

Einsatzmöglichkeiten und -grenzen von Wärmepumpen zur Rücklaufauskühlung in Fernwärmenetzen

1. Fernwärmekolloquium Gießen

Datum: 19.02.2008

Referent: Steffen Robbi

Teilthema aus: LowEx Fernwärme - Multilevel District Heating

Folie 1



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Fakultät Maschinenwesen Professur für Energiesystemtechnik und Wärmewirtschaft Professor A. Dittmann



Einsatzmöglichkeiten und -grenzen von Wärmepumpen zur Rücklaufauskühlung in Fernwärmenetzen

Teilthema des: LowEx-Fernwärme MULTILEVEL DISTRICT HEATING

Forschungsvorhaben gefördert vom
Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
FKZ: 0327400B



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

Folie 2



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

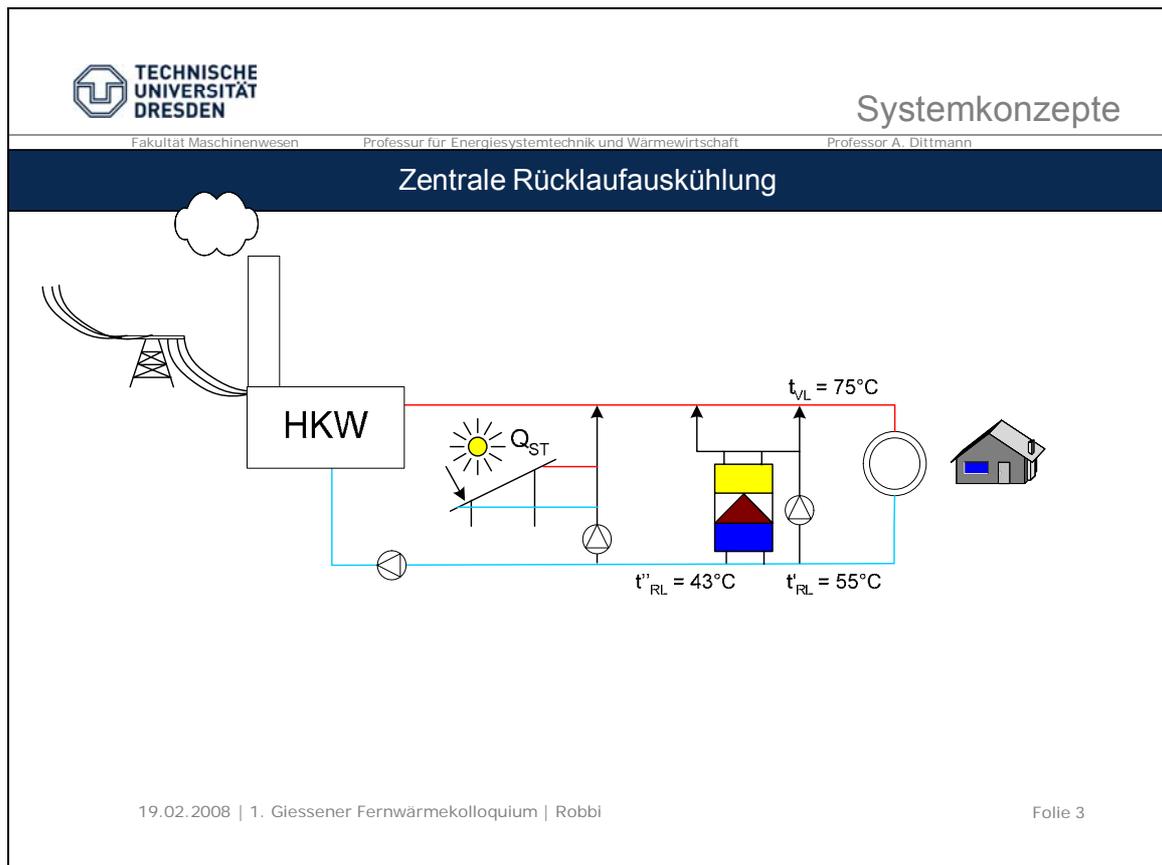
Fakultät Maschinenwesen Professur für Energiesystemtechnik und Wärmewirtschaft Professor A. Dittmann

Gliederung

1. **Systemkonzepte**
2. **Vorteile einer Rücklaufauskühlung**
3. **Anforderungen an Verdichter-Wärmepumpen**
4. **Primärenergetische Bewertung**

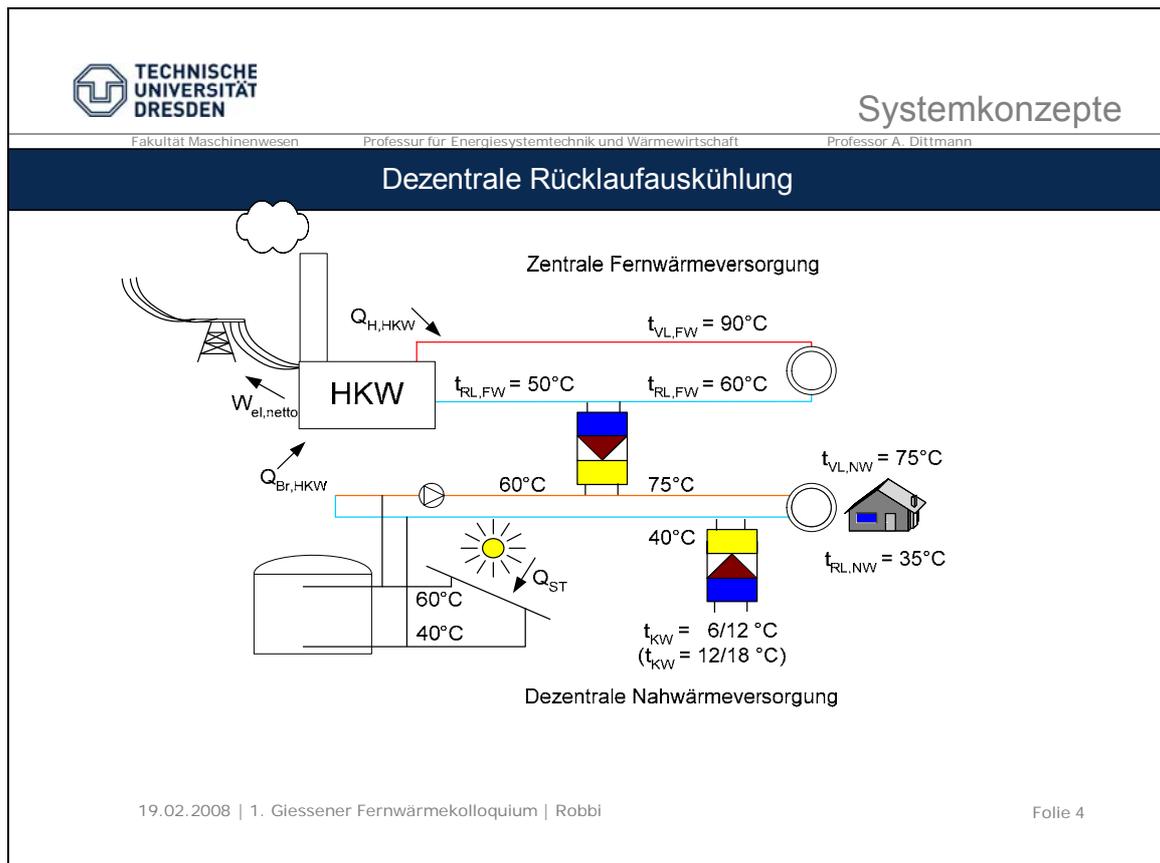
19.02.2008 | 1. Giessener Fernwärmekolloquium | Robbi

Folie 2



Eine **Wärmepumpe zur Auskühlung des Rücklaufes von Fernwärmenetzen** kann, wie in Folie 3 dargestellt, zentral angeordnet werden. Zentral bedeutet in diesem Fall parallel zum Wärmeerzeuger.

Angegeben ist hier ein Heizkraftwerk (HKW), wobei es sich in realen Netzen meist um ein Verbundsystem verschiedener Einspeiser handelt. Wie bereits angedeutet, bietet die niedrige Rücklauftemperatur den Vorteil, dass Wärmeerzeuger mit niedrigem Temperaturniveau, z.B. Solarthermie, parallel oder zur Vorwärmung eingebunden werden können.



Die **dezentrale Anordnung** der Wärmepumpe nach Folie 4 ermöglicht die Versorgung eines Sekundärnetzes. Prinzipiell sind auch Anschlüsse einzelner Kunden denkbar.

Angedeutet ist auch hier ebenfalls die Möglichkeit der Integration von Wärmequellen auf niedrigem Temperaturniveau. Wird dies auf Seiten der Wärmesenke realisiert, kann die Wärmepumpe auf Solltemperatur des Abnehmers nachheizen. Solarthermische Anlagen können dadurch beispielsweise mit niedrigeren Mitteltemperaturen betrieben werden, was deren Wirkungsgrade steigert.

Die Einspeisung von Abwärme, wie es hier durch die Kälteanlage dargestellt ist, wird im weiteren Verlauf des Forschungsthemas Multi-Level-District-Heating bearbeitet und zu gegebener Zeit vorgestellt.



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Systemkonzepte

Fakultät MaschinenwesenProfessur für Energiesystemtechnik und WärmewirtschaftProfessor A. Dittmann

Einsatzmöglichkeiten und Vorteile

Einsatz

- neue Wohnungsstandorte mit:
 - Großer Kapazität
 - Langen Transportleitungen
- Erweiterung eines bestehenden, hydraulisch ausgelasteten Netzes

Vorteile

- Erhöhung des KWK Stromanteils (EGD)
- Steigender Brennstoffausnutzungsgrad (EK)
- Alternativer Einsatz von reg. Energien (Solarthermie) / Abfallenergien im Sommerbetrieb oder bei Teillast
- Konstante Leistung der Netzpumpen

19.02.2008 | 1. Glessener Fernwärmekolloquium | RobbiFolie 5

Die **Einsatzmöglichkeiten von Kompressions-Wärmepumpen in Fernwärmenetzen** können folgendermaßen unterschieden werden:

- *Die Errichtung von neuen Fernwärmesystemen, an welche große Kapazitäten angeschlossen werden oder lange Transportleitungen notwendig sind*

Wird die Rücklauftemperatur gesenkt und somit die Temperaturspreizung im Netz vergrößert, sinkt bei konstanter Leistung, der erforderliche Massestrom. Folglich können die Transportleitungen (im Auslegungsfall) kleiner dimensioniert werden.

- *Erweiterung eines bestehenden, hydraulisch ausgelasteten Netzes*

Bestehende Netze sind oftmals hydraulisch ausgelastet und deren Wärmeabgabe kann nicht in großem Umfang gesteigert werden. Besonders in innerstädtischen Bereichen können Erweiterungs- und Verlegearbeiten im Straßen- und Tiefbau sehr kostenintensiv werden.

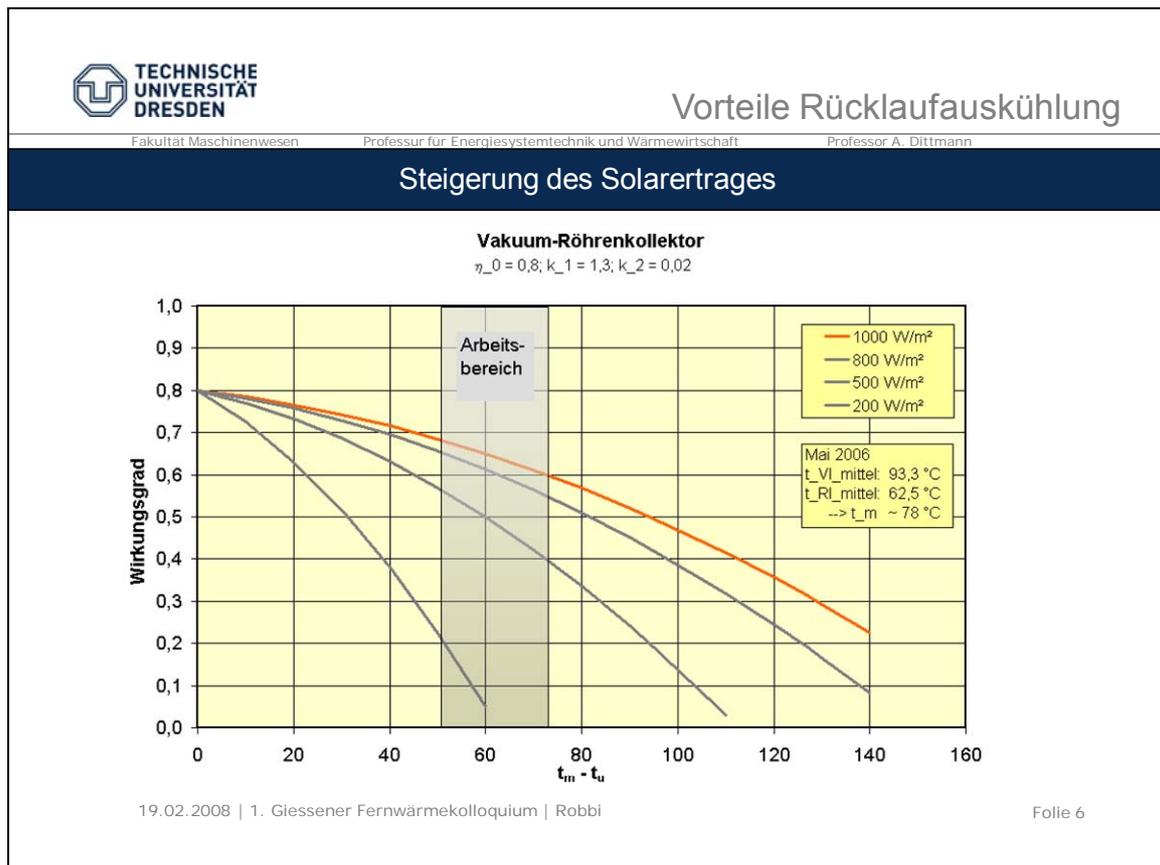
In beiden Fällen bietet es sich an, die erforderliche Wärme dem Rücklauf zu entziehen, ohne dass eine (Dimensions-) Änderung an den Transportleitungen vorgenommen werden muss.

Durch die Rücklaufauskühlung können bei konstantem Massestrom im Netz folgende Vorteile entstehen:

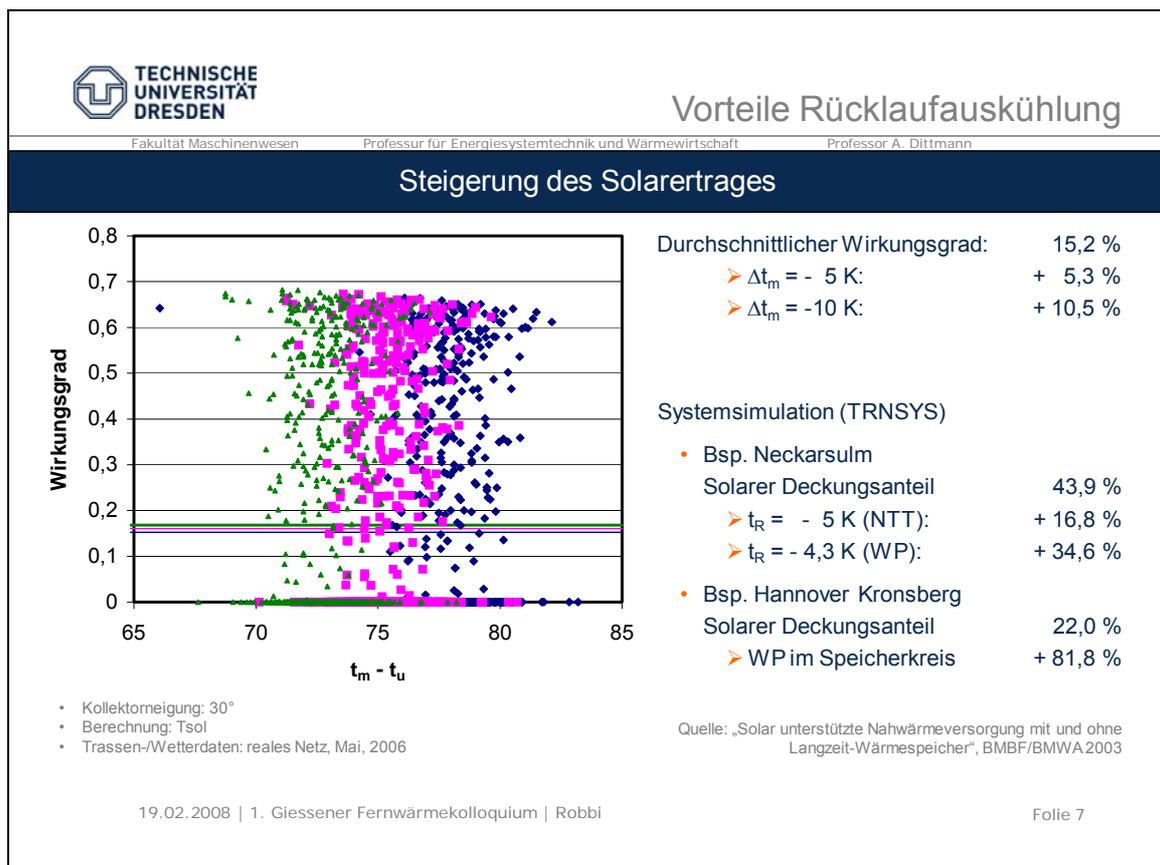
- Bei Entnahme-Gegendruck-Heizkraftwerken (EGD) steigt der in KWK erzeugte Stromanteil¹ /Rhein/.
- Bei Entnahme-Kondensations-Heizkraftwerken (EK) steigt der Brennstoffausnutzungsgrad¹ /Rhein/.
- Auf Grund der niedrigen Rücklauftemperatur können Wärmequellen auf niedrigen Temperaturniveaus, wie z.B. Solarthermie oder Abwärme aus Kälteanlagen, in das Fernwärmenetz integriert werden. Die zusätzlichen Wärmequellen können dabei der Vorwärmung dienen. Es ist auch vorstellbar, die zusätzliche (regenerative) Wärme zu speichern und dann zu nutzen, wenn konventionelle HKW's schlechte Teillastwirkungsgrade erreichen.
- Ein weiterer Vorteil besteht in der konstanten Leistung der Umwälzpumpen, obwohl dem Netz mehr Wärme entzogen wird. Nach /Wirths/ beträgt jedoch der Energieverbrauch der Umwälzpumpen an der gesamten Wärmearbeit weniger als 2 %, ist also relativ gering.

¹ Bedingung ist, dass die Absenkungen auf das Heizkraftwerk (HKW) wirken. Müssen Heizwerke (HW) eine größere Temperaturspreizung bei konstantem Massestrom realisieren, verschlechtern sich im allgemeinen deren Betriebsbedingungen.

Folie 6



Wie in Folie 5 dargestellt, wirken sich niedrigere Rücklauftemperaturen vorteilhaft auf den Betrieb von **Solarthermie-Anlagen** aus. In Folie 6 wird der Gesamtwirkungsgrad in Abhängigkeit der Mitteltemperatur und verschiedener solarer Einstrahlwerte gezeigt. Je mehr die Mitteltemperatur sinkt, desto größer sind die erreichbaren Wirkungsgrade und folglich solaren Deckungsraten in einem Verbundsystem.



Die Steigerung des Solarertrages wird noch einmal in Folie 7 verdeutlicht. Hier zeigt sich für eine konkrete Rechnung im Monat Mai 2006 in Halle (Saale), dass mit Absenkung der mittleren Systemtemperatur t_m um 5 K eine Wirkungsgradsteigerung von $\eta_{Ges} = 15,2 \%$ um 5,3 % und bei einer Absenkung von t_m um 10 K um relative 10,5 % möglich ist.

Beispielhafte Berechnungen² von Solarthermischen Systemen mit Langzeitwärmespeichern ergeben im Beispiel Neckarsulm eine Steigerung des solaren Deckungsanteils um 16,8 %, wenn mit Hilfe einer Anlagenoptimierung der Kunden die Rücklaufatemperatur um 5 K gesenkt werden kann. Wird eine zusätzliche Wärmepumpe in das System integriert, die gleichzeitig den Speicher auskühlt, dann ist eine Steigerung um 34,6 % möglich.

Die Berechnungen im Beispiel Hannover Kronsberg zeigen sogar eine relative Steigerung des solaren Deckungsgrades um 81,8 %.

² rein theoretische Berechnungen mit dem Programm TRNSYS



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Systemkonzepte

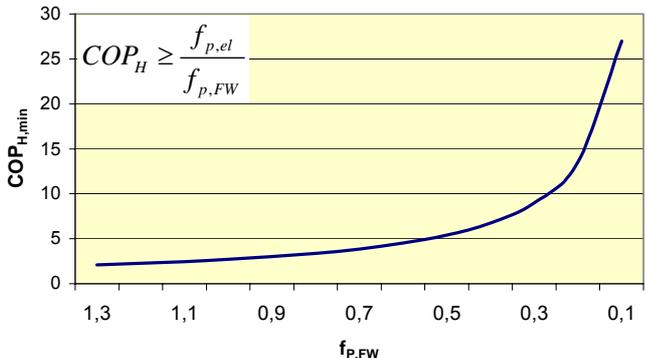
Fakultät Maschinenwesen
Professur für Energiesystemtechnik und Wärmewirtschaft
Professor A. Dittmann

Anforderungen

- ggf. hohe Leistungszahlen
- Hochtemperaturkältemittel
- Druckfestigkeit der Anlagenteile

Problem:

Verdrängung von KWK-Wärme durch elektrische Arbeit der Wärmepumpe ?



19.02.2008 | 1. Glessener Fernwärmekolloquium | Robbi

Folie 8

Die **Anforderungen an Kompressionswärmepumpen** bestehen in den folgenden Kriterien:

- *Ausreichend hohe Leistungszahlen*

Bei Einspeisung in ein bestehendes Fernwärmenetz, sollte der primärenergetische Aufwand zur Wärmeerzeugung geringer sein, als der einer vergleichweisen Netzerweiterung und Leistungssteigerung der HKW oder HW.

Der Leistungsbedarf von Wärmepumpen wird über die Leistungszahl COP_H bewertet und die primärenergetische Güte von Fernwärmenetzen mit Hilfe des Primärenergiefaktors. Der Primärenergiefaktor f_P gibt den Anteil an Primärenergie an, welcher für die Wärmeeinspeisung notwendig ist. Berücksichtigt wird der gesamte Aufwand der Rohstoffgewinnung, über den Transport bis hin zur Umwandlung. Im dargestellten Diagramm wird deutlich, dass der minimal notwendige COP der Wärmepumpe exponentiell mit sinkendem Primärenergiefaktor des Netzes steigt. Typische Netze erreichen Faktoren bis zu $f_P = 0,4$. Einzelne Netze mit hohem Anteil an in Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) erzeugter Wärme oder regenerativen Energien

haben auch noch kleine Werte. Bei $f_p = 0,4$ wird jedoch eine Leistungszahl von $COP_H = 6$ notwendig.

- *Hochtemperaturkältemittel*

Um die notwendigen Vorlauftemperaturen eines Fernwärmenetzes zu erreichen, sind besondere (Hochtemperatur-) Kältemittel notwendig. Mehr dazu im Weiteren.

- *Druckfestigkeit*

Mit steigenden Temperaturen steigt der Dampfdruck der Kältemittel im System, sodass die Anlagen entsprechend druckfest ausgeführt sein müssen. In Abhängigkeit des verwendeten Stoffes können sehr hohe Druckbelastungen auftreten, sodass spezielle Konstruktionen notwendig werden.

Angemerkt sein an dieser Stelle auch die Anforderung, dass in einem Fernwärmenetz keine KWK-Wärme verdrängt werden sollte. Es steht also die Frage, ob selbst bei Rücklaufauskühlung die notwendige Verdichterarbeit eine Verdrängung von KWK-Wärme bedeutet. Die elektrische Verdichterarbeit kann deshalb Wärme verdrängen, weil das HKW im Netz nur die Verdampfungswärme Q_0 ersetzen muss. Dem Kunden wird jedoch die Kondensationswärme Q_H geliefert, welche sich aus Verdampfungswärme und Verdichterarbeit W_{el} zusammensetzt:

$$Q_H = Q_0 + W_{el}$$



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Anforderungen an Verdichter-Wärmepumpen

Fakultät Maschinenwesen
Professur für Energiesystemtechnik und Wärmewirtschaft
Professor A. Dittmann

Leistungszahlen - Schaltungsvarianten

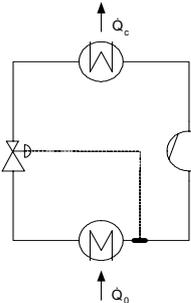


Abbildung 1:
Einstufiger Kreislauf

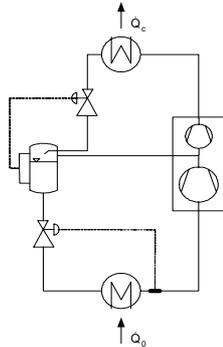


Abbildung 2:
Dampfdirekteinspritzung¹

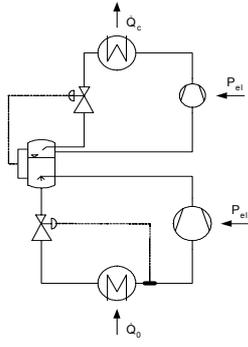


Abbildung 3:
Zweistufiger Kreislauf

19.02.2008 | 1. Giessener Fernwärmekolloquium | Robbi
Folie 9

Um die hohen **Leistungszahlen** zu realisieren, kann die einfache Wärmepumpenschaltung, wie in Folie 9 ersichtlich, erweitert werden. Die einfachste Möglichkeit besteht darin, einen Zwischenwärmeübertrager zu integrieren, der das überhitzte Kältemittel (Verdampferaustritt) erwärmt und gleichzeitig das unterkühlte Medium (Kondensatoraustritt) weiter abkühlt. Die Schaltung ist in Folie 9 nicht dargestellt, Rechenergebnisse sind jedoch in der Tabelle, Folie 10 aufgeführt.

Die zweistufigen Anlagenschaltungen liefern mehrere Vorteile. Zum Einen wird das überhitzte Kältemittel zwischengekühlt und die Verdichteraustrittstemperatur reduziert. Dies ist besonders dann wichtig, wenn hohe Netzvorlauf- und damit Kondensationstemperaturen realisiert werden sollen. Nicht das Kältemittel selbst erfordert niedrige Temperaturen, sondern vor allem die verwendeten Schmieröle und Verdichterelemente, wie Dichtungen und Lager, um ihre garantierten Wartungsintervalle nicht zu unterschreiten.

Weiterhin kann die Verdichterleistung reduziert werden, da ein Teilmassenstrom über den Mitteldruckteil geleitet wird.

Mit einer Schaltung nach Abbildung 3, Folie 9 können (zwischen den hier abgebildeten Varianten) die besten Leistungszahlen erreicht werden. Nachteilig wirkt sich jedoch gegenüber der Dampfeinspritzung (EVI), Abbildung 2 der erhöhte Kostenaufwand aus. Die Dampfdirekteinspritzung ist mit einem Verdichter konstruktiv relativ einfach zu realisieren, wohingegen in dem separierten Kreislauf nach Abbildung 3 auch zwei getrennte Verdichter benötigt werden.

Folie 10



Anforderungen an Verdichter-Wärmepumpen

Fakultät Maschinenwesen Professur für Energiesystemtechnik und Wärmewirtschaft Professor A. Dittmann

Leistungszahlen - Vergleich

KM	COP ₀	relative Abweichung				
	1	2	3	4	5	6
R134a	4,28	4%	5%	7%	12%	8%
R236fa	4,06	6%	6%	10%	14%	14%
R245ca	4,41	4%	4%	6%	10%	9%
R245fa	4,37	4%	4%	7%	10%	9%
R290	4,15	4%	5%	8%	13%	9%
R365mfc	4,25	5%	5%	8%	11%	12%
R600	4,32	4%	4%	7%	10%	9%
R600a	4,15	5%	6%	8%	12%	12%
R717	4,9	0%	0%	0%	3%	-1%
R718	4,87	-1%	-4%	-4%	-3%	0%
RC318	3,24	12%	15%	21%	27%	34%

Nr.	Schaltung
1	einstufig
2	einstufig mit SGHE 15%
3	EVI mit WÜ vor Bypass
4	EVI mit WÜ nach Bypass
5	EVI mit Sammler
6	zweistufig mit Sammler

R365mfc/R227ea_77/23 COP₀ (1) = 6,47, COP_H = 7,47

Netzparameter:
 t_{Kond} = 58 °C, t_{Kond}⁺ = 88 °C
 t_{Verd} = 61 °C, t_{Verd}⁺ = 51 °C

Fazit:

Leistungszahlen sind stark abhängig von Arbeitsmittel und Schaltung

19.02.2008 | 1. Giessener Fernwärmekolloquium | Robbi
Folie 10

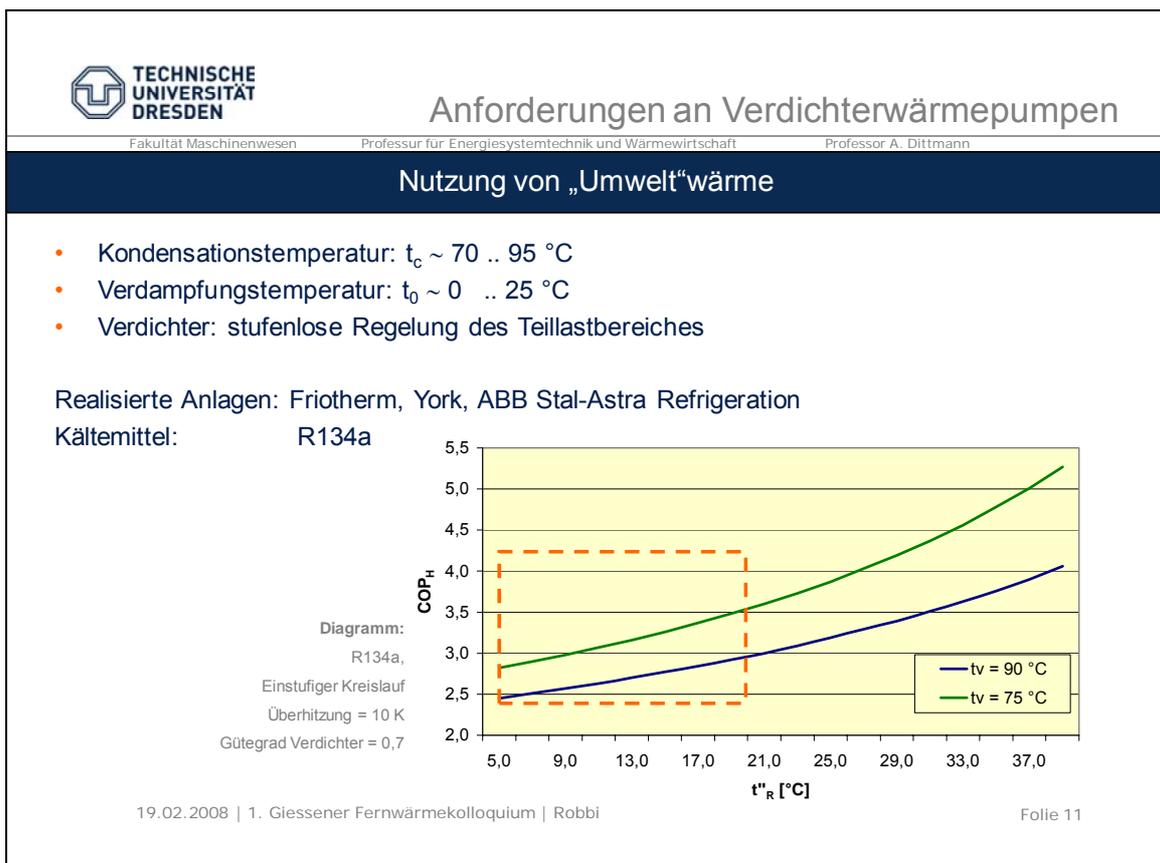
Ein Vergleich der drei beschriebenen Schaltung hinsichtlich der **erreichbaren Leistungszahl** (bezogen auf die Kälteleistung) zeigt Folie 10. Die Leistungszahlen wurden für das Kältemittel R134a und eine gewährleistende Netzvorlauftemperatur von 88 °C sowie Verdampferaustrittstemperaturen von 51 °C (Netzurücklauftemperatur 61 °C) berechnet. In den Spalten 3 bis 5 wurde der Kreislauf der Zwischendampfeinspritzung mit innerem Wärmeübertrager (Nr. 3 und 4) und nach Abbildung 2, Folie 9 (Nr. 5) mit einem Sammler berechnet.

Es zeigt sich deutlich, dass die Leistungszahlen stark vom Kältemittel und von der gewählten Schaltung abhängig sind aber auch, dass die nach Folie 8 geforderten $COP_H = 6$ ($COP_H = COP_0 + 1$) möglich sind.

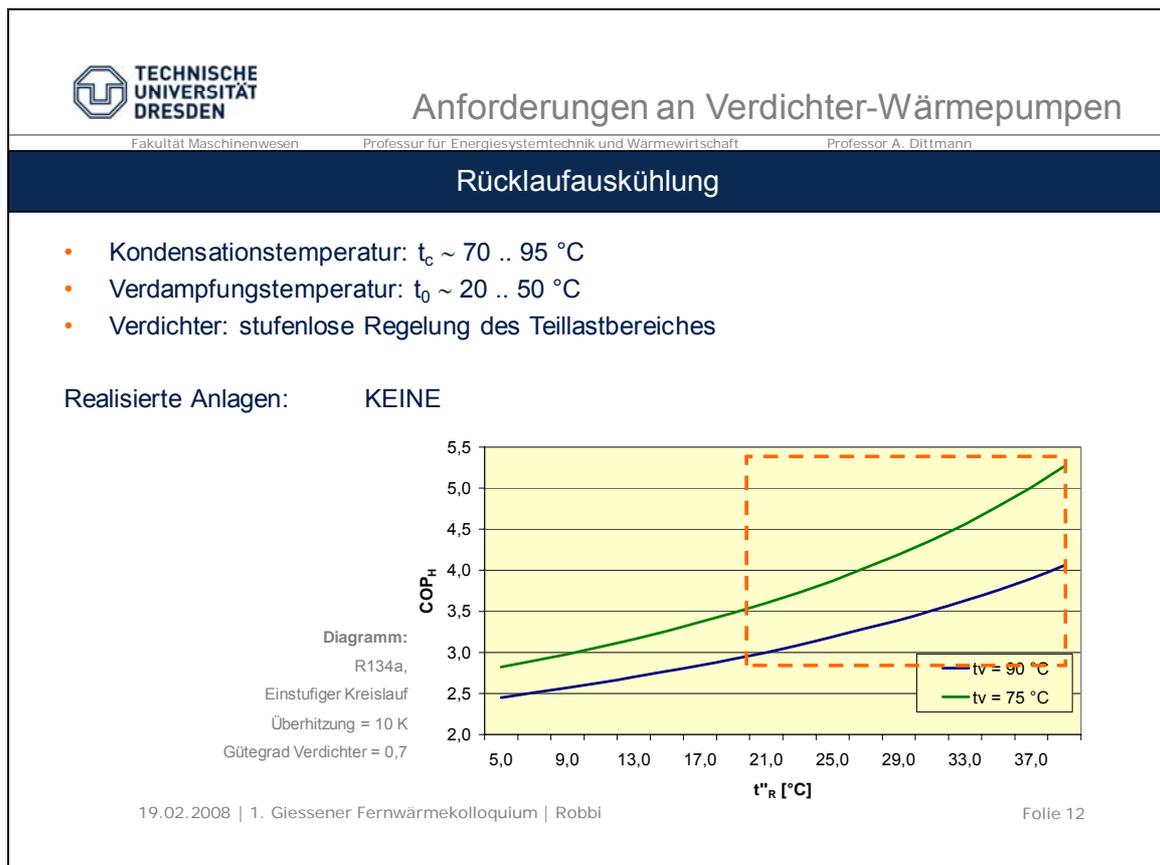
Herauszuheben ist aus dem Vergleich das zeotrope Kältemittelgemisch R365mfc/R227ea, welches auf Grund der gleitenden Temperatur bei Verdampfung und Kondensation relativ hohe Leistungszahlen erreicht.

Hat ein Netz also einen Primärenergiefaktor, der schlechter (größer) als 0,4 ist, kann sich eine Wärmeversorgung mittels Wärmepumpe bei den hier angenommenen Temperaturen, primärenergetisch vorteilhaft gegenüber einer „konventionellen“ Wärmeauskopplung auswirken. Bei dem hier angestellten Vergleich werden die Auswirkungen auf die Kraftwerke nicht berücksichtigt. Dieser Einfluss wird in Ausführungen ab Folie 19 betrachtet.

Folie 11



Neben der gewählten Wärmepumpenschaltung ist die erreichbare Leistungszahl vor allem von dem zu überwindenden **Temperatur- und damit Druckhub** abhängig. Derzeit in Fernwärmenetzen installierte Wärmepumpen nutzen hauptsächlich Umweltwärme als Wärmequelle. Mit Umweltwärme sind hier regenerative Quellen gemeint, wie Erdwärme, Fluss- oder Seewasser und Außen- oder Abluft aus meist industriellen Prozessen. Die dem Autor bekannten Wärmequellen ermöglichen alle Verdampfungstemperaturen kleiner 25 °C , sodass die saugseitigen Druckanforderungen für die Verdichter im Standardbereich liegen. In allen bekannten Fällen wird R134a als Arbeitsmittel genutzt.



Deutliche Verbesserungen der Leistungszahl können nach Folie 12 erreicht werden, wenn der Temperaturhub der Wärmepumpe verkleinert wird. Unter den hier gesetzten Bedingungen, ermöglicht die Auskühlung des Fernwärmerücklaufes eine Steigerung der Leistungszahl auf über 300 % ($\text{COP}_H > 6$). Bei Auskühlung des Rücklaufes können durchaus Verdampfungstemperaturen bis zu 50 °C entstehen. Für diesen Temperatur- und entsprechenden Druckbereich konnten *keine realisierten Anlagen* (Einspeisung in Fernwärmenetz) gefunden werden.



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Anforderungen an Verdichter-Wärmepumpen

Fakultät Maschinenwesen
Professur für Energiesystemtechnik und Wärmewirtschaft
Professor A. Dittmann

Hochtemperaturkältemittel

- Kritische Temperatur > Netzvorlauftemperatur
 - $t_{krit} > t_v + DT(5\text{ K})$
 - $t_{krit} > 95^\circ\text{C}$ (Sommer), 125°C (Winter)
- Druckfestigkeit von Standardverdichtern
 - $p_D(t_0^\circ\text{C}) < 7\text{ bar}$
 - $p_D(t_c^\circ\text{C}) < 25\text{ bar}$
- Umweltverträglichkeit

Reine Fluide	$t_{crit} > 95^\circ\text{C}$	$t_{crit} > 125^\circ\text{C}$	$p_D < 7\text{bar}$ <small>$p_D(t_{0,max}=45^\circ\text{C})$</small>	$p_D < 25\text{bar}$ <small>$p_D(t_c=90^\circ\text{C})$</small>	$p_D < 25\text{bar}$ <small>$p_D(t_c=120^\circ\text{C})$</small>
R11	1	1	1	1	1
R113	1	1	1	1	1
R114	1	1	1	1	1
R123	1	1	1	1	1
R141b	1	1	1	1	1
R142b	1	1	1	1	1
R236ea	1	1	1	1	1
R245ca	1	1	1	1	1
R245fa	1	1	1	1	1
Butane	1	1	1	1	1
Isobutan	1	1	1	1	1
water	1	1	1	1	1
R365mfc	1	1	1	1	1
Ammonia	1	1	0	0	0
R124	1	0	1	1	1
R236fa	1	0	1	1	1
RC318	1	0	1	1	1
R12	1	0	0	0	0
R22	1	0	0	0	0
R134a	1	0	0	0	0
R152a	1	0	0	0	0
R227ea	1	0	0	1	1
Propane	1	0	0	0	0
Gemische					
R401a	1	0	0	0	0
R401b	1	0	0	0	0
R401c	1	0	0	0	0
R405a	1	0	0	0	0
R406a	1	0	0	0	0
R409a	1	0	0	0	0
R409b	1	0	0	0	0
R411a	1	0	0	0	0
R411b	1	0	0	0	0
R500	1	0	0	0	0
R501	1	0	0	0	0

19.02.2008 | 1. Glessener Fernwärmekolloquium | Robbi
Folie 13

Eine weiteren, wichtige Anforderung an Hochtemperatur Wärmepumpen besteht natürlich in der Wahl eines **geeigneten Arbeitsmediums**.

Die *kritische Temperatur* des Stoffes muss größer sein, als die geforderte Netz-Vorlauftemperatur. Alle für die jeweiligen Kriterien geeigneten Kältemittel sind mit der Nummer „1“ markiert, alle nicht geeigneten mit Nummer „0“.

Die Nutzung von *standardisierten (Serien-) Verdichtern* hat große Kostenvorteile, weil keine zusätzlichen Konstruktionsplanungen und separate Tests notwendig sind. Spalte 4 markiert die Arbeitsmittel, deren Dampfdrücke bei 45 °C geringer sind, als die marktüblichen Maximaldrücke für die Saugseite von Kälteverdichtern von 7 bar. Spalte 4 und 5 zeigt die Stoffe, die bei 90 °C und 120 °C den üblichen Maximaldruck von 25 bar nicht überschreiten.

Das dritte relevante Kriterium ist die *Umweltverträglichkeit* der Arbeitsmittel. Die Deklaration der einzelnen Gruppen wird in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** farblich hervorgehoben.

Um die negativen Auswirkungen von FCKW auf die Ozonschicht zu reduzieren, wurde 1987 das Protokoll von Montreal unterzeichnet, welches nach /Pohlmann/ den schrittweisen Ausstieg aus der Verwendung von FCKW vorsieht. Demnach dürfen ab 1995 keine FCKW in Neuanlagen verwendet und teilhalogenierte Kohlenwasserstoffe (H-FCKW) nur als Übergangslösung bis maximal zum Jahr 2040 benutzt werden. In Deutschland wurde diese Regelung ab 2000 zudem durch eine Verbreitungssperre für R22 über die FCKW-Halon-Verbots-Verordnung (FCKW-Halon-Verbots-Verordnung) verstärkt. Die 2007 in Kraft getretene „Verordnung (EG) Nr. 2037/2000 des Europäischen Parlaments und des Rates über Stoffe, die zum Abbau der Ozonschicht führen“ (Verordnung (EG) Nr. 2037/2000) erweitert diese und sieht bis 2015 einen Ausstieg aus der Verwendung von Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW) vor.

Bis zum Verbot von FCKW wurde für Hochtemperaturwärmepumpen in industriellen Anwendungen vorrangig R114 genutzt. Ein adäquater Ersatzstoff erfordert eine hohe kritische Temperatur bei niedrigem Druckniveau. Die Auswahl an dafür geeigneten Niedertemperaturkältemitteln ist jedoch sehr begrenzt.

Nach **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigen sich R134a, R152a, R227ea, R236ea/fa, R245ca/fa und R365mfc sowie die natürlichen Arbeitsmittel aus Sicht der Umweltverträglichkeit als geeignet.



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Anforderungen an Verdichter-Wärmepumpen

Fakultät Maschinenwesen
Professur für Energiesystemtechnik und Wärmewirtschaft
Professor A. Dittmann

Hochtemperaturkältemittel - Wasser

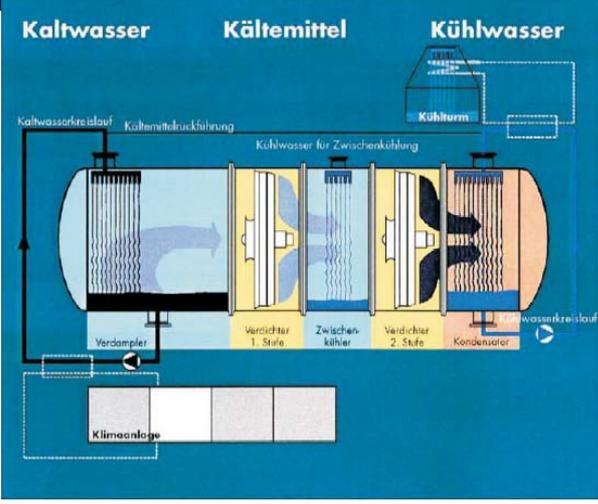
Vorteile:

- Umweltverträglich, ungiftig
- Nicht brennbar
- Weit reichend verfügbar
- Preiswert
- rel. hohe spez. Kälteleistung

Nachteile:

- Hohes spez. Dampfvolumen
- Hohe Investitionskosten (3x R134a Anlagen)
- Hohe Verdichtungsendtemperaturen
- Max. Druckverhältnis (ILK) $p_{max} = 9$

→ **Kostenintensive Neuentwicklung für Einsatz in Fernwärmenetz erforderlich**



Kaltwasseranlage der Gläsernen Manufaktur Dresden mit Wasser als Kältemittel
Quelle: ILK Dresden

19.02.2008 | 1. Glessener Fernwärmekolloquium | Robbi
Folie 14

Wasser ist in vielerlei Hinsicht ein ideales Kältemittel (Vorteile siehe Folie 14).

Jedoch weist Wasser auch deutliche Nachteile auf. Unter normalen Betriebsbedingungen besitzt es ein relativ hohes spezifisches Dampfvolumen, sodass große Turbokompressoren zum Einsatz kommen müssen. Mit Wasser arbeitende Anlagen werden auf Grund der Baugröße immer teurer in der Investition sein, als vergleichbare Systeme mit z.B. Kohlenwasserstoffen. Der derzeit einzige Marktanbieter in Deutschland, das Institut für Luft und Kältetechnik (ILK) Dresden, verkauft die selbstentwickelten Anlagen zu etwa dem dreifachen Preis konventioneller Geräte mit R134a. Bei Einsatz zur Brauchwasserbereitung entstehen wegen des hohen Isentropengütegrades von 1,33 sehr hohe Verdichtungsendtemperaturen von über 200 °C. Das ILK verwendet Radialturboverdichter mit Leitschaufeln aus Faserverbundwerkstoffen. Bei den hohen Temperaturen kann der Bestand des Harzbinders nicht garantiert werden. Für hohe Druckgastemperaturen, wie sie im Fernwärmenetz auftreten, wäre also eine kostenaufwändige Neuentwicklung notwendig /Burandt/.

Weiterhin ist mit Wasser ein sehr großer Drucksprung zu realisieren. Zwischen $t_c = 90 \text{ °C}$ und $t_0 = 45 \text{ °C}$ besteht ein Druckverhältnis von $\pi = 7,3$. Die ausgeführten Anlagen erlauben pro Verdichter ein maximales Druckverhältnis von 3,0. Nach /Burandt/ lässt sich aus werkstofftechnischer Sicht in einer zweistufigen Anlage maximal $\pi = 9$ realisieren. Dies erlaubt bei $t_c = 90 \text{ °C}$ eine minimale Verdampfungstemperatur von 41 °C, sodass eine

Anwendung im Fernwärmenetz denkbar ist. Voraussetzung sind jedoch ausreichend hohe Rücklauftemperaturen von $t_{RL,min} \geq 45 \text{ °C}$.

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass Wasser als Kältemittel dort einsatzfähig ist, wo bei hohen Wärmequelltemperaturen niedrige Druckverhältnisse π notwendig sind. Die ökologischen und auch energetischen Vorteile kommen bisher vor allem dort zum Tragen, wo eine Kaltwassererzeugung mit hohen Betriebszeiten zu realisieren ist (z. B. Prozesskühlung). Dem derzeitigen Wissenstand zufolge kann eine Weiterentwicklung für den Einsatz in Fernwärmenetzen aus ökonomischer Sicht jedoch nicht empfohlen werden.

Folie 15



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Anforderungen an Verdichter-Wärmepumpen

Fakultät Maschinenwesen
Professur für Energiesystemtechnik und Wärmewirtschaft
Professor A. Dittmann

Hochtemperaturkältemittel – CO₂ (transkritischer Prozess)

Vorteile:

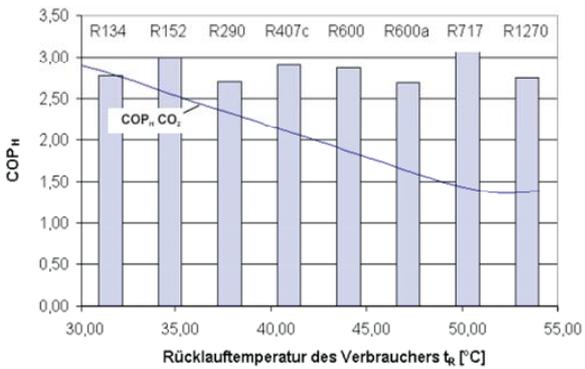
- Umweltverträglich
- Nicht brennbar
- Ungiftig (bei niedrigen Konzentrationen)
- Weit reichend verfügbar
- Preiswert (Abfallprodukt)
- Hohe volumetrische Kälteleistung
 - kleine Volumenströme
- Geringe Exergieverluste im Gaskühler

Fazit:

Zu hohe Rücklauftemperaturen im Fernwärmenetz
($t_{R,erforderlich} < 30 \text{ °C}$)

Probleme:

- Langzeitstabilität der Schmierstoffe
- Kritische Temperatur $t_{krit}=30,9\text{°C}$



Rücklauftemperatur des Verbrauchers t_R [°C]	COP_H
30,00	2,80
35,00	2,60
40,00	2,40
45,00	2,20
50,00	1,80
55,00	1,40

19.02.2008 | 1. Giessener Fernwärmekolloquium | Robbi
Folie 15

Das Kältemittel CO₂ hat, wie Wasser, den Vorteil, annähernd unbegrenzt zur Verfügung zu stehen und kann preisgünstig als Abfallprodukt anderer Umwandlungsprozesse bezogen werden. Es ist nicht brennbar und erst bei hohen Konzentrationen gesundheitsschädlich. CO₂ verfügt außerdem über eine sehr hohe volumetrische Kälteleistung, sodass nur kleine Volumenströme notwendig sind. Zudem besitzt es eine relativ niedrige Viskosität und die Druckabfälle in den Wärmeübertragern sind entsprechend geringer. Beide Aspekte führen zu niedriger Verdichterleistung und hohen Leistungszahlen. Es gilt als eines der klassischen

Arbeitsmittel, weil es bereits vor dem ersten Weltkrieg für Kühlzwecke verwendet wurde. Es stehen demnach viele Erfahrungswerte im Umgang mit CO₂ zur Verfügung.

Bei der Anwendung in der Klimatechnik wird jedoch auf Grund der sehr niedrigen Drucklage eine Anwendungsgrenze bei etwa Umgebungstemperatur gesetzt. Die kritische Temperatur liegt bei 30,9 °C. Auf Grund der starken ökologischen, ökonomischen und thermo-physikalischen Vorteile gibt es dennoch Bemühungen den Stoff auch in Wärmepumpen zu verwenden. Die unterkritische Anlagenschaltung wird dazu für überkritische Betriebsweise modifiziert. Die gleitende Temperatur bei der Wärmeabgabe auf konstantem Gasdruckniveau weist gegenüber der isothermen Wärmeabgabe energetisches Einsparpotential auf, da der Exergieverlust abnimmt. Neben vielen technischen Problemen ist CO₂ zur Rücklaufauskühlung jedoch deshalb nicht geeignet, weil Verdampfungstemperaturen unter 30 °C gehalten werden müssen. Dies wäre nur mit sehr großen Grädigkeiten in den Wärmeübertragern möglich, was exergetisch unsinnig ist.



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Anforderungen an Verdichter-Wärmepumpen

Fakultät Maschinenwesen
Professur für Energiesystemtechnik und Wärmewirtschaft
Professor A. Dittmann

Hochtemperaturkältemittel – zeotropes Gemisch: R365mfc/R227ea

Vorteile:

- Geringes Ozonabbaupotential
- Gleitende Temperatur bei Wärmeübergang
 - Hohe Leistungszahlen
- $T_{krit} = 177,4 \text{ °C}$, $p_{krit} = 28.49 \text{ bar}$

ABER

Abgesehen von Prototyp, kein erneuter Einsatz in Hochtemperatur-Wärmepumpen

Problem:

Ungewissheit mit „neuem“ Kältemittel



Quelle: FWK Hannover, Solvay Flour GmbH: Entwicklung eines Arbeitsfluides für Hochtemperaturwärmepumpen, 2005

19.02.2008 | 1. Glessener Fernwärmekolloquium | Robbi
Folie 16

In der vom FKW und Solvay durchgeführten Untersuchung /Kabelac/ zeigt sich ein zeotropes Kältemittelgemisch aus R365mfc und R227ea für Hochtemperaturwärmepumpen als besonders geeignet. Wie in Folie 16 gezeigt, besitzt es ein sehr geringes Ozonabbaupotential, eine hohe kritische Temperatur ($t_{krit} = 177,4 \text{ °C}$) bei niedrigem Dampfdruck ($p_{krit} = 28,5 \text{ bar}$) und ist relativ preiswert, da R365mfc in großem Maße in der Schaumstoffindustrie verwendet wird. Der größte Vorteil bietet sich durch die gleitenden Verdampfungs- und Kondensationstemperaturen des Gemisches, wodurch sehr niedrige exergetische Verluste und entsprechend hohe Leistungszahlen entstehen. Auch Messwerte des ersten Prototypen (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, FKW Hannover) bestätigen die theoretischen Untersuchungen und Verwendbarkeit in herkömmlichen Anlagen, jedoch zeigten sich größere Druckverluste in den Wärmeübertragern, sodass negative Abweichungen vom berechneten COP von 15 % entstanden.

Interessanter Weise bestätigte der zuständige Mitarbeiter der Hersteller- und Vertriebsfirma Solvay, dass das Gemisch bis auf den Prototypen keine weitere Verwendung fand.



Anforderungen an Verdichter-Wärmepumpen

Fakultät MaschinenwesenProfessur für Energiesystemtechnik und WärmewirtschaftProfessor A. Dittmann

Hochtemperaturkältemittel – Fazit

Es sind Hochtemperaturkältemittel verfügbar, jedoch bedarf ein Einsatz im FW-Netz:

- Sonderbau, i.B. der Verdichter (Druckfestigkeit)
- Besonderer Sicherheitsanforderungen (Brennbarkeit, Hochdruck)
- Pilotanlagen zum Test seltener Arbeitsmittel/-gemische (im Bereich WP)

Frage: Kann der ökonomische Mehraufwand bei einem Einsatz im Fernwärmenetz gerechtfertigt werden ?

19.02.2008 | 1. Glessener Fernwärmekolloquium | RobbiFolie 17

Zusammenfassend zeigt sich, dass Hochtemperaturkältemittel für einen Einsatz im Fernwärmenetz verfügbar sind aber die Anlagen besondere Anforderungen erfüllen müssen. Auf Grund der hohen notwendigen Druckfestigkeiten, können keine preisgünstigen Serienprodukte verwendet werden und der Einsatz von brennbaren Kohlenwasserstoffen erfordert besondere Sicherheitsmaßnahmen. Desweiteren sind Pilotanlagen erforderlich, um Betriebserfahrungen mit den Hochtemperaturkältemitteln sammeln zu können. Bei einer Marktrecherche stellte sich heraus, dass es Interesse an Hochtemperaturwärmepumpen gibt, bisher lehnen jedoch selbst große Hersteller von Kälteanlagen/Wärmepumpen ab, den finanziellen Mehraufwand zu tragen.



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Primärenergetische Bewertung

Fakultät Maschinenwesen
Professur für Energiesystemtechnik und Wärmewirtschaft
Professor A. Dittmann

Realisierte Anlagen in Fern-/Nahwärmenetzen



Verdichter: ABB Stal-Astra Refrigeration
 Kältemittel: R134a
 Leistung: 1 MW (Kälteleistung)
 Anwendung: Heizung im Fernwärmenetz Graz, $t_c = 75\text{ °C}$
 Abwärmennutzung von Generatoren, $t_0 = 20\text{ °C}$

Firma: FRIO THERM AG
 Kältemittel: R134a
 Leistung: 2,65 MW (Kälteleistung)
 Anwendung: Fernwärme-/Kälteversorgung in Oslo
 t_c (FW-Netz) = $35\text{ °C} / 75\text{ °C}$ (Sommer / Winter)
 t_0 (Seewasser) = $4\text{ °C} / 1,5\text{ °C}$ (Sommer / Winter)

Firma: SOLITES (Betreiber solarer Nahwärmenetze)
 Kältemittel: R134a
 Leistung: 100 kW (Heizleistung)
 Anwendung: Bsp: Rostock
 $t_{NT,AUS}$ (NW-Netz) = $45-50\text{ °C}$
 $t_{AF,EIN}$ (Aquifer) = $35\text{ °C} / 10\text{ °C}$ (Sommer/Winter)

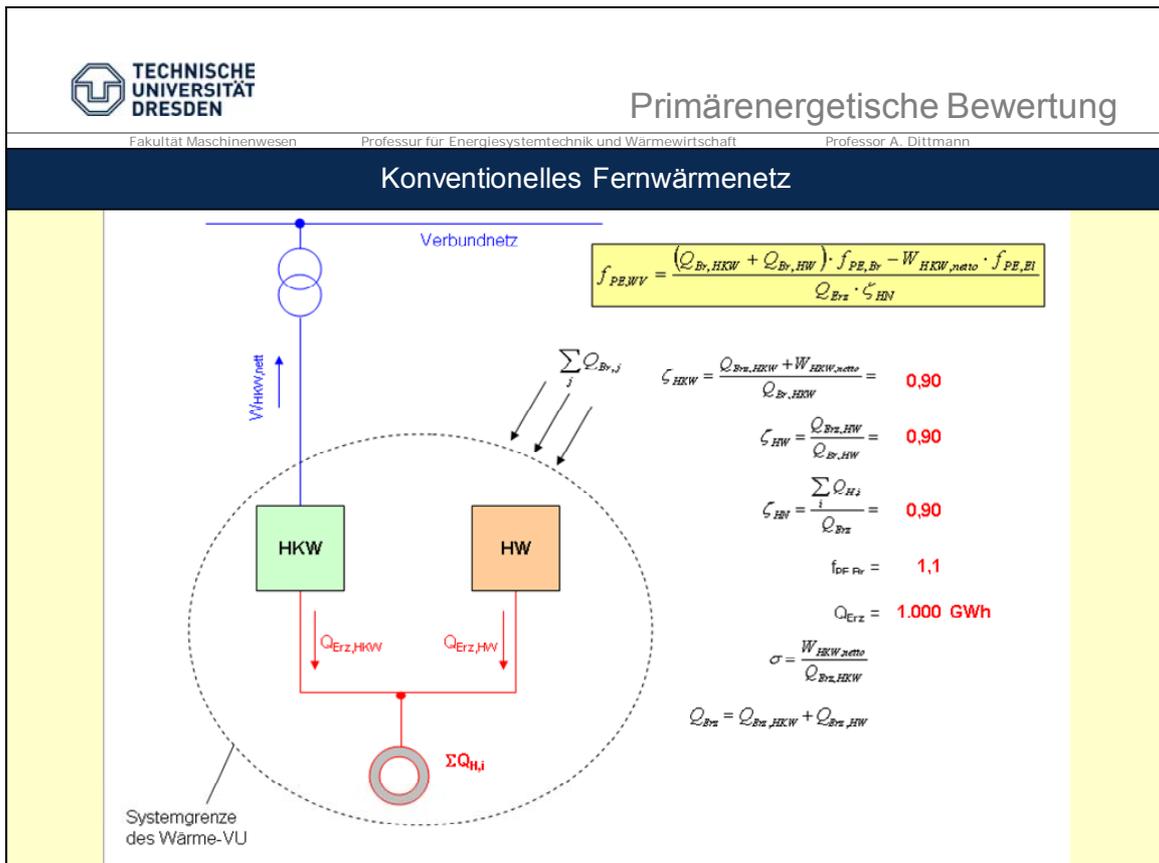
Hersteller: ABB Staal-Asta Refrigeration,
Fernwärmenetz Graz

19.02.2008 | 1. Glessener Fernwärmekolloquium | Robbi
Folie 18

Es gibt bisher nur wenige **realisierte Wärmepumpen in Fern- und Nahwärmenetzen** und dem Autor sind keine Anlagen bekannt, die einer Rücklaufabkühlung auf hohem Temperaturniveau ($t_R = 60\text{ °C}$) dienen.

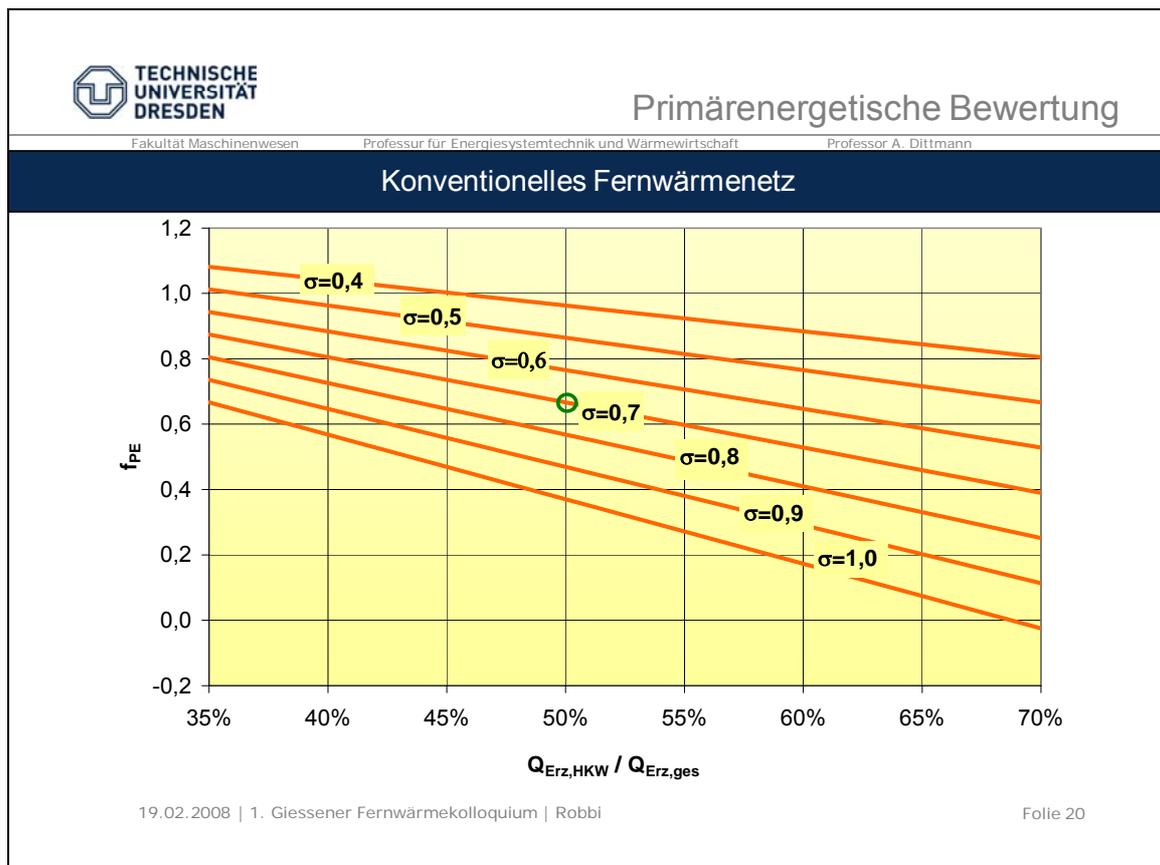
Wie jedoch erste Auswertungen einer Kraftwerksrechnungen mit gesenkten Rücklauftemperaturen zeigen /Rhein/, /Wirths/, kann der Wärmepumpeneinsatz zur Effizienzsteigerung sowie zum sinnvollen Einsatz regenerativer Energien hilfreich sein.

Die installierten Großwärmepumpen in Fernwärmenetzen nutzen Verdampfungstemperaturen zwischen 20 °C und 40 °C sowie Kondensationstemperaturen bis 85 °C . Folie 18 zeigt einige ausgewählte Beispiele.

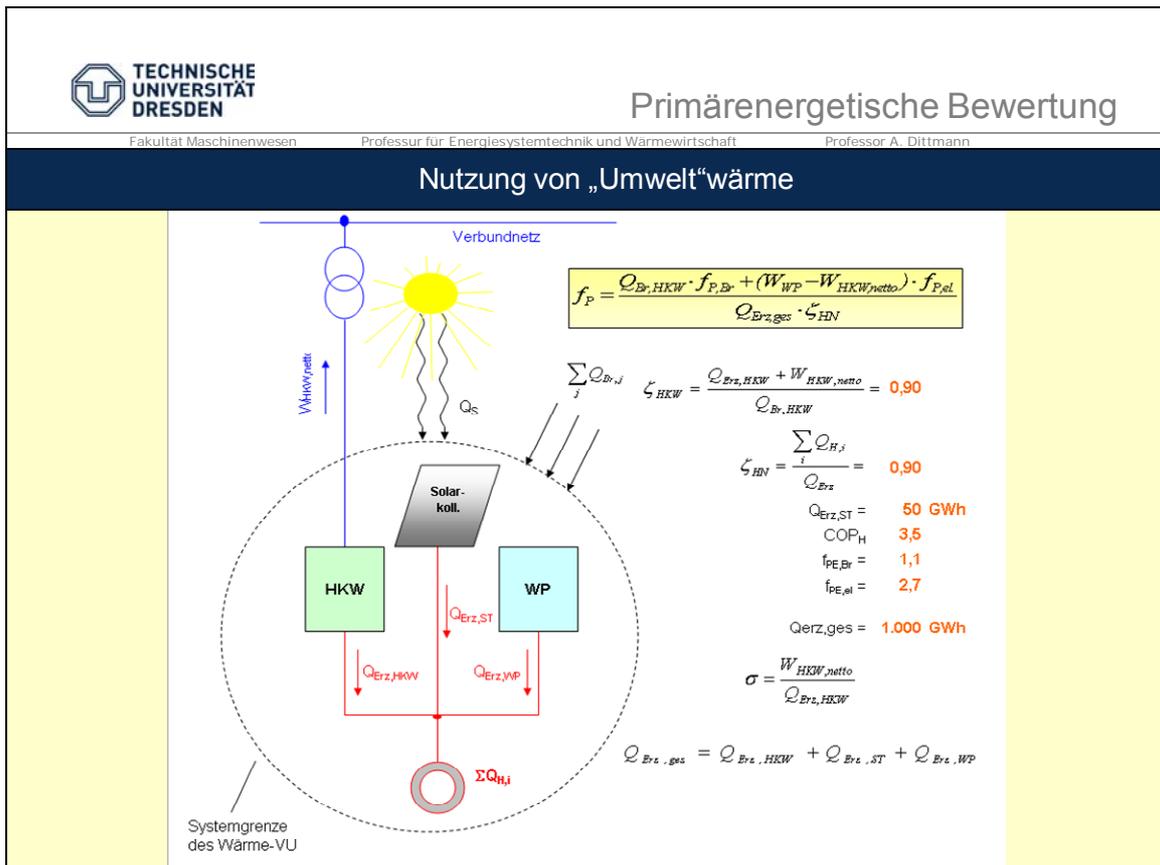


Um die Sinnhaftigkeit eines Einsatzes von Wärmepumpen abschätzen zu können, soll im Folgenden eine **primärenergetische Bewertung** vorgenommen werden. Als Referenz dient das in Folie 19 dargestellte Fernwärmenetz, bestehend aus einem Heizkraftwerk, sowie einem Heizwerk.

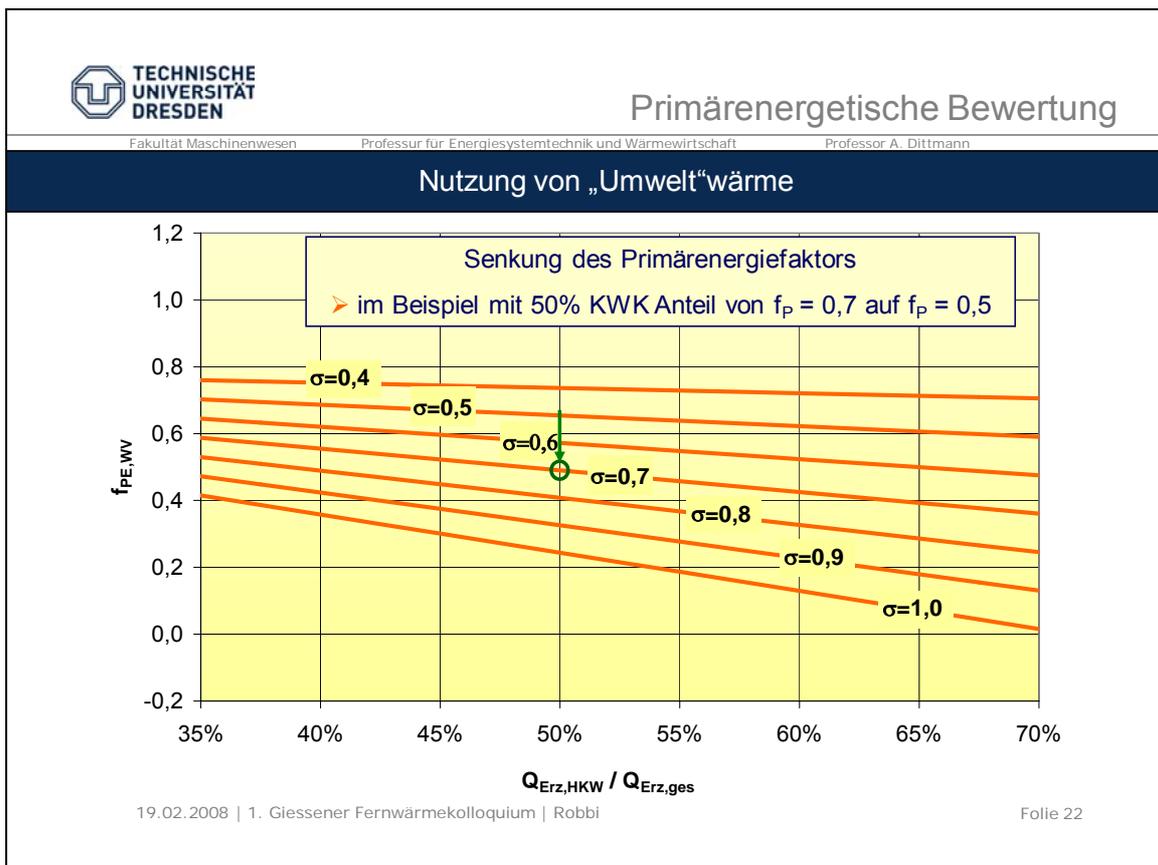
Eine geeignete Bewertungsgröße ist der Primärenergiefaktor f_p . Nach (DIN 4701-10) gibt er die Primärenergie an, welche für die vom Kunden abgenommene Fernwärme notwendig ist. Bei den einzelnen Rohstoffen wird die gesamte Prozesskette von der Gewinnung über Transport bis zur Umwandlung und die entsprechenden Verluste berücksichtigt.



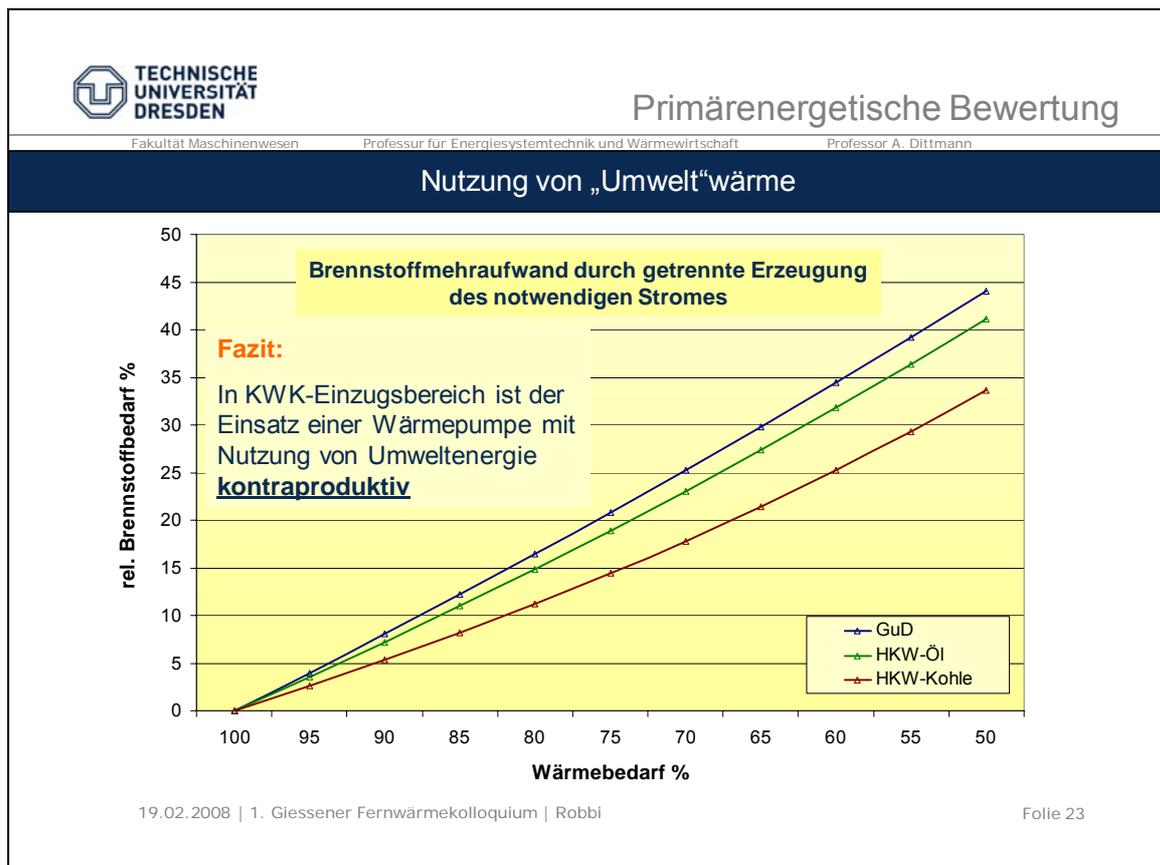
Wie in Folie 20 dargestellt, sinkt der Primärenergiefaktor des Fernwärmenetzes, das heißt die zur Wärmebereitstellung notwendige Primärenergie, mit steigendem Anteil des HKW und mit steigender Stromkennzahl σ . Im gewählten Beispiel mit einem Anteil des HKW von 50 % im gesamten Netz und einer Stromkennzahl von 0,7 beträgt $f_P = 0,68$.



In Folie 21 wird das Heizwerk durch eine Wärmepumpe mit Nutzung von Umweltwärme, wie z.B. Sole/Wasser und einen Teil Solarthermie ersetzt. Die für diese beiden Wärmeerzeuger notwendige Primärenergie wird dem Primärenergiefaktor für regenerative Energien (mit Ausnahme Holz) von $f_P = 0$ multipliziert, wodurch f_P für das Fernwärmenetz sinkt. Die für den Wärmepumpeneinsatz notwendige elektrische Arbeit (Verdichterantrieb) W_{WP} wird als Hilfsenergie von der eingespeisten elektrischen Arbeit des HKW W_{HKW} subtrahiert.



Nach Folie 22 zeigt sich, dass es trotz der zusätzlichen Verdichterarbeit zu einer Senkung des primärenergetischen Aufwandes kommt.



Anders zeigt sich die Darstellung, wenn die Wärmepumpe nicht bestehende Heizwerke ersetzt, sondern mit KWK erzeugte Wärme aus dem Netz verdrängt, in dem sie parallel einspeist. Der relative Anteil des HKW sinkt in diesem Fall, was in Folie 23 mit einer Reduktion des relativen Wärmebedarfs gleichgesetzt wird. Weil die Wärme der Kunden nicht in Kraft-Wärme-Kopplung erzeugt worden ist, muss der notwendige Strom getrennt generiert werden. Die Referenzwirkungsgrade nach (FW 308) für eine getrennte Erzeugung von elektrischer Arbeit und Wärme bewirken eine Steigerung des Gesamtbrennstoffbedarfs.

Der Einsatz einer Wärmepumpe mit Nutzung von Umweltenergie im Einzugsbereich der KWK ist demnach kontraproduktiv.



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Primärenergetische Bewertung

Fakultät MaschinenwesenProfessur für Energiesystemtechnik und WärmewirtschaftProfessor A. Dittmann

Rücklaufauskühlung

Frage:

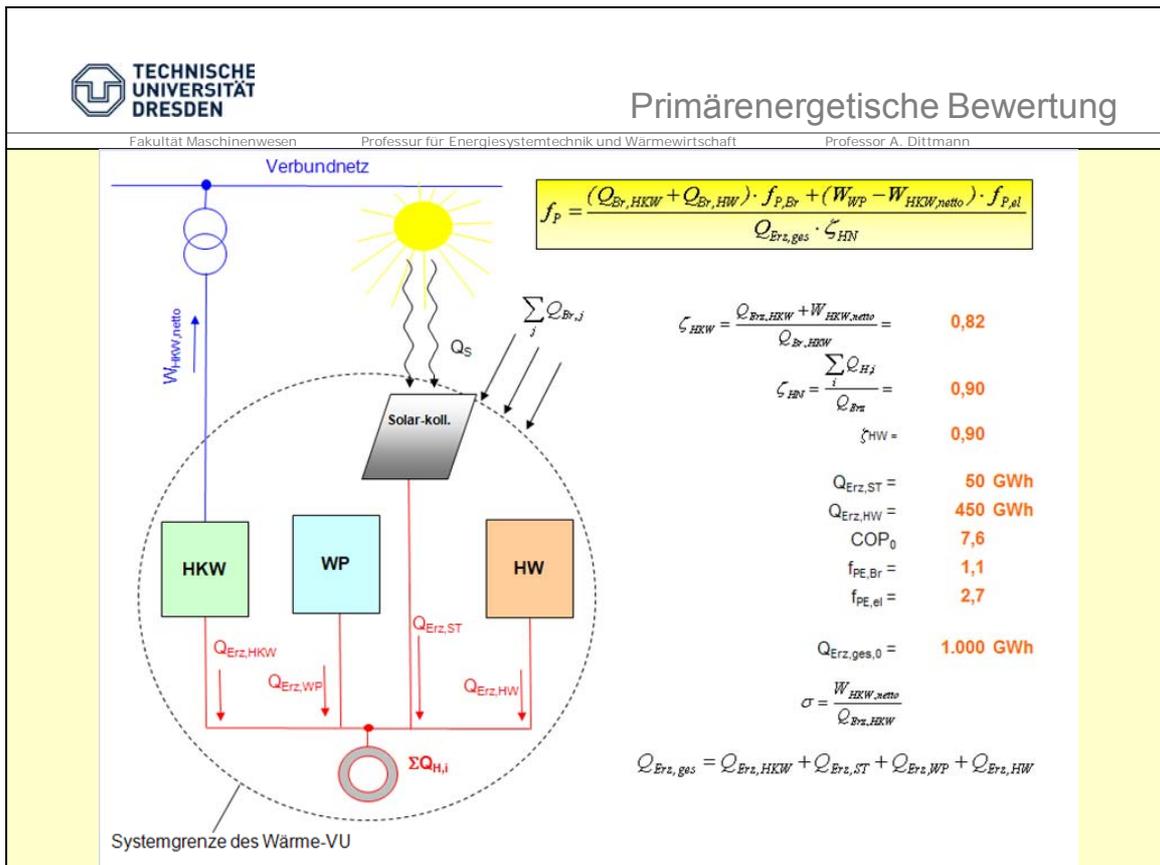
Wie beeinflussen sich bei einem **Wärmepumpeneinsatz im Rücklauf:**

- Mehraufwand an Hilfsenergie (Verdichterarbeit) f_p ↑
- Sinkende Rücklauftemperatur
 - steigende Stromkennzahl (EGD) f_p ↓
 - steigender Brennstoffausnutzungsgrad (EK) f_p ↓

19.02.2008 | 1. Glessener Fernwärmekolloquium | RobbiFolie 24

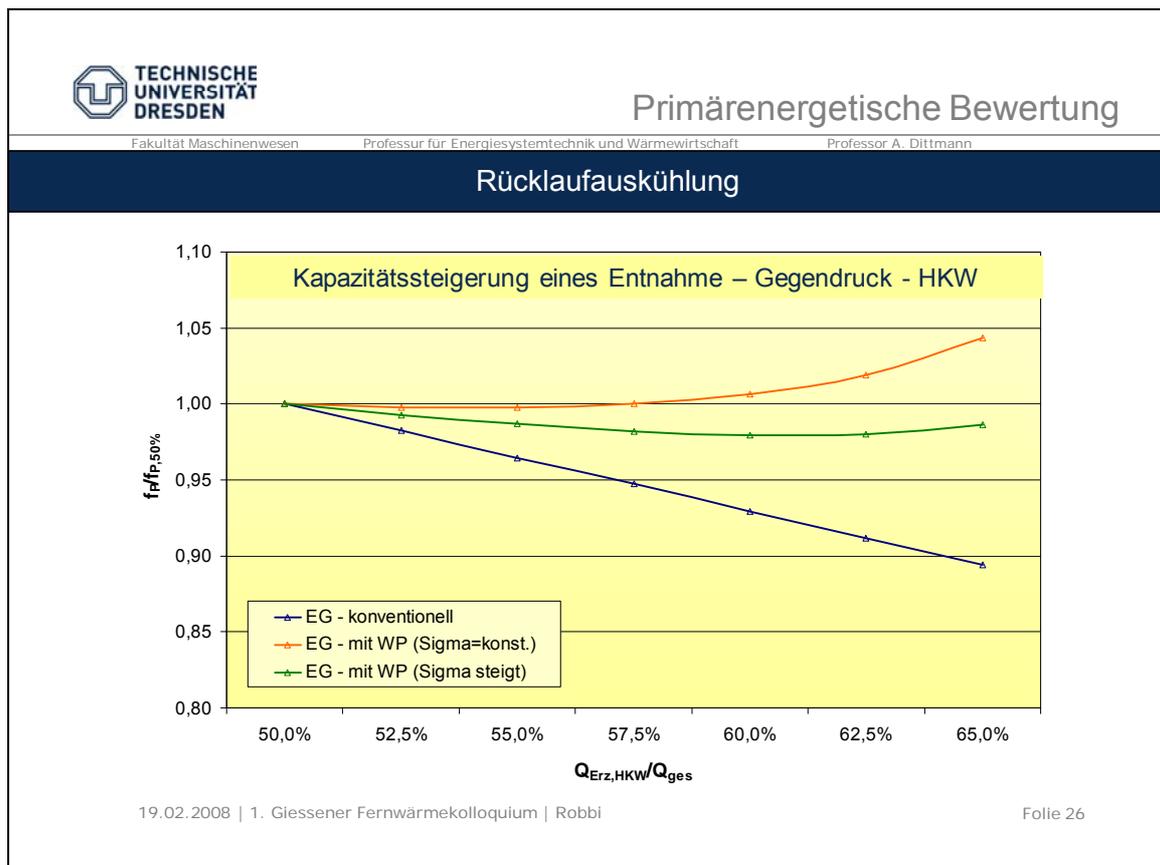
Was geschieht nun aber bei der **Rücklaufauskühlung aus primärenergetischer Sicht** (Folie 24)?

In diesem Fall sind zwei gegenläufige Tendenzen festzustellen. Zum Einen steigt der Brennstoffmehraufwand durch die zusätzlich notwendige Verdichterarbeit. Andererseits verbessern sich die kraftwerksseitigen Betriebsbedingungen, wodurch der Primärenergieaufwand reduziert wird.



Das exemplarisch zu untersuchende System nach Folie 25 beinhaltet ein Heizkraftwerk, welches Strom und Wärme generiert und einspeist, ein Heizwerk, einen geringen Teil Solarthermie und eine Kompressionswärmepumpe, welche den Rücklauf in Nähe des HKW auskühlt. Die von der Wärmepumpe entnommene Wärme wird vollständig vom HKW nachgespeist.

Für die Berechnungsergebnisse der nächsten Seiten wurden Wärmepumpenkennlinien einer einstufigen Ammoniak Anlage für $t_{VL} = 90 \text{ °C}$ hinterlegt und die Rücklauftemperatur wird ausgehend von 60 °C , entsprechend der entnommenen Leistung, gesenkt.

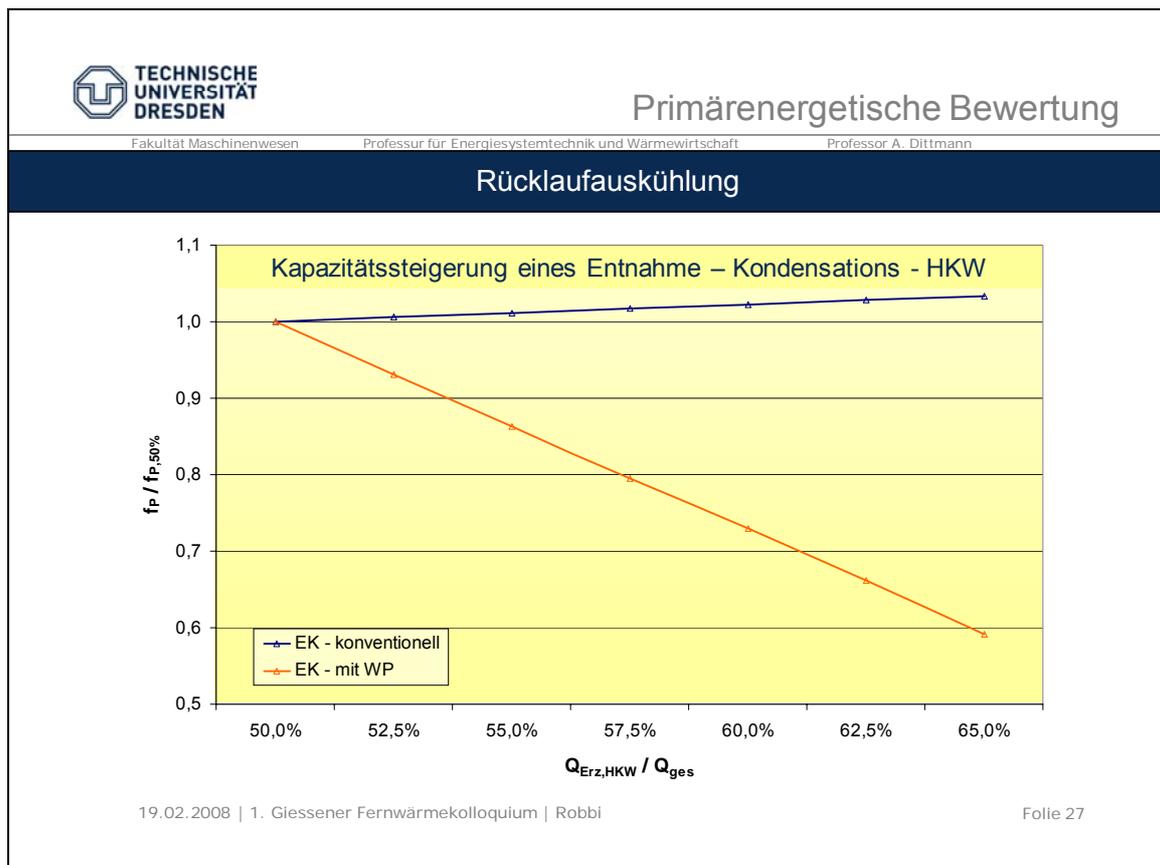


Für ein ideales, reversibles Entnahme-Gegendruck-Heizkraftwerk nach Folie 26 /Wirths/ zeigt sich, dass mit Kapazitätssteigerung des HKW durch Netzausbau/Erweiterung der Primärenergiefaktor sinkt (blaue Linie).

Wird statt der (konventionellen) Erhöhung des Massestromes (Netzausbau) eine Wärmepumpe an den Rücklauf angeschlossen, muss das HKW ebenfalls mehr Wärme einspeisen und generiert entsprechend mehr Strom – f_p des FW-Netzes sinkt leicht (orangene Linie). Jedoch wirkt der zusätzlichen Auskopplung an elektrischer Arbeit der Mehraufwand durch den Verdichter entgegen und die Kurve beginnt bei etwa 54 % HKW in Netz zu steigen.

Werden nun auch die Änderungen im Kraftwerk selbst berücksichtigt, in diesem Fall die steigende Stromkennzahl, ist ein wesentlich besserer Verlauf des Primärenergiefaktors zu beobachten.

Insgesamt wird durch Wärmauskühlung des Fernwärmerücklaufes jedoch nicht die primärenergetische Güte erreicht, wie sie bei einer konventionellen Kapazitätssteigerung des HKW durch größeren Wassermassetrom im FW-Netz zu erzielen ist.



Ein anderes Bild zeigt sich bei einem idealen, reversiblen Entnahme-Kondensations-HKW nach Folie 27 /Wirths/. Hier steigt bei Kraftwerkserweiterung der Primärenergiefaktor leicht an, da der Anteil an Solarthermie im Netz sinkt. Eine Rücklaufauskühlung bewirkt jedoch eine zusätzliche Wärmeabgabe des HKW, was bei einer Kond.-Anlage dadurch geschieht, dass weniger über den Kühlturm abgeführt wird /Rhein/.

Dieser Effekt wiegt wesentlich mehr, als die zusätzliche Verdichterarbeit und die sinkende Leistungszahl der Wärmepumpe bei größerem Temperaturhub (diese steigt bei steigender Wärmeauskopplung). Folglich sinkt der Primärenergetische Aufwand stark ab.



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Primärenergetische Bewertung

Fakultät MaschinenwesenProfessur für Energiesystemtechnik und WärmewirtschaftProfessor A. Dittmann

Zusammenfassung

Der Einsatz einer Verdichter - Wärmepumpe zur Rücklaufauskühlung ist:

- Technisch realisierbar, zur Zeit gibt es jedoch keine standardisierten Anlagen
 - Kostenintensiver Sonderanlagenbau
- Gegenüber einem konventionellen Fernwärmeanschluss sinnvoll, in Netzen mit hohem Anteil aus
 - Entnahme – Kondensations – HKW erzeugter Wärme
- vorteilhaft* bei:
 - Neuanschluss bei hydraulisch ausgelasteten Netzen
 - Neuanschluss, verbunden mit kostenintensivem Netzausbau, z.B. im innerstädtischen Bereich

* Wirtschaftlichkeit muss an konkretem Objekt abgeschätzt werden und ergibt sich aus der Gegenüberstellung: Investitionskosten der WP+ Stromkosten Verdichterarbeit ↔ Investitionskosten der Rohmeterweiterung + zusätzliche el. Arbeit der Netzpumpen

19.02.2008 | 1. Gießener Fernwärmekolloquium | RobbiFolie 28

Es kann also **zusammenfassend** gesagt werden:

- Hochtemperaturwärmepumpen sind technisch realisierbar und geeignete Kältemittel für eine Anwendung in Fernwärmenetzen verfügbar.
- Bisher gibt es jedoch keine realisierten Anlagen zur Rücklaufauskühlung eines hohen Temperaturniveaus ($t_R > 40 \text{ °C}$) und auch keine entsprechenden, standardisierten Verdichter. In einer Marktrecherche konnte nur ein Hersteller von Verdichtern mit hoher Leistung und ausreichend Druckfestigkeit gefunden werden, der jedoch noch nicht frei am Markt verfügbar ist.
- Ein (kostenintensiver) Sonderanlagenbau ist also unumgänglich.
- Der monetäre Mehraufwand kann sich bei Entnahme-Kondensations-HKW als günstig erweisen, da bei diesen Anlagen ein primärenergetischer Einspareffekt erzielt werden kann.

- Unabhängig von allen primärenergetischen Auswirkungen, kann eine Rücklauf-
auskühlung dort sinnvoll, sein wo:
 - Transportleitungen auf Grund von größeren Spreizungen geringer
dimensioniert werden können,
 - Ein Neuanschluss an hydraulisch ausgelasteten Netzen nicht anders möglich
ist
 - Oder eine Netzerweiterung (besonders im innerstädtischen Bereich) mit so
hohen Kosten verbunden ist, dass ein Wärmepumpenanschluss
kostensparend wirkt.



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN

Fakultät Maschinenwesen Institut für Energiesystemtechnik und Wärmewirtschaft Professor A. Dittmann



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !

Dipl.-Ing. Steffen Robbi
Tel. (0351) 463-34709
steffen.robbi@tu-dresden.de

Ausformulierte Version ist NICHT auf CD enthalten,
Zum download verfügbar unter:
[http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/
fakultaeten/fakultaet_maschinenwesen/iet/ew/ma_ew/robbi](http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_maschinenwesen/iet/ew/ma_ew/robbi)

Vielen Dank auch für die Zusammenarbeit im Institut und besonders die Kooperation und Hilfe im Team des Forschungsthemas Multilevel-District-Heating.

Literatur

/Burandt/	Burandt Dr. persönliche Informationen. - 2007
/Kabelac/	Kabelac F. und Stadtländer C. Entwicklung eines Arbeitsfluides für Hochtemperaturwärmepumpen. 2006
/Pohlmann/	Pohlmann Taschenbuch der Kältetechnik. C.F.Müller, 2005.
/Rhein/	Rhein M. Firmeninterne Zuarbeit. - 2008
/Wirths/	Wirths A.: Wärmeversorgung aus dem Netzurücklauf, Stand der Technik und Perspektiven für den Netzausbau, Manuskript zum 1. Fernwärmekolloquium Gießen, 19.02.2008

Technische Regeln

DIN E 389-1, 2003	Kälteanlagen und Wärmepumpen - Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen.
Verordnung (EG) Nr. 2037/2000	des Europäischen Parlamentes und des Rates über Stoffe, die zum Abbau der Ozonschicht führen. - 2000. Verordnung zum Verbot von bestimmten die Ozonschicht abbauenden Halogenwasserstoffen - FCKW-Halon-Verbots-Verordnung, 1991
DIN 4701-10	Energetische Bewertung Heizungs- und Raumluftechnischer Anlagen
FW 308	Zertifizierung von KWK-Anlagen, Ermittlung des KWK-Stromes