwischen dem elektrischen Wirkungsgrad und der elektrischen Nennleistung von marktverfügbaren Erdgas-betriebenen BHKW mit entsprechender Ausgleichskurve

Systeme mit thermisch angetriebener Kühlung / Klimatisierung in Verbindung mit solarthermischen Anlagen

Die wesentliche zusätzliche Komponente bei solar angetriebenen Kühlanlagen ist die Kollektoranlage bestehend aus dem Kollektorfeld, der Verrohrung, der Pumpengruppe, der Regelung und der Wärmeübergabe an den Speicher bzw. den Heizverteiler. Deshalb soll zunächst ein kurzer Überblick über Solarkollektoren gegeben werden, ohne auf sämtliche Details der Solarthermie einzugehen; hierzu gibt es umfassende Literatur (siehe [8]).

Solarkollektoren

Für die Realisierung einer solarthermischen Klimatisierung existiert ein breites Angebot unterschiedlicher Kollektortypen. Im Folgenden werden einige der am häufigsten verwendeten Typen aufgeführt; Abb. 11 zeigt exemplarisch die grundsätzliche Eignung der verschiedenen Kollektortypen im Zusammenhang mit verschiedenen Verfahren der solaren Klimatisierung. In Abb. 11 sind die Wirkungsgradkennlinien unterschied-

licher Kollektortypen schematisch dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass die Kennlinien von Kollektoren verschiedener Hersteller bereits innerhalb eines Kollektortyps sehr unterschiedlich ausfallen; ebenso sind die Arbeitsbereiche der dargestellten klimatechnischen Verfahren nicht starr und in Abb. 11 schematisch zu verstehen. Die sorgfältige Auswahl des Kollektors in der Planungsphase ist von grundlegender Bedeutung für die Erreichung der primärenergetischen Einsparziele.

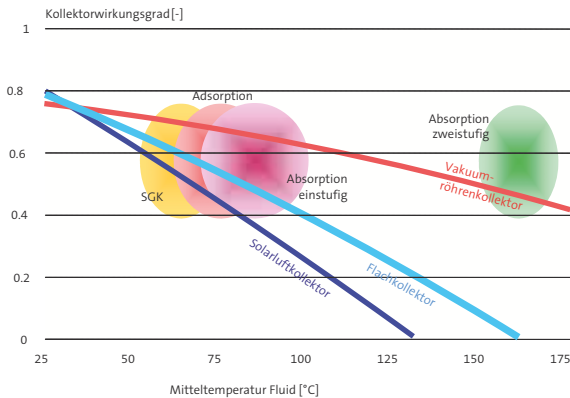


Abb. 11: Typischer Verlauf von Wirkungsgradkurven für drei unterschiedliche stationäre Kollektortypen. Die Kurven sind für eine Einstrahlung von 800 W/m^2 und für 25°C Umgebungstemperatur dargestellt. Innerhalb eines Kollektortyps ist der Verlauf der Kurve stark herstellerabhängig. Die Grafik enthält andeutungsweise den Arbeitsbereich verschiedener klimatechnischer Verfahren. SGK = offene sorptionsgestützte Klimatisierung.

Solarluftkollektoren: Diese Kollektoren werden direkt von Luft durchströmt, sie gewährleisten damit ohne weitere Maßnahmen einen frostsicheren Betrieb. Sie können in Verfahren der solaren Klimatisierung eingesetzt werden, die mit niedrigen Antriebstemperaturen arbeiten, so etwa in der offenen sorptionsgestützten Klimatisierung. Der Verzicht auf eine Zwischenspeicherung solarer Wärme ist bei dieser Technologie sinnvoll, daher können die Kollektoren insbesondere dort eingesetzt werden, wo eine ausschließlich solarthermische Deckung der Antriebswärme des Klimatisierungsprozesses möglich ist.

Flachkollektoren: Kollektoren mit flüssigem Wärmeträger (Wasser oder Wasser-Glykol). Für die solare Klimatisierung sind im Allgemeinen nur hochwertige Kollektoren mit selektiver Beschichtung der Absorber von Interesse, die oftmals weitere Merkmale zur Verringerung von Wärmeverlusten aufweisen (stärkere Isolierung, zusätzliche Teflon-Folie oder Doppelverglasung mit Antireflexbeschichtung [9]), und daher akzeptable Nutzungsgrade im Temperaturbereich von thermisch angetriebenen einstufigen Kältemaschinen erwarten lassen. Eine besondere Bauform sind konstruktiv als Flachkollektoren ausgeführte CPCs (CPC = compound parabolic collector) [9], die eine besondere Spiegelform zur schwachen Strahlungs-Konzentration unterhalb des Absorbers enthalten. Auch diese Kollektoren sind für den stationären Einsatz vorgesehen.

Vakuumröhrenkollektoren: Hier existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Modelle, die sich stark im konstruktiven Aufbau und im Prinzip der Wärmeabfuhr (direkt durchströmt oder heat-pipe-Prinzip) unterscheiden. Im Allgemeinen erlauben sie gute Kollektornutzungsgrade bei einstufigen Absorptionskältemaschinen; sehr hoch-effiziente Typen sind unter Umständen auch noch in Kombination mit zweistufigen Kältemaschinen einsetzbar. Bei der Anwendung dieser Kollektoren muss in der Planung in besonderem Maße auf die Stillstandssicherheit des Kollektorfeldes geachtet werden.

Nachgeführte konzentrierende Kollektoren [9]: In sonnenreichen Gebieten (typischerweise ab ca. 1800 kWh pro m² und Jahr) werden beispielsweise einachsig nachgeführte Parabolrinnenkollektoren angewendet, um Prozesswärme von 400 °C und darüber für die Stromerzeugung bereitzustellen. Anwendungen im niedrigeren Temperaturbereich zum Antrieb zweistufiger Absorptionskältemaschinen sind ebenfalls möglich und bereits zur Ausführung gelangt. Wegen des erforderlichen hohen Anteils an Direktstrahlung der Globalstrahlung sind diese Systeme für mitteleuropäische Anwendungen weniger geeignet. Für die solare Klimatisierung sind insbesondere konzentrierende Systeme mit niedrigeren spezifischen Investitionskosten aussichtsreich, die für Betriebstemperaturen im Bereich bis ca. 200 °C ausgelegt sind. Beispiele sind speziell für Prozesswärme oder Kälteanwendungen ausgelegte Parabolrinnenkollektoren oder Fresnel-Kollektoren.

1.6 Klimatisieren mit Wärme entlastet das Stromnetz

International kann man grob zwischen Ländern mit hohem Bedarf an Klimatisierung bzw. Kühlung und Ländern mit einem dominanten Heizenergiebedarf unterscheiden. Deutschland zählt zu letzteren.

Da in warmen Ländern mit hohem Klimatisierungsstandard (z. B. USA, Japan) vorwiegend Kompressionskältemaschinen eingesetzt werden, entstehen im Sommer⁵ neben hohen Elektroenergieverbräuchen enorme Lastspitzen. Diese hohen Lastspitzen führen zu einer hohen Auslastung der Erzeuger und der Netze. In Extremfällen kann es zu so genannten Blackouts⁶ kommen. Einen wesentlichen Einfluss hat dabei der technische (z. B. altersbedingte) Zustand des Stromnetzes und die Organisation der Energieversorgung (z. B. europäisches Verbundsystem). Beispielsweise decken in den USA ineffiziente gasturbinengetriebene Generatoren die Spitzenlasten im Hochpreissegment ab.

⁵ Genau zu dieser Zeit liegen in der Regel hohe solare Einstrahlungen und die Abwärme aus der KWK vor. Es ist aber zu prüfen, ob beim Einsatz von thermisch angetriebenen Kältemaschinen die Kühlung sinnvoll bewerkstelligt werden kann. Neben der Außentemperatur spielt dabei auch die Luftfeuchte eine entscheidende Rolle.

⁶ Ausfall oder Zusammenbruch der Elektroenergieversorgung

In Deutschland werden aufgrund des EEGs zunehmend erneuerbare Energiequellen in das Netz eingebunden, die die Schwankungen der Energiequelle (z. B. Wind, solare Einstrahlung) ins Netz eintragen. Deswegen werden verschiedenste Konzepte (z. B. Prognoseystem, Lastmanagement) erforscht und erprobt, um die bisherige Qualität und Versorgungssicherheit zu erhalten.

Hier kann „Klimatisieren mit Wärme“ einen wesentlichen Beitrag liefern, indem

- die Kältelast von der Stromlast entkoppelt wird,
- die Gesamteffizienz der brennstoffgebundenen Energieversorgung gesteigert wird oder
- eine Substitution von Brennstoffen stattfindet.

Ein weiterer Vorteil der thermisch angetriebenen Klimatisierung ist die leichtere Speicherbarkeit von Wärme, die sich auf elektrischer Seite schwieriger gestaltet und mit höheren Kosten verbunden ist⁷.



Abb. 12: Stromversorgung in einem Wohn- und Geschäftsviertel in Beijing (links), Fischmarkt mit vielen elektrischen Klimageräten in Seoul

LESEPROBE

⁷ An Speichern im Bereich der Elektroenergieversorgung wird intensiv geforscht. Im Kurzzeit-Speicherbereich wären die Supercaps [10] und Druckluftspeicherung in Kavernen [11] zu nennen. Als einzig etablierte Technik kommen Pumpspeicherkraftwerke infrage.