

Energetische Nutzung von Wärmequellen niedriger Temperatur

Einleitung

Niedertemperaturwärme ist in unspektakulärer Weise überall vorhanden. Am auffälligsten ist wohl die Solarwärme, weil die Kollektoren überall sichtbar sind. Am besten versteckt ist die Geothermie, die zwar überall vorhanden ist, aber nur an wenigen Stellen deutlich zu Tage tritt. Während die Ausbeutung von Solarenergie und Geothermie teuer ist und ihre Nichtnutzung betriebswirtschaftlich nichts kostet, gilt dies nicht für den dritten Typus von Wärmequelle, den wir betrachten wollen: die Abwärme aus Industrieprozessen. Sie ist deswegen besonders interessant, weil ihre Entsorgung selbst schon Geld kostet wegen Investition und Betrieb der nötigen Kühltürme. Die weitere Nutzung wird dadurch beträchtlich erleichtert.

Eine Abschätzung des theoretischen Potentials zeigt, dass es groß genug ist, um technische Anstrengungen zu rechtfertigen. Dieser Aufsatz soll dazu dienen, Nutzungsmöglichkeiten, Grenzen und insbesondere Entwicklungsbedarf zu zeigen.

Eine grobe Charakterisierung der Niedertemperaturwärmequellen ist in *Tab. 1* gegeben.

Die Temperaturbereiche der Wärmequellen sind durchaus ähnlich, wobei die Spanne bei Industrieabwärme am größten ist. Allen Quellen gemeinsam ist auch, dass die Wärmeenergie meist in Form warmem Wassers zwischengespeichert wird und so genutzt werden kann. Die Temperaturspreizung ΔT zwischen Vor- und Rücklauf in diesem Heißwasser ist eine sehr wichtige Größe, die wir im Folgenden für die Diskussion der verschiedenen Nutzungsmöglichkeiten verwenden werden.

Es fällt auf, dass trotz aller Ähnlichkeit im Angebot die typische Nutzung der drei Wärmequellen unterschiedlich ist. Bei den Überlegungen zur Nutzung ist zuerst der lokale Bedarf zu beachten.

In der Verwendung ist elektrische Energie immer am vielseitigsten, denn sie kann immer in die anderen Energieformen umgewandelt werden und ist leicht zu transportieren. Es sollte aber auch der Wert der verschiedenen Energiedienstleistungen (vermiedener Einkauf) und der hierfür nötige Aufwand betrachtet werden. Für letzteren kann als ein intuitiver, qualitativer Maßstab die Summe derjenigen Wärmemengen verwendet werden, die zur Bereitstellung von einer Megawattstunde (MWh) Nutzenergie umgesetzt, das heißt aufgenommen und abgegeben werden müssen. Die Unterschiede im Aufwand sind deutlich größer als beim Marktwert, wie *Tab. 2* zeigt. Dies spricht dafür, dass die oben skizzierten Nutzungsunterschiede nicht ganz marktgerecht sein können.

Bei der direkten Nutzung als Wärme treten keine besonderen anwendungstechnischen Probleme auf. Interessant – und aufwändiger umzusetzen – ist aber die Möglichkeit, das Temperaturniveau mittels unterschiedlicher Wärmetransformationsprozesse zu verschieben.

Prof. Dr. Felix Ziegler
TU Berlin - Institut für Energietechnik
Felix.Ziegler@tu-berlin.de

Dr. Wolfgang Eisenmann
ISFH
w.eisenmann@isfh.de

Dr. Hans-Martin Henning
Fraunhofer ISE
hans-martin.henning@ise.fraunhofer.de

Dr. Silke Köhler
GFZ Potsdam
skoe@gfz-potsdam.de

Tabelle 1

	Sonnenwärme	Geothermie	Abwärme
Angebot	sehr groß	mittel	groß
Dargebot	ungleichmäßig	gleichmäßig	gleichmäßig
Leistungsdichte	niedrig	hoch	hoch
Typische Nutzung für	Wärme	Wärme, Kraft	Wärme, Kälte

Tabelle 2

	Wert	Aufwand
Wärme	5 Ct/kWh	1 MWh Wärmeumsatz pro MWh Nutzwärme
Kälte	10 Ct/kWh	5 MWh Wärmeumsatz pro MWh Kälte
Kraft	20 Ct/kWh	20 MWh Wärmeumsatz pro MWh elektrische Energie

Abbildung 1
Anlagen zur Nutzung
von Niedertemperaturwärme:

Oben:
Absorptions-Dampf-
kraftwerk (Kalina)
mit 2MW_{el} Leistung
in Husavik, Island

Photo Siemens PG



Unten links:
Solar angetriebene
Absorptionskälteanlage
der Firma Phönix
Sonnenwärme AG mit
 10kW Kälteleistung

Photo TUB



Unten rechts:
Zinkdach als „unsicht-
bare Wärmequelle“ für
eine Wärmepumpe

Photo Rheinzink



Die Nutzung zur Kälteversorgung kann mit Standardanlagen nicht immer erreicht werden. Hier sind besser angepasste Kältekreisprozesse denkbar und wünschenswert. Dies gilt umso mehr für die Stromerzeugung, da übliche Kraftwerksprozesse bei großen Temperaturspreizungen in der Wärmequelle unpassend sind. Es muss ein Dreiecksprozeß angestrebt werden. Im Folgenden werden alle drei Sektoren diskutiert. Beispiele dazu sind in *Abb. 1* aufgeführt.

Elektrische Energie aus Niedertemperaturwärme

Wir betrachten in *Abb. 2 (links)* eine Wärmekraftanlage, aber nicht im Detail, sondern nur als Blackbox; sie ist charakterisiert durch die Temperaturen der Wärmesenke (Umgebung) T_1 und der Niedertemperaturwärmequelle mit Vorlauf (ein) und Rücklauf (aus) T_{2e} und T_{2a} .

Die Temperaturspreizung der Wärmequelle Q_2 sei $T \Delta = T_{2e} - T_{2a}$, die der Senke sei vernachlässigbar klein. Erster und zweiter Hauptsatz der Thermodynamik liefern uns für den thermischen Wirkungsgrad $\eta = W/Q_2$, unter Berücksichtigung der thermodynamischen Güte g (Verhältnis zwischen realem und idealem Wirkungsgrad): (*siehe Gleichung 1*).

Es ist offensichtlich, wie der bekannte Carnot-Wirkungsgrad $(T_{2e} - T_1)/T_{2e}$ durch die Spreizung verringert wird. In *Abb. 2 (rechts)* ist dieses Verhalten dargestellt. Aufgrund der vergleichsweise niedrigen Temperatur der Wärmequelle kann natürlich kein hoher thermischer Wirkungsgrad erwartet werden. Aber selbst mit Rücklauftemperaturen von 60°C können von der Anlage noch 10% erzielt werden, wenn die Vorlauftemperatur hoch genug (hier 120°C) ist.

Dies ist allerdings nur mit speziell ausgelegte Kreisläufen möglich: Prozesse mit organischen Arbeitsmitteln oder Sorptions-Kraftprozesse.

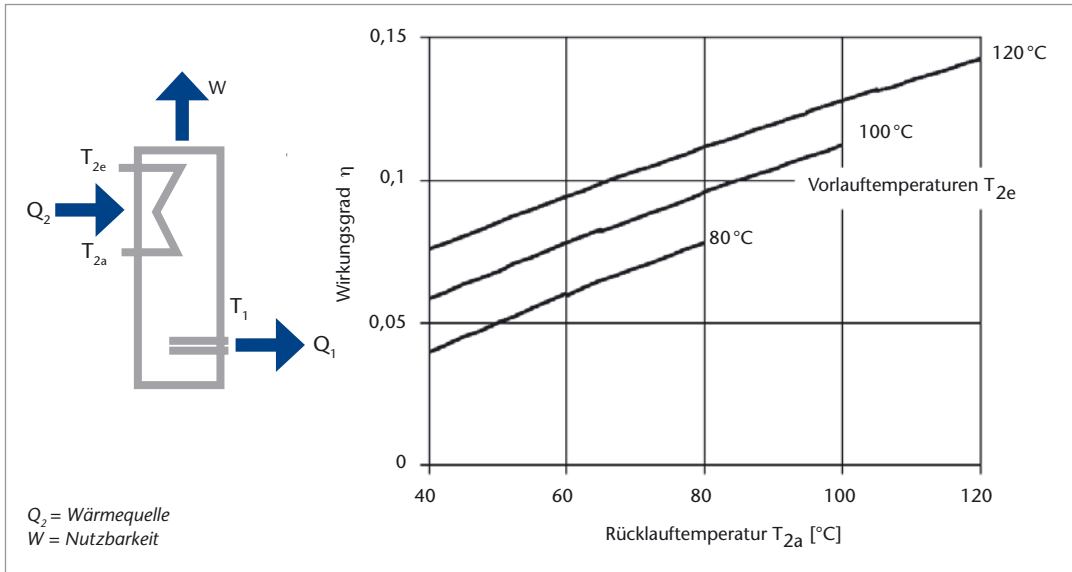


Abbildung 2
Links: Repräsentation eines Kraftwerkes mit gleitender Antriebs-temperatur (Vorlauf \$T_{2e}\$, Rücklauf \$T_{2a}\$) und Kühlwassertemperatur \$T_1\$

Rechts: Wirkungsgrad \$\eta = W/Q_2\$ des Kraftwerkes nach Gleichung (1); Kühlwassertemperatur 31\$^\circ\text{C}\$, Grädigkeit¹ 5K, Güte 0,7

Gleichung 1

$$\eta = \left[1 - \frac{T_1}{T_{2e} - T_{2a}} \ln \left(\frac{T_{2e}}{T_{2a}} \right) \right] g \approx \left[\frac{T_{2e} - T_1}{T_{2e}} - \frac{1}{2} \frac{T_1}{T_{2e}^2} \Delta T \right] g$$

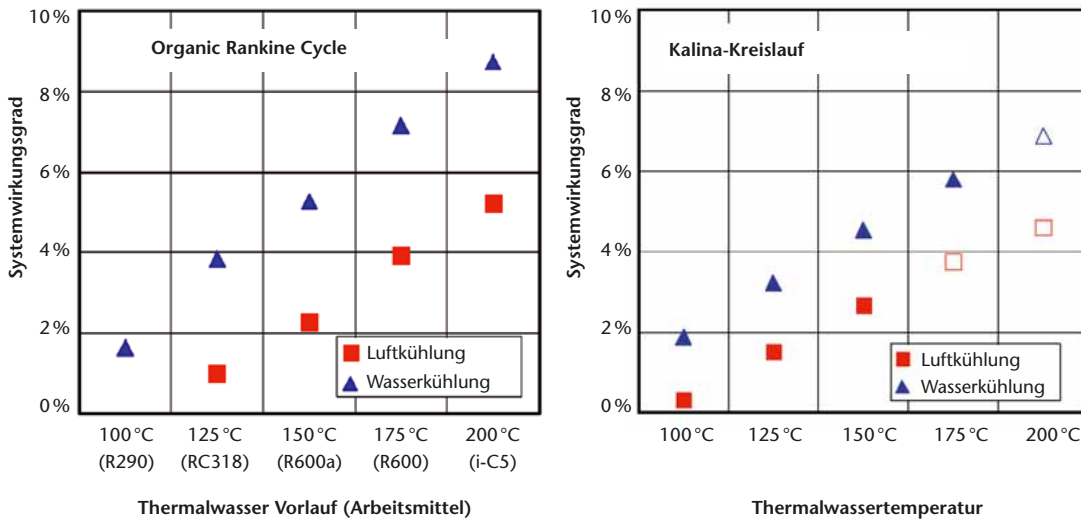


Abbildung 3
Systemwirkungsgrade geothermischer Kraftwerke:

Links: Organic Rankine Cycle; Rechts: Kalina-Kreislauf [1]

Erstere sind auch unter dem Namen ORC, letztere unter dem Namen Kalina-Prozess (Abb. 1) bekannt.

Die hier durchgeführte Abschätzung ist natürlich recht grob, aber durchaus treffend für den eigentlichen Kraftwerksprozess. Im Gesamtsystem kommt meist noch ein nicht zu vernachlässigender Eigenbedarf hinzu, wie beispielsweise für die Tiefenpumpe für das zu fördernde Wasser bei geothermischen Anlagen.

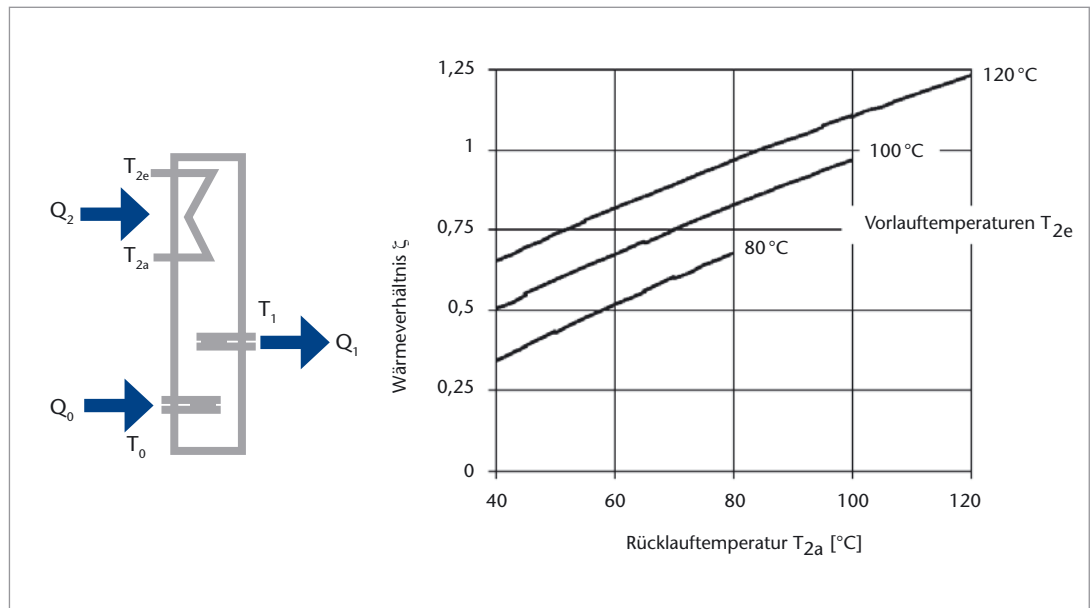
Eine genauere Simulation führt auf die Systemwirkungsgrade in Abb. 3 [1]. Aus den Unterschieden zwischen Abb. 2 und 3 kann abgeleitet werden, dass eine gute Abstimmung der Systemtechnik von immenser Bedeutung für die Nutzung von Niedertemperaturwärme ist.

¹ Die den Wärmeübergang treibende Temperaturdifferenz

Abbildung 4

Links: Repräsentation einer Absorptionskälteanlage mit gleitender Antriebstemperatur (Vorlauf T_{2e} , Rücklauf T_{2a}), Kühlwassertemperatur T_1 und Kälteproduktion bei T_0

Rechts: Wärmeverhältnis $\zeta = Q_0/Q_2$ der Kälteanlage nach Gleichung (2); Kühlwassertemperatur 31 °C, Kälteproduktion bei 9 °C, Grädigkeit 5K, Güte 0,7



Gleichung 2

$$\zeta = \frac{T_0}{(T_1 - T_0)} \left[1 - \frac{T_1}{T_{2e} - T_{2a}} \ln \left(\frac{T_{2e}}{T_{2a}} \right) \right] g \approx \frac{T_0}{(T_1 - T_0)} \left[\frac{T_{2e} - T_1}{T_{2e}} - \frac{1}{2} \frac{T_1 \Delta T}{T_{2e}^2} \right] g$$

Kälte aus Niedertemperaturwärme

Wir betrachten nun das Schema einer Sorptionskälteanlage (Abb. 4 links). Sie ist zusätzlich charakterisiert durch die Temperatur der erzeugten Kälte T_0 . Der erste und zweite Hauptsatz der Thermodynamik liefern uns das sogenannte Wärmeverhältnis $\zeta = Q_0/Q_2$, welches die Menge Kälte angibt, die aus einer bestimmten Wärmemenge erzeugt werden kann:

(siehe Gleichung 2)

Gleichung 1 muss lediglich mit der Leistungszahl $T_0/(T_1 - T_0)$ einer reversiblen Kälteanlage multipliziert werden; es ergibt sich Abb. 4 (rechts). Der thermische Wirkungsgrad für Kälte ist etwa eine Größenordnung größer als der thermische Wirkungsgrad für Kraftwerke. Es kann etwa zehnmal soviel Kälte wie Strom erzeugt werden. Selbst mit Rücklauf-temperaturen von 60 °C kann noch die gesamte in den Prozess hineingesteckte Niedertemperaturwärme in Nutzkälte verwandelt werden, wenn die Vorlauf-temperatur 120 °C beträgt.

Dafür sind allerdings wiederum speziell ausgelegte Kreisläufe nötig; die standardmäßig eingesetzten Kaltwassersätze sind für diesen Einsatzfall ungeeignet. Das nötige Wissen ist aber grundsätzlich vorhanden. Abb. 5 zeigt als Beispiel gemessene Leistungsdaten einer von der Firma Entropie GmbH nach einem Konzept des ZAE Bayern gebaute Anlage [2].

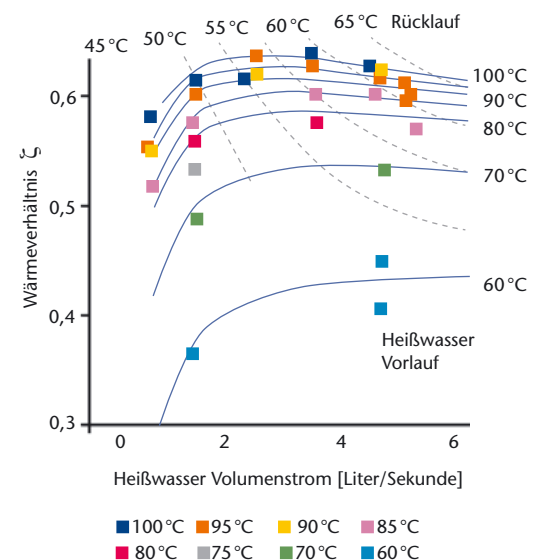


Abbildung 5

Wärmeverhältnis $\zeta = Q_0/Q_2$ einer Single-effect/Double-lift Absorptionskälteanlage als Funktion des Volumenstroms der Niedertemperaturwärmequelle (Heißwasser) [2]

Aufwertung von Niedertemperaturwärme

Die thermische Aufwertung von Wärme geschieht mit Wärmepumpen. Meist verwenden Wärmepumpen als Wärmequelle die Umgebung in Form von Luft, Erdreich oder Grundwasser. Deren Temperatur ist typischerweise kälter als bei den bisher diskutierten Beispielen. Es ist aber bekannt, dass eine Wärmepumpe umso effizienter arbeitet, je höher die Temperatur der Wärmequelle ist. Dies bedeutet, dass Wärme im von uns bisher betrachteten Temperaturbereich hervorragend als Wärmequelle für alle Arten und Anwendungen von Wärmepumpen geeignet ist. Wärmepumpen zur Wärmerückgewinnung sind gut bekannt, weshalb hier nur auf die weiter in die Zukunft weisenden Arbeiten des ISFH und des Fraunhofer ISE in diesem Bereich hingewiesen werden soll:

Am ISFH werden Wärmeversorgungssysteme untersucht, die speziell ausgelegte, dachintegrierte Solarkollektoren (siehe Abb.1) und das Erdreich als Wärmequelle für eine Wärmepumpe verwenden und geringe Kosten sowie hohe Effizienz und gutes Lastverhalten versprechen.

Am Fraunhofer ISE wird insbesondere die Wärmespeicherung im Zusammenhang mit Wärmepumpen untersucht.

Zum Schluss wollen wir noch auf einen anderen, weniger bekannten Wärmepumpen-Prozess eingehen: den Absorptionswärmemetransformator (Abb. 6 links), der im thermodynamischen Sinne gegenläufig arbeitende Prozess zur Absorptionskältemaschine. Er ist in der Lage, ohne zusätzlichen Antrieb einen Teil der zur Verfügung stehenden Niedertemperaturwärme Q_2 aufzuwerten, sodass er als Q_3 bei T_3 genutzt werden kann. Diesen Anteil bezeichnen wir als $\zeta' = Q_3/Q_2$ (Abb. 6 rechts)/Gleichung 3)

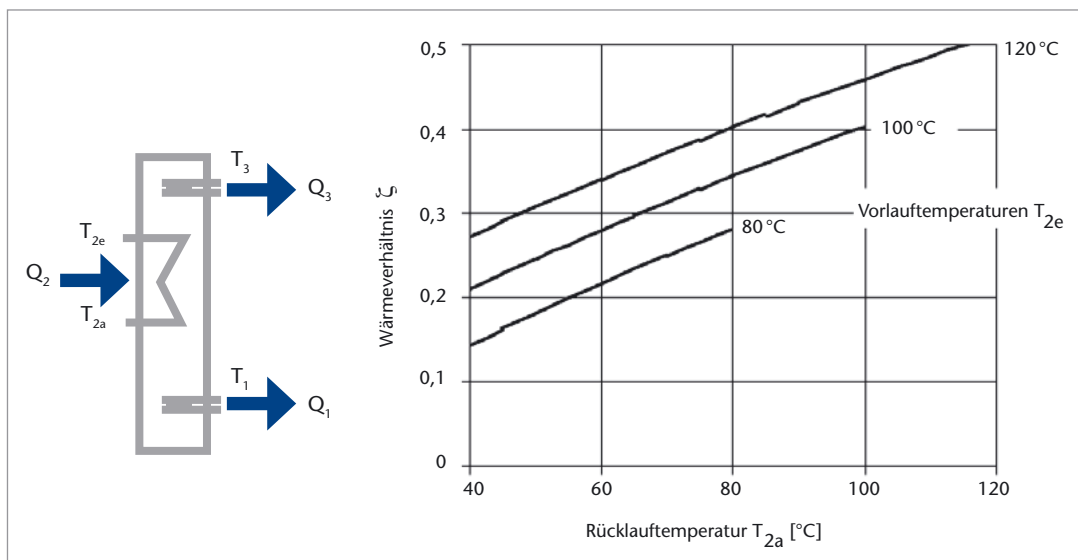
Der thermische Wirkungsgrad zur Aufwertung von Wärme liegt zwischen elektrischem Wirkungsgrad und Kälteverhältnis. Mit Rücklauftemperaturen von 60 °C kann noch über ein Drittel der in den Prozess hineingesteckten Niedertemperaturwärme in Nutzwärme bei 150 °C verwandelt werden, wenn die Vorlauftemperatur 120 °C ist. Während von diesen Anlagen in den 80er Jahren etwa ein Dutzend betrieben wurden, sind sie heute wieder in Vergessenheit geraten.

Gleichung 3

$$\zeta' = \frac{T_3}{(T_3 - T_1)} \left[1 - \frac{T_1}{T_{2e} - T_{2a}} \ln \left(\frac{T_{2e}}{T_{2a}} \right) \right] g \approx \frac{T_3}{(T_3 - T_1)} \left[\frac{T_{2e} - T_1}{T_{2e}} - \frac{1}{2} \frac{T_1 \Delta T}{T_{2e}^2} \right] g$$

Abbildung 6

Links: Repräsentation eines Absorptionswärmemetransformators mit gleitender Antriebs-temperatur (Vorlauf T_{2e} , Rücklauf T_{2a}), Kühlwassertemperatur T_1 und Wärme-produktion bei T
 Rechts: Wärmeverhältnis $\zeta' = Q_3/Q_2$ des Transformators nach Gleichung (3); Kühlwassertemperatur 31 °C, Wärmeproduktion bei 150 °C, Grädigkeit 5K, Güte 0,7



Zusammenfassung und Ausblick

Als Niedertemperaturwärmequellen werden thermische Solarenergie, Erdwärme und Industrieabwärme gemeinsam betrachtet. Die Wärme kann als Wärme genutzt, in der Temperatur aufgewertet oder in Kälte oder elektrische Energie umgewandelt werden. Eigenschaften und Randbedingungen sowie Nutzung sind bei den jeweiligen Wärmequellentypen unterschiedlich. Es wurden die thermodynamischen Grenzen und angepasste Kreisläufe zur Bereitstellung der drei Energiedienstleistungen diskutiert. Dabei zeigt sich, dass eine große Vielfalt von Möglichkeiten existiert, aus Niedertemperaturquellen Nutzwärme, Kälte oder elektrische Energie bereitzustellen.

Ein grober Vergleich der Produktion von Nutzwärme, Kälte oder elektrische Energie aus Niedertemperaturquellen in wirtschaftlicher Hinsicht zeigt, dass nicht immer das hochpreisige Produkt Strom am wirtschaftlichsten erzeugt wird. Insbesondere die Kältedienstleistung verdient mehr Aufmerksamkeit. Das Produkt aus Marktwert und erzeugbarer Nutzenergie ist hier am größten. Der Aufwand ist zwar viel größer als bei der direkten Wärmenutzung, aber geringer als bei der Stromerzeugung oder der Wärmetransformation.

In diesem Aufsatz werden die thermodynamischen Grenzen zur Nutzung von Niedertemperatur gezeigt, die technischen Realisierungen aber nur angedeutet. Es ist offensichtlich, dass eine große Vielfalt von bisher nur wenig genutzten Möglichkeiten existiert, aus Niedertemperaturwärmequellen Nutzwärme, Kälte oder elektrische Energie bereitzustellen. Über das hier gezeigte hinaus befinden sich offene Systeme zur Klimatisierung wie auch zur Wärmerückgewinnung in Entwicklung oder werden bereits eingesetzt. Entwicklungsbedarf besteht im Detail, aber das grundlegende Know-how ist vorhanden.

Literatur

- [1] Köhler, S. (2005): Geothermisch angetriebene Dampfkraftprozesse. Analyse und Prozessvergleich binärer Kraftwerke. Dissertation an der TU Berlin.
- [2] Schweigler, C. (1999): Kälte aus Fernwärme. Konzept, Auslegung und Betrieb der Single-Effect/Double-Lift-Absorptionskälteanlage. Fortschritt-Berichte des VDI, Reihe 19, Nr.121, Düsseldorf.