

Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung

Planung, Bau und Betrieb von
Wärmerückgewinnungs- und
Abwärmenutzungsanlagen

RAVEL im Wärmesektor
Heft 2



Impulsprogramm RAVEL
Bundesamt für Konjunkturfragen

«RAVEL im Wärmesektor» in 4 Heften

Energieeffiziente Techniken werden in nächster Zukunft stark an Bedeutung gewinnen. Über dieses Thema ist heute erst wenig in Lehrbüchern zu finden. In drei RAVEL-Kursen – «Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung», «Wärmepumpen» sowie «Wärme kraftkopplung» – können sich deshalb Planerinnen und Planer auf diesem zukunftssträchtigen Gebiet weiterbilden. Die dazu erscheinende Publikationsreihe «RAVEL im Wärmesektor» besteht aus vier Heften, wobei Heft 1 als Grundlage an allen drei Kursen abgegeben wird. Die Hefte können bei der Eidgenössischen Drucksachen- und Materialzentrale, 3000 Bern, bezogen werden.

Heft 1: Elektrizität und Wärme – Grundlagen und Zusammenhänge (Best.-Nr. 724.357d)

Heft 2: Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung (Best.-Nr. 724.355d)

Heft 3: Wärmepumpen (Best.-Nr. 724.356d)

Heft 4: Wärme kraftkopplung (Best.-Nr. 724.358d)



Wichtige Merkmale



Hinweise innerhalb der Reihe «RAVEL im Wärmesektor» (siehe oben)



Weiterführende Literatur



Softwarehinweise



Berechnungsbeispiele



Benennungen, Formelzeichen und Abkürzungen auf Seite 55

INDEX

Index auf Seite 56

Autoren

Robert Brunner, Dr. Brunner & Partner AG,
Industriestrasse 5, 5432 Neuenhof
Viktor Kyburz, Infoenergie,
Kindergartenstrasse 1, 5200 Windisch

Experten

Hanspeter Pfenninger, Konvekta AG,
9015 St. Gallen
Erich Thoma, F. Hoffmann - La Roche AG,
4002 Basel

Redaktion und Gestaltung

Hans Rudolf Gabathuler, Gabathuler AG,
Kirchgasse 23, 8253 Diessenhofen

Grafik

Monika Ehrat, 8240 Thayngen

Druckkoordination

APUI, Hochfeldstrasse 113, 3000 Bern 26

Trägerorganisation

SBHI Schweizerische Beratende Haustechnik- und
Energie-Ingenieure, Schermenwaldstr. 10, 3063
Ittigen

Patronat

STV Schweizerischer Technischer Verband
SWKI Schweizerischer Verein von Wärme- und Klima-
Ingenieuren
VSHL Verband Schweizerischer Heizungs- und
Lüftungsfirmen
VSSH Vereinigung Schweizerischer Sanitär- und
Heizungsfachleute

Copyright © Bundesamt für Konjunkturfragen, 3003 Bern,
Januar 1993. Auszugsweiser Nachdruck unter
Quellenangabe erlaubt. Zu beziehen bei der Eid-
genössischen Drucksachen- und Materialzentrale, 3000
Bern. (Best.-Nr. 724.355d)
Form. 724.355d 3.93 2000 62733

Vorwort

Das Aktionsprogramm «Bau und Energie» ist auf 6 Jahre befristet (1990-1995) und setzt sich aus den drei Impulsprogrammen (IP) zusammen:

- BAU – Erhaltung und Erneuerung
- RAVEL – Rationelle Verwendung von Elektrizität
- PACER – Erneuerbare Energien

Mit den Impulsprogrammen, die in enger Kooperation von Wirtschaft, Schulen und Bund durchgeführt werden, soll der qualitative Wertschöpfungsprozess unterstützt werden. Dieser ist gekennzeichnet durch geringeren Aufwand an nicht erneuerbaren Rohstoffen und Energie sowie abnehmende Umweltbelastung, dafür gesteigerten Einsatz von Fähigkeitskapital.

Im Zentrum der Aktivität von RAVEL steht die Verbesserung der fachlichen Kompetenz, Strom rationell zu verwenden. Neben den bisher im Vordergrund stehenden Produktions- und Sicherheitsaspekten soll verstärkt die wirkungsgradorientierte Sicht treten. Aufgrund einer Verbrauchsmatrix hat RAVEL die zu behandelnden Themen breit abgesteckt. Neben den Stromanwendungen in Gebäuden kommen auch Prozesse in der Industrie, im Gewerbe und im Dienstleistungsbereich zum Zuge. Entsprechend vielfältig sind die angesprochenen Zielgruppen: Sie umfassen Fachleute auf allen Ausbildungsstufen wie auch Entscheidungsträger, die über stromrelevante Abläufe und Investitionen zu befinden haben.

Kurse, Veranstaltungen, Publikationen, Videos

Umgesetzt werden sollen die Ziele von RAVEL durch Untersuchungsprojekte zur Verbreiterung der Wissensbasis und – darauf aufbauend – Aus- und Weiterbildung sowie Informationen. Die Wissensvermittlung ist auf die Verwendung in der täglichen Praxis ausgerichtet. Sie baut hauptsächlich auf Publikationen, Kursen und Veranstaltungen auf. Es ist vorgesehen, jährlich eine RAVEL-Tagung durchzuführen, an der jeweils – zu einem Leitthema – umfassend über neue Ergebnisse, Entwicklungen und Tendenzen in der jungen faszinierenden Disziplin der rationellen Verwendung von Elektrizität informiert und diskutiert wird. Interessenten können sich über das breitgefächerte, zielgruppenorientierte Weiterbildungsangebot in der Zeitschrift IMPULS informieren. Sie erscheint zwei- bis dreimal jährlich und ist (im Abonnement) beim Bundesamt für Konjunkturfragen, 3003 Bern, gratis erhältlich. Jedem Kurs- oder Veranstaltungsteilnehmer wird jeweils eine Dokumentation abgegeben. Diese besteht zur Hauptsache aus der für den entsprechenden Anlass erarbeiteten Fachpublikation. Die Publikationen können auch

unabhängig von Kursbesuchen bei der Eidgenössischen Drucksachen- und Materialzentrale (EDMZ), 3000 Bern, bezogen werden.

Zuständigkeiten

Um das ambitionöse Bildungsprogramm bewältigen zu können, wurde ein Organisations- und Bearbeitungskonzept gewählt, das neben der kompetenten Bearbeitung durch Spezialisten auch die Beachtung der Schnittstellen im Bereich der Stromanwendung sowie die erforderliche Abstützung bei Verbänden und Schulen der beteiligten Branchen sicherstellt. Eine aus Vertretern der interessierten Verbände, Schulen und Organisationen bestehende Kommission legt die Inhalte des Programmes fest und stellt die Koordination mit den übrigen Aktivitäten, die den rationellen Einsatz der Elektrizität anstreben, sicher. Branchenorganisationen übernehmen die Durchführung der Weiterbildungs- und Informationsangebote. Für deren Vorbereitung ist das Programmleitungsteam (Dr. Roland Walthert, Werner Böhi, Dr. Eric Bush, Jean-Marc Chuard, Hans Rudolf Gabathuler, Jürg Nipkow, Ruedi Spalinger, Dr. Daniel Spreng, Felix Walter, Dr. Charles Weinmann sowie Eric Mosimann, BfK) verantwortlich. Die Sachbearbeitung wird im Rahmen von Ressorts durch Projektgruppen erbracht, die inhaltlich, zeitlich und kostenmässig definierte Einzelaufgaben (Untersuchungs- und Umsetzungsprojekte) zu lösen haben.

Dokumentation

Nach einer Vernehmlassung und dem Anwendungstest in einem Pilotkurs ist die vorliegende Dokumentation sorgfältig überarbeitet worden. Dennoch hatten die Autoren freie Hand, unterschiedliche Ansichten über einzelne Fragen nach eigenem Ermessen zu beurteilen und zu berücksichtigen. Sie tragen denn auch die Verantwortung für die Texte. Unzulänglichkeiten, die sich bei der praktischen Anwendung ergeben, können bei einer allfälligen Überarbeitung behoben werden. Anregungen nehmen das Bundesamt für Konjunkturfragen und der Redaktor (siehe Seite 2) entgegen. Für die wertvolle Mitarbeit zum Gelingen der vorliegenden Publikation sei an dieser Stelle allen Beteiligten bestens gedankt.

Januar 1993

Dr. H. Kneubühler
Stv. Direktor des Bundesamtes
für Konjunkturfragen

Inhaltsverzeichnis

1.	WRG/AWN und rationeller Einsatz von Elektrizität	5	Zuerst den Energieverbrauch senken!	33
1.1	Die Stellung der WRG/AWN im Energiekonzept	5	Anwendung der RAVEL-Checklisten	33
	Begriffe	5	Quellen- und Senkenparameter	34
	Abgrenzung	5	Vernetzungsparameter	34
	Massnahmen	5	Weitere Vernetzungsaspekte	36
1.2	WRG/AWN und RAVEL	6	Wirtschaftliche Kriterien	36
	Was hat WRG/AWN mit RAVEL zu tun?	6	Externe Kosten	37
	Anwendungsgebiete im Hinblick auf RAVEL	6	4.2 Messmethoden	37
2.	Komponenten und Systeme.....	9	4.3 Lösungsfindung	39
2.1	Systemübersicht	9	4.4 Planungsphasen	40
	Kategorien	9	Anhang.....	41
	Verfahren zur WRG aus Fortluft	9	A. Anwendungsbereiche	41
	WRG in industriellen Fortluftanlagen	9	WRG im Komfortbereich	41
	Verfahren zur WRG/AWN aus Gasen und Flüssigkeiten	10	WRG in der Industrie	41
	Hydraulische Schaltungen	10	Prozesslufttechnische Anlagen	41
	Leistungsregelung	10	Kälteanlagen	41
	Vereisungsgefahr	11	Druckluftherzeugung	42
	Kontamination	11	Allgemeine Industriesituation	42
	Hilfsenergie	11	Beispiel Chemische Industrie	43
	Reinigungsmöglichkeit	11	Wärmeübertragung über Sicherheitsbarrieren	44
	Lieferform und Grösse	14	Wärmekraftkopplung	44
	Leistungsangaben	14	ORC-Anlagen	44
2.2	Rekuperative Systeme	14	B. Fallbeispiele	45
	Platten- und Röhrenwärmetauscher für Luft	14	Filmentwicklungsbetrieb	45
	Plattenwärmetauscher für Flüssigkeiten	15	«Sanfte Kühlung»	46
	Röhrenwärmetauscher	16	Klimakälte im Winter.....	47
	Einsatz der Röhrenwärmetauscher als Verflüssiger in der Kältetechnik	17	Wärme- und Kühlverbund	48
	Weitere Anwendungen rekuperativer Wärmetauscher.....	17	C. Pinch Design Method	49
2.3	Regenerative Systeme	18	D. RAVEL-Checklisten	51
	Kreislaufverbund	18	RAVEL-Checkliste «Wärmequelle»	51
	Wärmerohr	19	RAVEL-Checkliste «Wärmesenke»	51
	Rotationswärmetauscher	19	Vernetzung.....	51
2.4	Wärmepumpen und Wärmetransformatoren	20	Benennungen, Formelzeichen, Abkürzungen.....	55
	Wärmepumpen	20	Index 56	
	Brüdenkompression	21		
	Wärmetransformatoren.....	22		
3.	Grundlagen	23		
3.1	Abwärme	23		
3.2	Wärmetauscher	24		
	Wärmeübertragung	24		
	Druckabfall	25		
3.3	Kenngrössen	26		
	Wirkungsgrade beim Wärmeaustausch	26		
	Elektro-Thermo-Verstärkung	27		
3.4	Auslegung und Optimierung	27		
	Vorsicht bei Temperaturwirkungsgradangaben!	27		
	Jährlicher Wärmerückgewinn	28		
	Optimierung.....	30		
	Maximaler Netto-Energierückgewinn	30		
	Maximaler finanzieller Gewinn	30		
3.5	Wirtschaftlichkeit	31		
4.	Planungshinweise	33		
4.1	RAVEL-Checklisten	33		

1. WRG/AWN und rationeller Einsatz von Elektrizität

1.1 Die Stellung der WRG/AWN im Energiekonzept

Begriffe

Wärmerückgewinnung (WRG) und Abwärmenutzung (AWN) sind Techniken zum rationellen Einsatz der Energie. Sie erlauben Prozesse wirtschaftlicher zu führen und tragen zur Umweltschonung bei. WRG und AWN unterscheiden sich durch die Führung des Abwärmestroms bezüglich der Systemgrenzen (Kasten 1)¹.

Abgrenzung

WRG/AWN wird in praktisch allen technischen Disziplinen angewandt. Der Schwerpunkt der vorliegenden Betrachtungen wird auf die WRG/AWN im Gebiet der Haustechnik und auf die AWN von Prozesstechnik-Wärmequellen in der Haustechnik gelegt (Tabelle 2). Die AWN von Haustechnik-Wärmequellen für die Prozesstechnik kommt selten vor. WRG/AWN im Gebiet der industriellen Prozesstechnik ist ein Spezialgebiet; die notwendigen vielfältigen prozessspezifischen Randbedingungen würden den Rahmen dieser Publikation sprengen.

Massnahmen

Nutzung von Abwärme ist prinzipiell erst dann vorzusehen, wenn alle vertretbaren Möglichkeiten zur Vermeidung von Abwärme sowie zur rationellen Wärmebedarfsdeckung ausgeschöpft sind. Eine bewährte Reihenfolge von Massnahmen, die sich gebietsspezifisch in der Begriffswahl unterscheiden, zeigt Tabelle 3. Im Industriebereich steht die Produktion und deren Rationalisierung im Vordergrund. Im Wohnbereich geht es um die Bereitstellung von Komfortwärme bei möglichst tiefem Verbrauch.

Eine willkürliche Auswahl von konkreten Massnahmen für die sinnvolle Nutzung der Energie im Wohn- und Industriebereich, unterschieden nach Aufwand, ist in Tabelle 4 dargestellt.

WRG/AWN-Massnahmen sind – selbst bei hohen Investitionskosten – in vielen Fällen wirtschaftlich, so dass bei Neuanlagen und Sanierungen immer seriöse Vorabklärungen unternommen werden sollten. Für die eigentliche Funktion einer Anlage ist WRG/AWN zwar

WärmeRückGewinnung, kurz WRG

Die bei einem Prozess anfallende unvermeidbare Abwärme wird dem gleichen Prozess ohne wesentliche Zeitverschiebung wieder zugeführt. Ideal ist die Übereinstimmung von Quelle und Verbraucher bezüglich Zeit und Menge. Es wird ein höherer Anlagenutzungsgrad erreicht.

AbWärmeNutzung, kurz AWN

Die bei einem Prozess anfallende unvermeidbare Abwärme wird bei anderen Prozessen gleichzeitig oder zeitverschoben weiter genutzt. Besondere Aufmerksamkeit ist der Anpassung von Wärmeangebot und Wärmebedarf zu widmen; oft sind Wärmespeicher notwendig. Die Gesamtenergienutzung wird durch die Verbundbildung verbessert, der Nutzungsgrad der Einzelanlagen bleibt aber unangetastet. Hinsichtlich dem Verwendungsort der Abwärme ist zu unterscheiden zwischen der Nutzung betriebsintern in einem andern Prozess (interne AWN) und der Nutzung durch Dritte ausserhalb des Betriebes (externe AWN).

 Heft 1, Abschnitt 3.1

Kasten 1

		Senken	
		Haus-technik	Prozess-technik
Quellen	Haus-technik	WRG AWN	AWN (selten)
	Prozess-technik	AWN	WRG AWN (Spezialgebiet)

Tabelle 2: Abgrenzung der zu bearbeitenden Bereiche; das Schwergewicht dieser Publikation liegt im bezeichneten Bereich

¹ Hinweis: Die Umluftbeimischung in Lüftungsanlagen wird nicht zur WRG gezählt, da es sich um eine Bedarfsreduktion (kleinerer Luftwechsel) handelt.

		Einsatz	Aufwand
1.	Vermeidung unnötigen Verbrauchs	I	klein
	Bedarf reduzieren	H	klein
	Bedienung	I,H	klein
	Wartung	I,H	klein
2.	Senkung des spezifischen Energiebedarfs	I	mittel
	Verluste vermindern	H	mittel
3.	Steigerung der energetischen Nutzungsgrade	I	mittel
	Gute Regelung	I,H	mittel
	Nutzung der freien Wärme diffuser Wärmequellen	H	mittel
4.	Energierückgewinnung	I	gross
	Wärmerückgewinnung (WRG)	I,H	gross
	Abwärmenutzung (AWN)	I,H	gross
5.	Nutzung erneuerbarer Energiequellen	I,H	sehr gross
	Bereitstellen der Restenergie (umwelt- und kostenschonend)	I,H	sehr gross

Tabelle 3: Katalog prinzipieller Massnahmen zur Energienutzung im Industrie- und Wohnbereich mit Angabe des Einsatzgebiets und des Aufwandes (I = Industrie, H = Haustechnik).

nicht notwendig, die Energie wird aber insgesamt besser genutzt.

1.2 WRG/AWN und RAVEL

Was hat WRG/AWN mit RAVEL zu tun?

Sehr viel! RAVEL möchte im Zusammenhang mit der Wärmekraftkopplung eine Umweltstrategie verfolgen. Das heisst, trotz Stromproduktion mit fossilen Energieträgern, soll die Umwelt weniger belastet werden als bisher. Dies ist möglich, wenn ein Teil des WKK-Stromes in Elektro-Thermo-Verstärkern eingesetzt wird. Der klassische Fall eines Elektro-Thermo-Verstärkers ist die Wärmepumpe: aus 1 Teil Elektrizität werden etwa 3 Teile Heizwärme produziert. Aber auch WRG- und AWN-Anlagen sind solche Elektro-Thermo-Verstärker, nur werden hier noch viel bessere Verstärkungsfaktoren von typischerweise 7...25 erreicht!

 Heft 1, Abschnitte 2.5 und 3.4

Anwendungsgebiete im Hinblick auf RAVEL

Im Hinblick auf die rationelle Verwendung der Elektrizität im Wärmesektor lassen sich die vier Fälle gemäss Kasten 5 unterscheiden. Die Punkte zwei bis vier sind für WRG/AWN-Anwendungen im bezeichneten Umfeld nach Tabelle 2 wichtig.

	Gebäude- und Haustechnik	Verfahrens- und Produktionstechnik
Verbesserung durch organisatorische und betriebliche Massnahmen	Energieverbrauch bekanntmachen; Abwärmeströme nach Art, Grösse, Ort und Zeitgang feststellen; Verhältnis von Fortluft zu Zuluft sinnvoll einstellen; Umluftbetrieb optimieren; Raumtemperaturen reduzieren	Prozessüberprüfung; Energieflussanalyse; Temperatur reduzieren; Zeitprogramme überprüfen
Verbesserung durch Massnahmen mit eher kleinem Investitionsaufwand	Verteilungsverluste reduzieren; Steuerung und Regelung verbessern; Wirkungsgrade der Wärmeerzeuger verbessern; Zeitschaltuhren einbauen	Kondensat-Ausnutzung; Rohrleitungen wärmedämmen; Regelung verbessern; Antriebe mit variabler Drehzahl
Verbesserung durch Massnahmen mit eher hohem Investitionsaufwand	Wärmerückgewinnung in raumlufttechnischen Anlagen; Abwärme nutzen für Warmwasser und Heizungsunterstützung; Gebäudeleittechnik einsetzen; freie Kühlung einsetzen; Kondensatorwärme der Kühlmaschine nutzen	Wärmerückgewinnung im Prozess; Brüdenkompression; Abwärmenutzung im Betrieb; Prozessleittechnik einsetzen; Produktionsmaschinen mit höherem Nutzungsgrad

Tabelle 4: Beispiele für Massnahmen im Wohn- und Industriebereich

Nicht jeder wärmefreisetzende elektrische Prozess ist einer wirtschaftlichen Abwärmenutzung zugänglich. Damit eine lohnende Nutzung vorliegt, muss die Wärme mit kleinem Aufwand gesammelt und transportiert werden können. Die Beurteilung von elektrischen Abwärmequellen erfolgt mit Vorteil anhand einer Checkliste (Abschnitt 4.1 und Anhang D). Typische Vertreter sind elektrisch-elektrische Wandler (Transformatoren, Computer), elektrisch-mechanische Wandler (Motoren, Generatoren), elektrisch-chemische Wandler (Elektrolyse, Akkumulatoren) und elektrisch-thermische Wandler (Elektroöfen) sowie weitere elektrische Prozesse wie Lichtquellen, Unterhaltungselektronik usw.

Elektrothermische Niedertemperaturanwendungen (Elektroheizung, Warmwasser, Luftvorwärmung usw.) sind potentielle Kandidaten zur Versorgung mit Abwärme. Liegen Abwärmequellen vor, und sind die Verbraucher nicht in zu kleine Einheiten aufgeteilt, so kann die elektrische Energie zu einem grossen Teil durch Abwärme ersetzt werden. Bei dieser Substitution wird die Elektrizität vom Hauptenergieträger zur Hilfsenergieversorgung umfunktioniert.

In WRG/AWN-Anlagen sind Wärmetransport, Wärmeübertragung und die Steuerung von Wärmeströmen zentrale Funktionen. Die dafür benötigten, zusätzlichen Komponenten (elektrisch angetriebene Pumpen, Ventilatoren usw.) führen zu einem höheren Elektrizitätsbedarf. Das Einbringen von zusätzlichen Wärmetauschern in Leitungen und Kanäle erhöht den Druckverlust und damit die elektrische Leistungsaufnahme der eingesetzten Fördermittel. Damit das Verhältnis der genutzten bzw. rückgewonnenen Abwärme zum elektrischen Zusatzaufwand möglichst gross wird, müssen Motoren, Pumpen und Ventilatoren mit optimalem Wirkungsgrad eingesetzt werden.

Vier hauptsächliche Anwendungsgebiete

1. Verstromen von Hochtemperatur-Abwärme: Hochtemperaturdampf aus Prozessabwärme treibt über eine Dampfturbine einen Stromgenerator an.
2. Nutzung der Abwärme aus elektrischen Prozessen: Abwärme aus Grosstransformator für Raumheizungszwecke eingesetzt.
3. Substitution elektrothermischer Anwendungen durch Abwärmenutzung: Ersatz des Elektroheizstabes im Wassererwärmer durch einen Wärmetauscher, der mit Abwärme gespeisen wird.
4. Rationeller Einsatz der Elektrizität als Hilfsenergie in WRG/AWN-Anlagen: Motoren, Pumpen und Ventilatoren mit optimalem Wirkungsgrad einsetzen.

Kasten 5

2. Komponenten und Systeme

2.1 Systemübersicht

Kategorien

In WRG/AWN-Anlagen werden als Hauptkomponenten Wärmetauscher eingesetzt, solange die Quelltemperatur über der Verbrauchertemperatur liegt, und bei umgekehrten Temperaturverhältnissen Wärmepumpen. Die Systeme werden in vier Kategorien unterteilt (Tabelle 1 und Kasten 2). Typische Vertreter dieser WRG/AWN-Bausteine sind in Bild3 dargestellt.

Die WRG kann auf festgelegte Schemata und standardisierte Geräte zurückgreifen, während bei der AWN Rekuperatoren und Regeneratoren aufgrund der Vielfalt der Einsatzmöglichkeiten stets individuell zu planen sind. Für Wasser und Luft werden grundsätzlich verschiedene Technologien für Komponenten und Systeme eingesetzt. In Luft spielt immer noch die Feuchtigkeit mit. Bei Wasser handelt es sich generell um Einstoffsysteme, wobei nur die Grenzen für die Aggregatzustandsänderungen zu beachten sind.

Verfahren zur WRG aus Fortluft

Eine Übersicht über die Wärmerückgewinnung aus der Fortluft zeigt Tabelle 5. Weitere Informationen sind in den folgenden Unterlagen zu finden:



SWKI-Richtlinie 89-1. Wärmerückgewinnung in lufttechnischen Anlagen. Bern: Schweizerischer Verein von Wärme- und Klima-Ingenieuren (SWKI), 1983. (Bezugsquelle: SWKI, Postfach 2327, 3001 Bern)
VDI 2071. Wärmerückgewinnung in raumlufttechnischen Anlagen. Berlin, Köln: Beuth Verlag, 1981 (Blatt 1), 1983 (Blatt 2). (Bezugsquelle: Buchhandel)

WRG in industriellen Fortluftanlagen

Industrielle Fortluftanlagen arbeiten nach den gleichen Prinzipien wie Anlagen im Komfortbereich. Im breiten Feld der verfahrenstechnischen Anlagen hat die Wärmerückgewinnung in letzter Zeit zunehmende Bedeutung erlangt. Angepasste Schaltungstechnik, geeignete Werkstoffe und Speichermassen sowie verschiedene Wärmeträger stehen heute zur Auswahl.

Verfahren zur WRG/AWN aus Gasen und Flüssigkeiten

Im Gegensatz zu den Verfahren aus Fortluft sind die Möglichkeiten der WRG/AWN in Verbindung mit flüssigen Medien (Tabelle6) nicht als Einheit bekannt.

Im Rahmen der allgemeinen Energiesparmassnahmen der letzten Jahre fielen vor allem die ungenutzt an die

System	Typ	Kategorie
Platten-, Rohr- und Wabentauscher	Rekuperator	I
Kreislaufverbund, Wärmerohr	Regenerator	II
Rotor-Wärmetauscher	Regenerator	III
Wärmepumpe und andere		IV

Tabelle 1: Einteilung der WRG-Systeme für raumlufttechnische Anlagen nach Typ und Kategorie gemäss VDI 2071

Begriffe

Rekuperator: Wärmetauscher bei dem der Wärmetausch direkt über Trennflächen erfolgt.

Regenerator: Wärmetauscher bei dem die Wärme während des Austauschvorgangs in einem Medium zwischengespeichert wird.

Kategorie I: Rekuperativ-Verfahren mit festen Austauschflächen. Gewöhnlich wird nur sensible Wärme übertragen (Trennflächen-Wärmetauscher).

Kategorie II: Regenerativ-Verfahren mit Trennflächen. Es werden Speichermassen verwendet, die Wärme aufnehmen und wieder abgeben. Die Speichermassen sind flüssig oder gasförmig.

Kategorie III: Regenerativ-Verfahren mit Kontaktflächen. Es werden feste Speichermassen verwendet, die Wärme oder Feuchte oder beides aufnehmen und wieder abgeben.

Kategorie IV: Wärmepumpen-Verfahren. Es wird ein Arbeitsmittel verwendet, das unter Energiezufuhr Wärme überträgt.



Weitere Verfahren Abschnitt 2.4

Kasten 2

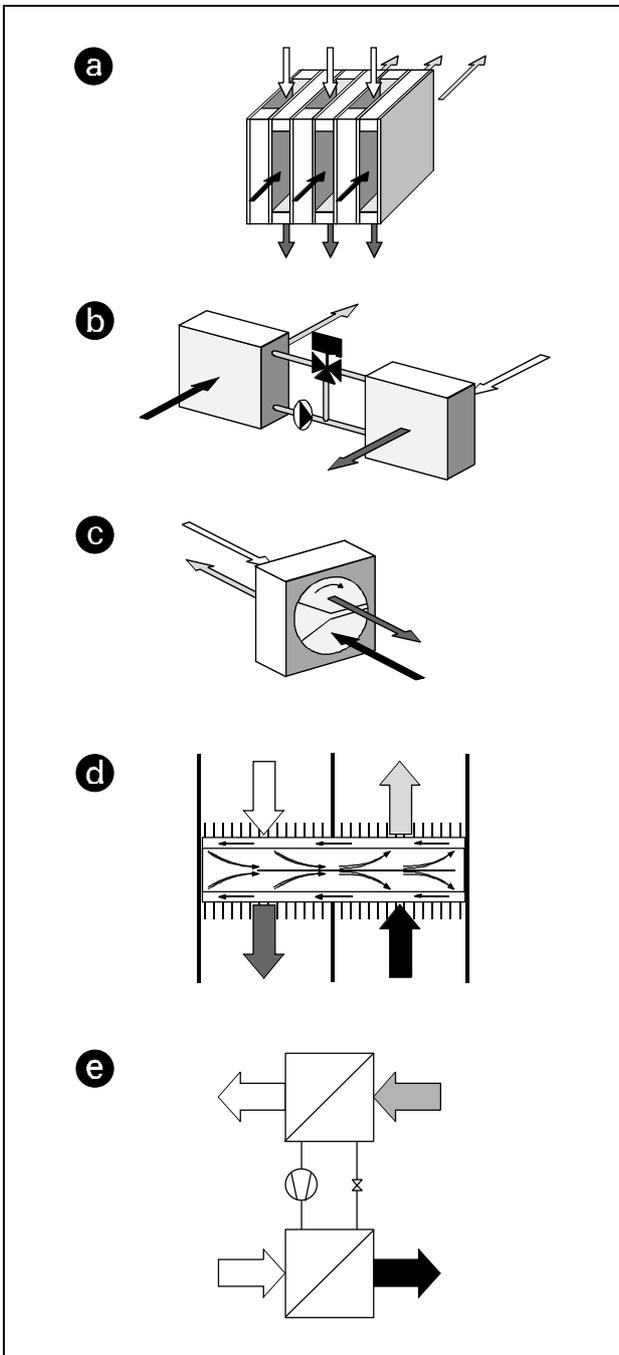


Bild 3: Übersicht über die Wärmetauscher-Verfahren
 a) Kreuzstromwärmetauscher (Kat. I)
 b) Kreislaufverbund (Kat. II)
 c) Rotorwärmetauscher (Kat. III)
 d) Wärmerohr (Kat. II)
 e) Wärmepumpe (Kat. IV)

Umgebung abgegebenen Wärmemengen der Kältetechnik ins Blickfeld der Ingenieure. Bei diesen Anlagen kann auf einfache Weise eine Nutzung der Kondensatorwärme erfolgen.

☞ «Kälteanlagen» in Anhang A

Hydraulische Schaltungen

Bild 4 zeigt vier hydraulische Schaltungen für kreislaufverbundene Systeme. Für Schaltung A besteht bezüglich dem Durchfluss ein eindeutiges Optimum:

- Bei zu kleinem Durchfluss kann die Leistung nur ungenügend übertragen werden
- Bei zu grossem Durchfluss kann die Temperaturdifferenz nicht optimal genutzt werden

Bei den Schaltungen B, C und D müssen auch noch die Sollwerteneinstellungen der Regler in die Optimierung einbezogen werden. Bei zwei Pumpen (Schaltungen C und D) darf der Durchfluss im Quellenkreis nicht kleiner sein als im Senkenkreis, da sonst eine Fehlzirkulation über den Speicher eintritt.

Das Optimum muss durch Berechnung aller typischen Betriebszustände ermittelt werden. Dabei sind auch Investitionskosten und Hilfsenergie mit zu berücksichtigen. In jedem Falle ist ein sorgfältiger hydraulischer Abgleich notwendig.

☞ Heft 1, Kapitel 4 und 5

Leistungsregelung

Zur Anpassung an die Bedingungen der Übergangszeit ist es für einen energieoptimalen Betrieb wünschenswert, die von der Fortluft auf die Aussenluft übertragene Leistung gezielt regeln zu können. Die bekannteste Möglichkeit ist ein Luftbypass auf der Aussenluftseite. Bei Wärmerohren wird eine Regelung ebenfalls vorteilhaft mit Bypassklappen vorgenommen. Bei rotierenden Wärmetauschern lässt sich die Wärmeübertragung mittels Drehzahlsteuerung verändern, so dass der Wirkungsgrad dem Bedarf angepasst werden kann.

Vereisungsgefahr

Bei Systemen der Kategorie II (Kreislaufverbund und Wärmerohre) ist die Temperaturverteilung im Kanal nach der WRG praktisch konstant. Bei Kreuzstromtauschern ist sie dagegen stark ungleichmässig, wodurch die Vereisungsgefahr in den Ecken wächst. Rotierende Wärmerückgewinner weisen in der Spülzone die höchsten, am gegenüberliegenden Rotorteil die tiefsten Temperaturen auf. Bei Eisbildung verringert sich der Wärmetausch und der luftseitige Druckabfall erhöht sich. Vereisungen müssen deshalb mit einem Bypass oder einem Vorwärmer vermieden werden.

Kontamination

Kontamination, d.h. eine Staub- und/oder Geruchsübertragung, sollte wenn immer möglich vermieden werden. Bei den Verfahren mit Trennwänden ist dies in jedem Falle gegeben. Rotierende Wärmetauscher arbeiten mit Spülkammern, die jedoch nach neuesten Messungen nicht vernachlässigbare Leckraten aufweisen.

Hilfsenergie

Bei allen WRG-Systemen sind mechanische Teile zu betätigen, wofür Elektroantriebe erforderlich sind. Durch den Einsatz von Antrieben mit elektronisch stufenlos verstellbarer Drehzahl kann der Stromverbrauch der jeweils verlangten Förderleistung angepasst werden. Verfahren mit höherem Energieverbrauch, wie die Drosselung auf der Prozessseite, sollten nur dann zur Anwendung gelangen, wenn keine anderen Möglichkeiten bestehen.

Reinigungsmöglichkeit

Speziell bei lufttechnischen Anlagen in Industriebetrieben ist die Verschmutzung der Anlage durch Schwebstoffe in der Abluft ein ernsthaftes Problem. Der Einsatz von entsprechenden Vorfiltern ist in jedem Falle möglich, verursacht aber zusätzlichen Druckabfall und damit einen höheren Energie- und Wartungsaufwand. Bei stark verschmutzter Abluft empfiehlt sich der Einbau von Grobstaubabscheidern (Zyklone, Prallbleche, Schikanen) vor dem Wärmetauscher.

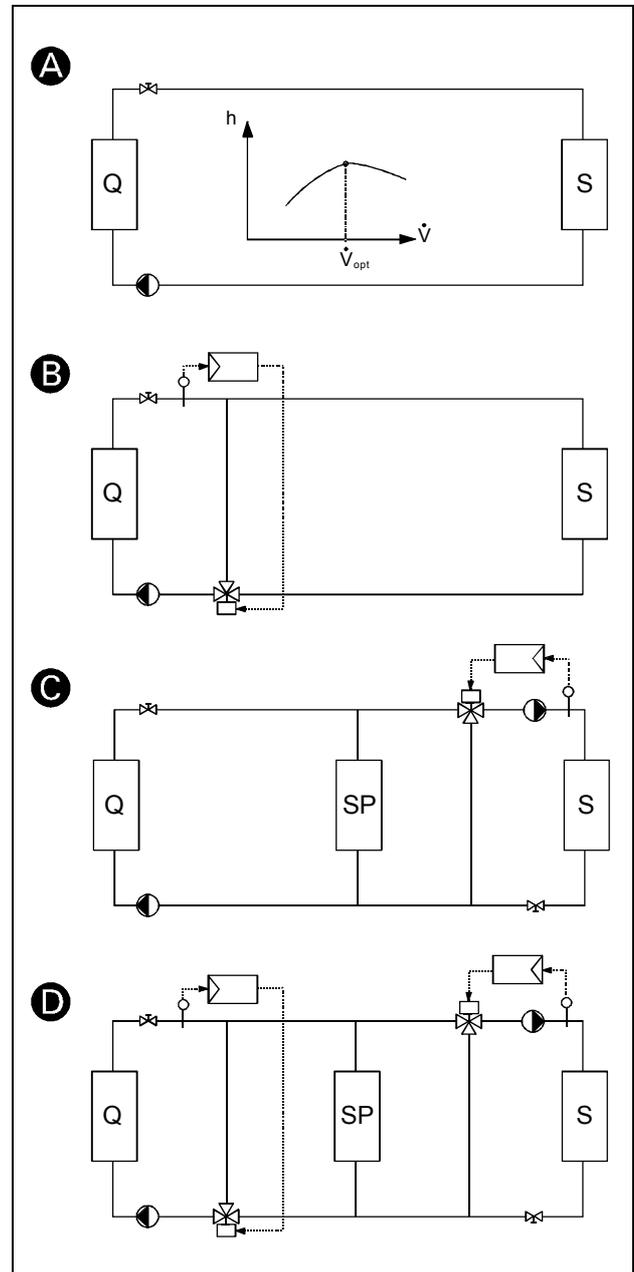


Bild 4: Hydraulische Schaltungen; Quelle «Q» kann grundsätzlich ein Wärmetauscher oder eine Wärmepumpe sein.

- A. Ungeregelter Verbund
- B. Geregelter Verbund
- C. Verbund mit Speicher zur Stufenladung in mehreren Durchgängen
- D. Verbund mit Speicher zur Schichtladung

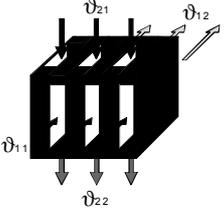
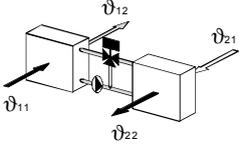
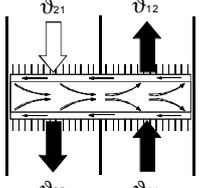
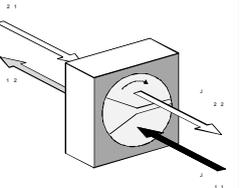
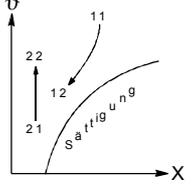
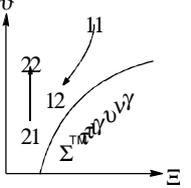
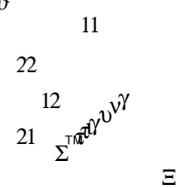
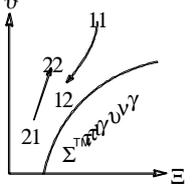
	Rekuperator	Regenerator mit festen Trennflächen		Regenerator mit Kontaktflächen
Beispiel	Glasrohr- oder Plattenwärmetauscher	Kreislaufverbund	Wärmerohr	Rotationswärmetauscher
Bild				
Einbaulage	Luftströme kreuzend	Wärmetauscher beliebig, Luftströme können weit auseinander liegen	Luftströme übereinander oder nebeneinander, nicht kreuzend	Luftströme übereinander oder nebeneinander, nicht kreuzend
Mollier-Diagramm				
Leistungsregelung	Bypass	Bypass, Regelventil	Bypass, Neigen des Wärmetauschers	Drehzahländerung
Vereisungsgefahr	Durch Kreuzstrom relativ hoch (ungleiche Temperaturverteilung)	Gering (Temperaturregelung mit Ventil)	Mittelgross (homogene Temperaturverteilung)	Vorwärmung erforderlich, wenn Nebelgebiet berührt wird
Stoffaustausch	Nein	Nein	Nein, wenn Trennbleche gut abgedichtet sind	Teilweise hoch, abhängig von der Druckdifferenz
Hilfsenergie	Nein	Ja (Pumpe)	Nein	Ja (Antriebsmotor)
Bewegliche Teile	Bypassklappen	Pumpe	Bypassklappen, Kippmechanismus	Rotorwärmetauscher, Motor
Typisches Bauvolumen für 1000 m³/h	1,5 m³	0,5 m³	0,5 m³	0,7 m³
Typischer Druckabfall	150 Pa	120 Pa	120 Pa	150 Pa
Temperaturwirkungsgrad	0,40...0,60	0,40...0,70	0,35...0,60	0,50...0,75
Spezifische Kosten	Eher tief für kleinere Luftmengen < 10'000 m³/h	Eher hoch	Mittel	Mittel

Tabelle 5: Verschiedene Verfahren zur Wärmerückgewinnung aus Luft (bzw. Gasen)

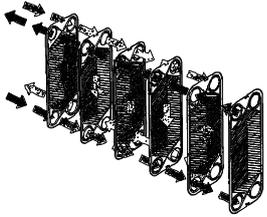
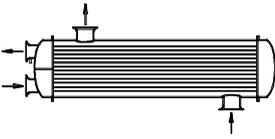
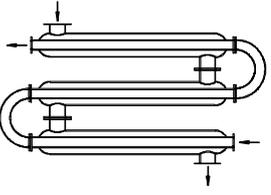
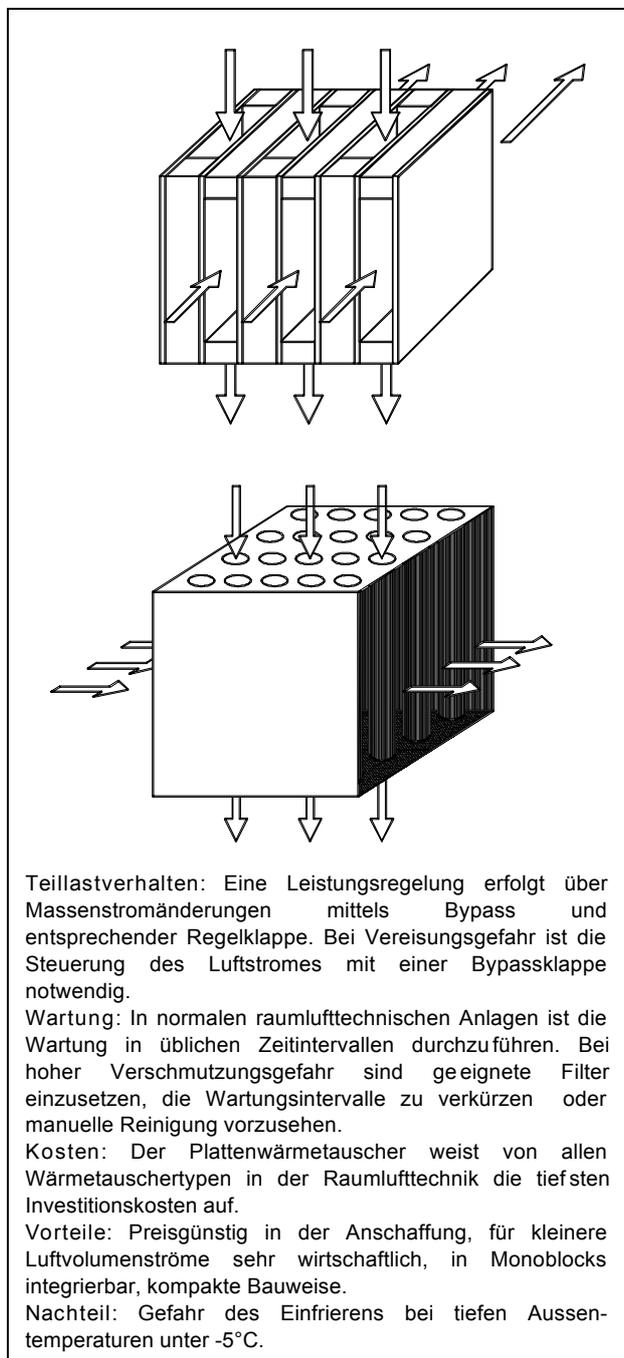
	Plattenwärmetauscher	Rohrbündelwärmetauscher	Doppelrohr-, Koaxialwärmetauscher
Bild			
Bauform, Arbeitsprinzip	Kompakte Bauweise, feste Trennflächen, profilierte Platten, gedichtete und gelötete Platten in Gestell mit Spannschrauben verschraubt	Phasenwechsel fest/flüssig, berippte Rohre, kein Stoffaustausch	Phasenwechsel fest/flüssig, berippte Rohre, kein Stoffaustausch
Anwendungsbereiche	Chemie, Pharmazie, Haustechnik, Umwelttechnik, Nahrungsmittel- und Getränkeindustrie	Verflüssiger (Kondensator) in der Kältetechnik oder in Dampfprozessen	Verflüssiger (Kondensator) in der Kältetechnik
Werkstoffe	Baustahl, Chrom-Nickel-Stahl, Aluminiumlegierungen, Titan, Nickel, Graphit	Gehäuse aus Stahl, berippte Rohre aus Stahl, Kupfer, Kupfer-Nickel, Messing	Stahl, Kupfer, Kupfer-Nickel, Messing (Rohre)
Wärmeträger	Wasser, Öl, Glykol, Chemikalien, selten Dampf oder Gas	Wasser, Wasserdampf, Arbeitsmittel (Kältemittel)	Wasser, Arbeitsmittel (Kältemittel)
Wartung, Reinigung	Durch Umspülverfahren oder Demontage der Platten (relativ billig)	In den Rohren einfach, auf Mantelseite meist chemisch	In den Rohren einfach, auf Mantelseite meist chemisch
Temperaturbereiche	Bis ca. 150°C, mit speziellen Dichtungen bis ca. 300°C möglich	Kältetechnik bis maximal 120°C, Dampfprozesse bis etwa 300°C	Bis maximal 120°C
Besondere Kennzeichen	Kleine bis grosse Leistungen, geringes Gewicht, sehr guter Wärmeübergang, variable Tauscherfläche, Ersatzteile schnell lieferbar	Grosse Leistungen, innen und aussen berippte Rohre, guter Wärmeübergang, grosse Wärmeträger-Volumen	Kleine Leistungen, kleine Wärmeträger-Volumen, relativ grosser Druckabfall
Spezifische Kosten	Mittel bis hoch	Eher hoch	Eher tief

Tabelle 6: Verschiedene Verfahren zur Wärmerückgewinnung aus Wasser (bzw. Flüssigkeiten)



Teillastverhalten: Eine Leistungsregelung erfolgt über Massenstromänderungen mittels Bypass und entsprechender Regelklappe. Bei Vereisungsgefahr ist die Steuerung des Luftstromes mit einer Bypassklappe notwendig.

Wartung: In normalen raumluftechnischen Anlagen ist die Wartung in üblichen Zeitintervallen durchzuführen. Bei hoher Verschmutzungsgefahr sind geeignete Filter einzusetzen, die Wartungsintervalle zu verkürzen oder manuelle Reinigung vorzusehen.

Kosten: Der Plattenwärmetauscher weist von allen Wärmetauschertypen in der Raumluftechnik die tiefsten Investitionskosten auf.

Vorteile: Preisgünstig in der Anschaffung, für kleinere Luftvolumenströme sehr wirtschaftlich, in Monoblocks integrierbar, kompakte Bauweise.

Nachteil: Gefahr des Einfrierens bei tiefen Aussen-temperaturen unter -5°C .

Bild 7: Plattenwärmetauscher (oben) und Röhrenwärmetauscher (unten) für Luft

Lieferform und Grösse

Plattenwärmetauscher und rotierende Regeneratoren werden in bestimmten abgestuften Grössen für Anströmquerschnitte und Bautiefen geliefert. Wärmetauscher für kreislaufverbundene Systeme und Wärmerohre können mit einer bestimmten Rohrlänge und variabler Rohrzahl in der Höhe sowie einer weitgehend beliebigen Rohrreihenanzahl in Luftrichtung an jeden Bedarfsfall angepasst werden. Die Integrierung in Monoblocks oder Kompaktgeräte verschiedener Abmessungen ist möglich.

Leistungsangaben

Die Angaben über Bauvolumen, Druckabfall und Temperaturwirkungsgrad sind in Tabelle 5 auf Anlagen mit $10'000 \text{ m}^3/\text{h}$ Aussenluft und $10'000 \text{ m}^3/\text{h}$ Fortluft normiert, um eine Vergleichsbasis zu erhalten. Dabei ergeben sich selbstverständlich einige Abweichungen von Hersteller zu Hersteller.

2.2 Rekuperative Systeme

In diesem Abschnitt werden nur die wichtigsten rekuperativen Wärmetauscher bezogen auf WRG- und AWN-Anwendungen behandelt. Daneben existieren viele andere Ausführungsformen und Sonderbauarten wie z.B. Rohrbündel-, Spiralrohr-, Doppelrohr-, Wirbelschicht-Wärmetauscher, Verflüssiger, Verdampfer usw., die häufig spezielle Aufgaben in der Verfahrenstechnik übernehmen. Auf diese kann hier nicht näher eingegangen werden.

Platten- und Röhrenwärmetauscher für Luft

Die Arbeitsweise dieser Wärmetauscher ist denkbar einfach, sind doch Bypassklappen die einzigen beweglichen Teile. Im Plattenwärmetauscher werden warme und kalte Luftströme, getrennt durch Metallplatten, fein gefächert aneinander vorbeigeführt. Eine Übertragung von Verunreinigungen, Gerüchen, Bakterien, Feuchtigkeit findet in der Regel nicht statt, ist aber bei extremen Druckverhältnissen oder schadhafte Wärmetauschern möglich. Der Röhrenwärmetauscher hat eine höhere Festigkeit, jedoch eine kleinere Austauschfläche bei gleichem Volumen. In Bild 7 sind die Funktionsweisen der beiden Wärmetauschertypen und deren Hauptmerkmale gezeigt.



Für das Tauscherpaket aus profilierten Platten ergeben sich, bedingt durch den Anwendungszweck und die Luftführung, unterschiedliche Bauformen, nämlich: Einbaublock, Hohlprofile, Modul zur freien Kombination, Diagonalanordnung auf der Ecke stehend, ausziehbar für vereinfachte Wartung usw.

Der Anwendungsbereich umfasst raumlufttechnische Anlagen im üblichen Komfortbereich, wie auch Spitäler, Hallenbäder, Sportanlagen. Wegen der Stofftrennung ist er ebenfalls in der Trocknungstechnik in Lackieranlagen und bei Industriehallenlüftung häufig anzutreffen.

Als Material wird Aluminium, Kunststoff und rostfreier Stahl verwendet.

Plattenwärmetauscher für Flüssigkeiten

Plattenwärmetauscher sind kompakt, wartungsfreundlich und korrosionsbeständig. Heute stehen widerstandsfähigere Materialien für Dichtungen zur Verfügung. Häufige Demontage zu Reinigungszwecken (z.B. Lebensmittelindustrie) ist möglich. Für höhere Drücke werden die Platten an den Rändern oder Kontaktstellen verlötet. Bei Anwendungen in der Kältetechnik können Plattenwärmetauscher sowohl als Verdampfer als auch als Kondensatoren (Phasenumwandlungen) mit veränderlichen Querschnitten eingesetzt werden. In ähnlicher Ausführung werden sie auch zur AWN aus stark verschmutztem Abwasser verwendet.

Das Arbeitsprinzip besteht im Wärmeaustausch über feste Trennflächen, ohne dass ein Stoffaustausch stattfindet.

Der Plattenwärmetauscher zeigt eine Paketbauform durch die typische Anordnung der Platten. Sie werden umfangsseitig verlötet oder mit Dichtungen versehen. Über eine Prägestruktur werden die Platten in Abstand gehalten. Die Platten werden gemäss der individuell ausgelegten hydraulischen Schaltung in ein Gestell eingebaut und zwischen einer feststehenden Gestellplatte und einer beweglichen Deckplatte mit Spannschrauben zusammengespannt (Bild 8). Der Plattenwärmetauscher wird wegen seines hohen Wärmedurchgangswerts bei kleinem Volumen und geringem Gewicht häufig in WRG/AWN-Anlagen eingesetzt. Weitere Eigenschaften sind in Kasten 9 beschrieben.

Anwendungsbereiche des Plattenwärmetauschers sind Chemie, Pharmazie, Nahrungsmittelindustrie, Prozess-, Umwelt- und Heizungstechnik. Plattenwärmetauscher werden vorzugsweise in Verbindung mit feststofffreien Flüssigkeiten jedoch auch als Verdampfer und Kondensatoren eingesetzt.



Bild 8: Plattenwärmetauscher für Flüssigkeiten

Ausgewählte technische Daten von Plattenwärmetauschern für Flüssigkeiten

Medien primär-sekundär:	Wasser-Wasser, Wasser-Öl, Wasser-Glykol, organische und anorganische Flüssigkeiten, selten Gas oder Dampf
Temperaturbereich:	bis ca. 150°C mit Standard-Dichtungen, 200...300°C möglich mit Spezialdichtungen
Durchflussbereich	5...2500 m ³ /h
Mediumsgeschwindigkeit	0,2...2 m/s
Druckabfall	20...100 kPa
k-Wert	2000...6000 W/m ² K
Austauscherfläche	1...300 m ²
Temperaturdifferenz primär-sek.	2...5 K
Temperaturwirkungsgrad	50...90%
Betriebsdruck	bis ca. 25 bar

Kasten 9

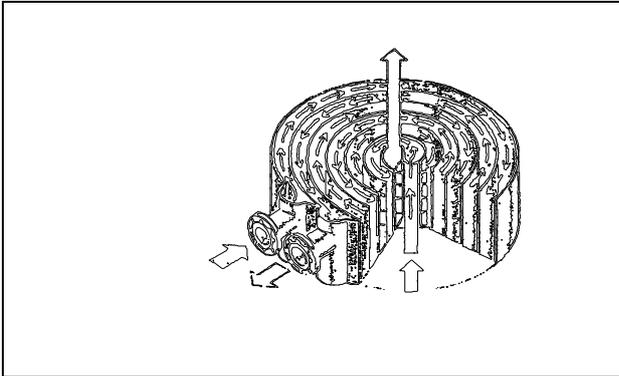


Bild 10: Aufbau eines Spiralwärmetauschers für Flüssigkeiten

Als Material wird je nach Anwendungsfall Baustahl, rostfreier Stahl, Aluminium-Legierungen, Titan, Nickel, und Graphit eingesetzt; durch die dünnen Trennwände ist der Materialbedarf klein.

Eine Sonderbauform des Plattenwärmetauschers ist der Spiralwärmetauscher. Er gewinnt zunehmend an Bedeutung, speziell als beliebte und preiswerte Variante zur WRG/AWN aus Abgasströmen. Er weist ähnliche Eigenschaften wie der Plattenwärmetauscher auf. Der Aufbau ist in Bild10 gezeigt.

Röhrenwärmetauscher

Mit Röhren als Grundelement können verschiedenartige Wärmetauscher gebaut werden. Häufige Vertreter sind der Rohrbündel- und der Doppelrohrwärmetauscher. Der prinzipielle Aufbau ist aus Bild1 ersichtlich.

Das Arbeitsprinzip besteht im Wärmeaustausch über feste Trennflächen, die sowohl primär- als auch sekundärseitig mittels Rippen oder Lamellen vergrößert sein können. Es findet kein Stoffaustausch statt.

Die charakteristische Bauform ergibt sich aus der Anordnung eines Rohrbündels in einem Kessel. Die Strömung wird auf die verschiedenen Rohre aufgeteilt. Ein Schwachpunkt bildet die Anfälligkeit gegen Leckströme zwischen Rohrbündel und Kesselmantel, die die Leistungsfähigkeit stark reduzieren können. Sie entstehen durch Fertigungstoleranzen, aber auch durch unterschiedliche thermische Ausdehnungen der einzelnen Teile bei Betriebstemperatur. In neueren Entwicklungen bringen flexible Abdichtungen bei Längs- und Querblechen Abhilfe. Es handelt sich dabei um elastische Federpakete, die ohne Verschraubungen auf die Trennbleche aufgeschoben werden und so alle Toleranzen und Dehnungen ausgleichen. Andere Neuerungen verhindern rohrseitige Leckströme im Bereich des Rohrbodens.

Der Anwendungsbereich erstreckt sich von der Kältetechnik bis zum Einsatz als Dampferzeuger in Kraftwerken. Für grosse Leistungen werden klassische Rohrbündelwärmetauscher eingesetzt, während für kleinere Leistungen auch Doppelrohr- und Topfbauformen existieren.

Als Material wird Stahl, rostfreier Stahl, Kupfer, Kupfer-Nickel und Messing für die Rohre verwendet.

Einsatz der Röhrenwärmetauscher als Verflüssiger in der Kältetechnik

Die Vielfalt von Verflüssigern (Kondensatoren) in der Verfahrens- und Kältetechnik ist gross. Die folgende

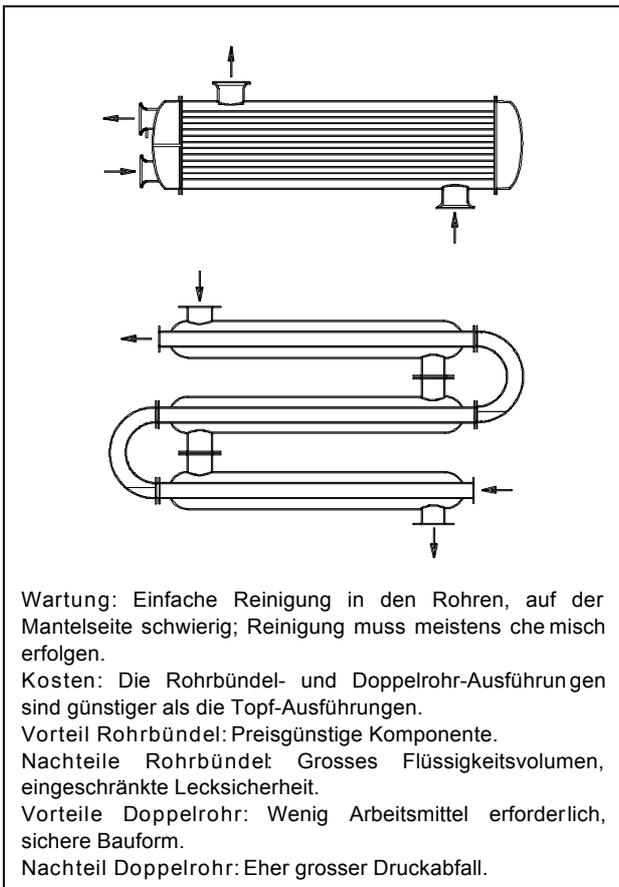


Bild 11: Röhrenwärmetauscher; Rohrbündelwärmetauscher (oben) und Doppelrohrwärmetauscher (unten)



Vorstellung beschränkt sich deshalb auf flüssigkeitsgekühlte Verflüssiger in der Kältetechnik, einen Bereich, der für AWN besondere Bedeutung hat (Bild 12 und Kasten 13).

Die Wärmetauschfläche besteht aus einer Anzahl von dünnen zum Teil beidseitig berippten Rohren, die in einem meist zylinderförmigen Mantel eingebaut sind. Bei flüssigkeitsgekühlten Verflüssigern ist das Arbeitsmittel um die Rohre, während das Kühlmedium in den Rohren strömt. Anspruchsvoll ist die thermodynamische Berechnung und Optimierung wegen der unsicheren Berechnung des Wärmeüberganges beim Phasenwechsel der Arbeitsmittel.

Heute werden fast ausnahmslos Hochleistungsrohre (innen und aussen berippt, Bild 14) eingesetzt, die –dank verbesserter Herstellungstechniken – die gewohnte Zuverlässigkeit und Lebensdauer aufweisen. Durch die höhere Leistungsfähigkeit bei gleichzeitig kleinerem Bauvolumen wird die notwendige Arbeitsmittelmenge und damit auch das Umweltgefährdungspotential im Falle eines Lecks herabgesetzt.

Weitere Anwendungen rekuperativer Wärmetauscher

Für Abgas-Wärmetauscher im Bereich der Taupunktunterschreitung werden für korrosive Medien (z.B. Chlor-, Fluss- oder Schwefelsäure) entsprechende Sonderstähle verwendet. Alternativ können aber auch korrosionsfeste nichtmetallische Werkstoffe wie Graphit, Keramik oder Kunststoffe eingesetzt werden.

Im chemischen Apparatebau sind für kleine Volumenströme häufig Graphit-Wärmetauscher anzutreffen. In letzter Zeit wurden für grosse Abgas-Volumenströme Sonderkonstruktionen in Modulbauweise entwickelt. Die Wärmeverschiebung erfolgt durch Kreislaufwasser, das durch die Graphitohre strömt.

Gleichen Anwendungszwecken dienen Kunststoff-Wärmetauscher aus flexiblem Material (PTFE, PFA, PVDF). Sie werden ebenfalls in Modulgrößen hergestellt und auf der Baustelle in vorgefertigte Rahmen montiert. Neben hoher Korrosionsbeständigkeit sind Kunststoffe stark schmutzabweisend, also unempfindlich bezüglich Ablagerungen aller Art. Sie werden bis zu Betriebstemperaturen von über 200°C eingesetzt.

Für hohe Temperatur über 500°C eignen sich Keramik-Wärmetauscher. Diese werden umso attraktiver, wenn gleichzeitig auch noch Korrosions- und Verschleissfestigkeit gewünscht wird.

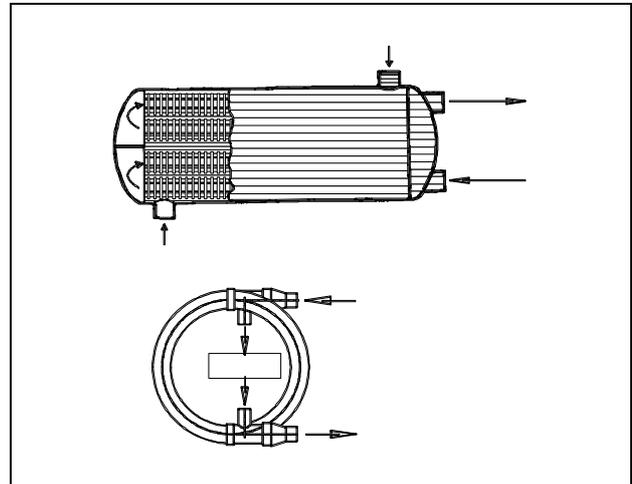


Bild 12: Bauformen von Verflüssigern; Rohrbundle (oben) und Doppelrohr oder Koaxial (unten)

Ausgewählte technische Daten von Röhrenwärmetauschern in Kälteanlagen

Medien	meistens Wasser und Arbeitsmittel
Temperaturbereich	bis ca. 120°C
Mediumsgeschwindigkeit	2...3 m/s
k-Wert	300...1200 W/m ²
Temperaturdifferenz wasserseitig	ca. 5 K
Betriebsdruck	bis ca. 25 bar

Kasten 13

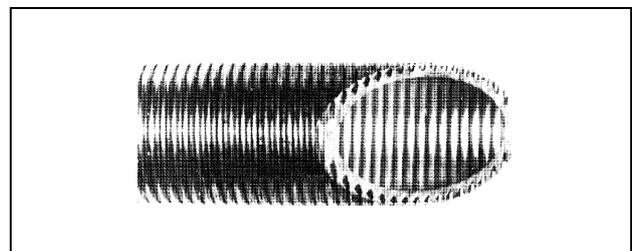


Bild 14: Hochleistungsrohr mit beidseitiger Berippung



Teilastverhalten: Eine Regelung erfolgt durch Änderung des Wärmeträgerstromes (Veränderung der Drehzahl der Umwälzpumpe, Steuerung mit Dreiwegventil). Die übertragene Leistung ändert ebenfalls mit der Grösse des Luftstroms (z.B. bei Anlagen mit variablem Volumenstrom). Der Durchfluss im Zwischenkreis muss bezüglich der übertragenen Leistung optimiert werden.

Wartung: Bei Wärmetauschern, die periodisch gereinigt werden, müssen die Rohre fluchtend angeordnet sein, eine versetzte Anordnung ist hinderlich. Bei Einsatz eines Hochdruck-Reinigers sind dicke, stabile Lamellen zu verwenden. Die Korrosionseigenschaften des Wärmeträgers im Zwischenkreis müssen periodisch überprüft werden (Inhibitoren).

Kosten: Das Kreislaufverbundsystem ist bei kleinen Luftvolumenströmen relativ teuer, bei grösseren jedoch wirtschaftlicher als andere Systeme, da das Zusammenführen von Aussenluft und Fortluft sowie der Platzbedarf für die Kanäle entfällt. Die Instandhaltungs- und Wartungskosten sind mit dem Plattentauscher vergleichbar.

Vorteile: Luft- oder Gasströme können auseinanderliegen, keine Kontaminationsgefahr, keine Leckverluste, Zusammenfassen mehrerer Anlagen ist möglich (Vernetzung), ideal für Sanierungen.

Nachteile: Periodische Überwachung des Zwischenkreislaufs notwendig.

Bild 15: Kreislaufverbund mit zwei getrennten Wärmetauschern

2.3 Regenerative Systeme

Kreislaufverbund

Die indirekte Wärmeverschiebung mittels Kreislaufverbund ist mit andern Systemen in verschiedener Weise kombinierbar. Die Überschusswärme kann zu mehreren Abnahmestellen unterschiedlicher Distanz gebracht werden. Diese Eigenschaft ist bei Sanierungen und Neuanlagen von grosser Wichtigkeit. Ein weiterer Aspekt liegt in der grossen Flexibilität der Wärmetauscher-Auslegung bezüglich Optimierung (Konstruktion der Wärmetauscher-Blocks und -Elemente, Rohrform, Rohraufteilung, Durchmesser, Oberflächen, Werkstoffwahl).

Je nach Temperaturniveau der Abwärmequelle kann der Betreiber die Abwärme genau für die Zwecke verwenden, die sich in seinem Betrieb als ideal anbieten. Dies kann z.B. die Erwärmung von Frischluft oder Warmwasser oder, bei Abwärme sehr hoher Temperatur, die Dampferzeugung für den Produktionsprozess sein.

Typisch für das Arbeitsprinzip dieses Systems ist der Zwischenkreislauf für den Transport der Wärme von der kalten zur warmen Seite (Bild 15). Über Wärmetauscher werden die zwei Wärmeströme an den Zwischenkreislauf rekuperativ angekoppelt. Der umgewälzte Wärmeträger im Zwischenkreis bewirkt ein regeneratives Verhalten. Er speichert und transportiert die Wärme.

Ein wichtiger Anwendungsbereich ist die Raumlufttechnik. Bei Sanierungen ist er oft die einzige Lösung. Hier werden meist lamellierte Wärmetauscher verwendet. Bei einer Taupunktunterschreitung des feuchten Luftstromes wird auch latente Wärme übertragen. Ein Stoffaustausch findet nicht statt. Im Winter ist eine Frostschutzsicherung notwendig. Das Medium im Zwischenkreislauf muss frostsicher sein (Wasser-Glykol-Gemische). Auch im Produktionsbereich sind Anwendungen bei prozesslufttechnischen Anlagen zu finden.

Wärmerohr

Die Arbeitsweise des Wärmerohrs (englisch «Heat Pipe») beruht auf den unterschiedlichen Transportvorgängen von Gasen und Flüssigkeiten. In einem hermetisch verschlossenen, lamellierten Rohr befindet sich ein Arbeitsmittel (FKW), welches – örtlich unterschiedlich – in beiden Aggregatzuständen vorliegt (Bild 16).

Man unterscheidet zwei Bauformen:

- Beim vertikalen Wärmerohr (auch Zweiphasen-Thermosyphon oder Gravitationswärmerohr) wird die Flüssigkeit an der tiefsten Stelle erwärmt, sie verdampft



und steigt als Gas nach oben zur kalten Stele, wo es kondensiert und als Flüssigkeit zurückläuft.

- Das horizontale Wärmerohr (klassische Ausführung) ist mit einer porösen Wandverkleidung versehen, die das Kondensat mittels Kapillarkraft zurückführt.

Der Anwendungsbereich erstreckt sich vom Einsatz in Hallenbädern, Spitälern über die Textillufttechnik, Lackier- und Trocknungsanlagen bis zu Abgas-Anlagen.

Als Material werden Aluminium- und Kupferlegierungen eingesetzt. Bei korrosiven Gasen werden die Lamellen mit Beschichtungen versehen.

Rotationswärmetauscher

Der Rotationswärmetauscher wurde Ende der fünfziger Jahre für den Einsatz in amerikanischen Klimaanlagen entwickelt. Er gehört in der Raumlufttechnik seit Jahren zum Standardausrüstungsprogramm. Heute ist er auch im industriellen Einsatz auf dem Vormarsch, weil er auch Feuchtigkeit (latente Wärme) aus Abluft- oder Abgasströmen zurückgewinnen kann und durch neue Materialkomponenten ein Einsatz in einem breiten Temperaturbereich möglich ist.

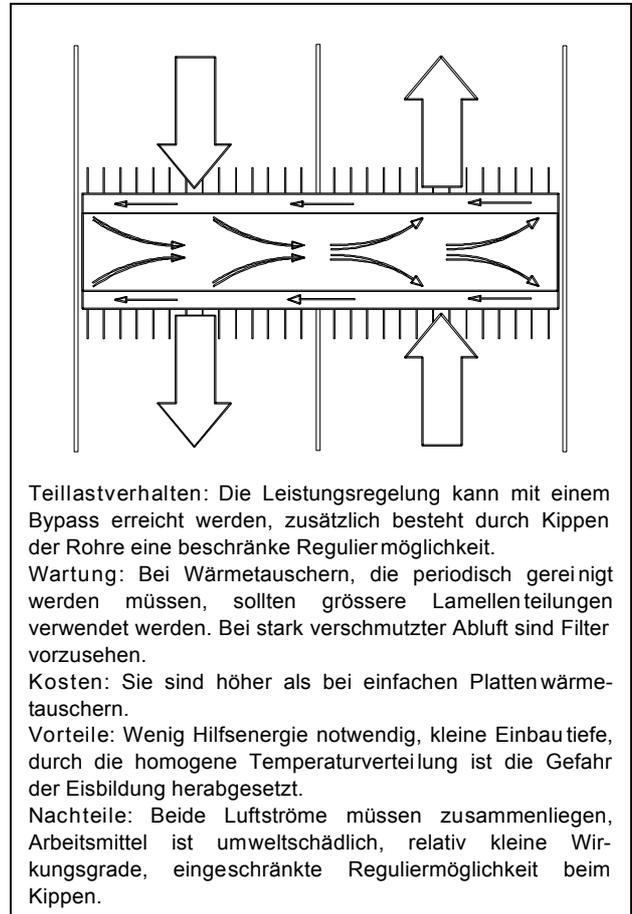
Die Arbeitsweise des rotierenden Wärmetauschers besteht in der wechselweisen Be- und Entladung einer sich drehenden Speichermasse mit Wärme und Feuchte. Die Speichermasse (Rotor) hat die Form eines flachen Zylinders.

Dieses Hauptmerkmal prägt die Bauform. Der Rotor dreht langsam und wird dabei in der einen Richtung von Warmluft und in der andern Richtung von Kaltluft durchströmt (Bild 17). Aus dem Warmluftstrom nimmt er Wärme und Feuchtigkeit auf und gibt sie im Kaltluftstrom wieder ab. Die Rotoren bestehen heute meist aus gewellten korrosionsbeständigen Aluminiumstreifen oder einer Wabenstruktur. Typische Daten von rotierenden Wärmetauschern sind in Kasten 18 zusammengestellt.

Durch den geometrischen Aufbau des Rotors bedingt treten Leckverluste auf. Eine Spülzone sorgt in Verbindung mit einem Druckgefälle dafür, dass der Zuluftstrom nur wenig belastete Fortluft erhält. Allerdings treten dadurch auch Energieverluste auf. Die Platzierung der Ventilatoren bezüglich des Rotors spielt dabei eine wichtige Rolle.

Je nach Anwendungsfall ist es wünschenswert, zwischen den beiden Luftströmen auch Feuchtigkeit auszutauschen. Bei der Feuchteübertragung werden zwei Arten unterschieden:

- Stoffaustausch durch Kondensation und Verdunstung:
Beim unbehandelten Speicherrad wird, ausser der



Teillastverhalten: Die Leistungsregelung kann mit einem Bypass erreicht werden, zusätzlich besteht durch Kippen der Rohre eine beschränkte Reguliermöglichkeit.

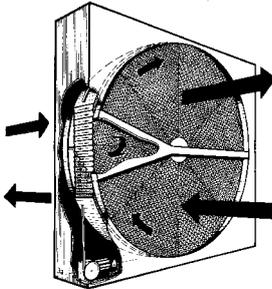
Wartung: Bei Wärmetauschern, die periodisch gereinigt werden müssen, sollten grössere Lamellenteilungen verwendet werden. Bei stark verschmutzter Abluft sind Filter vorzusehen.

Kosten: Sie sind höher als bei einfachen Plattenwärmetauschern.

Vorteile: Wenig Hilfsenergie notwendig, kleine Einbautiefe, durch die homogene Temperaturverteilung ist die Gefahr der Eisbildung herabgesetzt.

Nachteile: Beide Luftströme müssen zusammenliegen, Arbeitsmittel ist umweltschädlich, relativ kleine Wirkungsgrade, eingeschränkte Reguliermöglichkeit beim Kippen.

Bild 16: Wärmerohr



Teillastverhalten: Die übertragene Leistung und damit die Zulufttemperatur ist abhängig von der Rotordrehzahl, sie kann damit zur Zulufttemperaturregelung herangezogen werden. Im Drehzahlbereich von 0 bis ca. 10 U/min ist ein grosses Regelverhältnis erreichbar. Wird die Rotordrehzahl reduziert, verringert sich der Feuchtewirkungsgrad wesentlich stärker als der Temperaturwirkungsgrad. Weitere Regelmöglichkeiten sind Sequenzschaltung, Intervallbetrieb usw.

Wartung: Periodische Reinigung, Kontrolle und eventuelle Nachstellung der luftseitigen Abdichtungen. Keilriemenwechsel nach Abnutzungsgrad. Aluminiumwaben müssen nach 5 bis 10 Jahren ersetzt werden. Entsprechende Filter sind wenn nötig vorzusehen, zu überwachen und zu reinigen.

Kosten: Die aufwendige Bauweise des Rotationswärmetauschers schlägt sich in den im Vergleich zu Plattenwärmetauscher-Systemen höheren Apparatekosten nieder. Kostenfaktoren sind: Mehrplatzbedarf für Rotor, Kanäle, Zusammenführung von Aussenluft und Fortluft, Reinigungsfreundlichkeit, Korrosionsfestigkeit usw. Die Instandhaltungskosten sind abhängig vom Anlagekonzept und vom Einsatzgebiet.

Vorteile: Feuchtigkeitsübertragung, hoher Wärmerückgewinn bei optimalem Einsatz.

Nachteile: Hoher Aufwand für die Luftzuführung (Kanäle), Leckluft, nicht geeignet für Trocknung.

Bild 17: Rotationswärmetauscher mit Spülzone

Ausgewählte technische Daten von Rotationswärmetauschern

Medien	Luft, Gase
Temperaturbereich	0...300 °C
Luftmenge	1'000...100'000 m ³ /h
Anströmgeschwindigkeit	1,5...3 m/s
Druckverlust	50...300 Pa
Rotor-Drehzahl	0...10 U/min
Antriebsmotor-Leistung	0,09...0,75 kW
Baugrössen (Durchmesser)	0,5...5,0 m
Temperaturwirkungsgrad	50...75 %
Feuchtewirkungsgrad	15...75 %

Kasten 18

Temperatur, nur dann Feuchte übertragen, wenn der Taupunkt der feuchten Luft unterschritten wird (Kondensations-Regenerator).

- Stoffaustausch durch Ab- und Desorption: Bei hygroskopischer (oder sorptionssensibilisierter) Beschichtung der Speichermasse wird ausser fühlbarer Wärme auch Feuchtigkeit übertragen (Sorptions-Regenerator).

Der Anwendungsbereich umfasst sowohl raumlufttechnische Anlagen im Komfort- und Industriebereich als auch reine prozesslufttechnische Anlagen. Problematisch ist der Einsatz bei stark verschmutzter Fortluft (Küchen, Spritzkabinen, Schmirgelstaub, Chemie usw.). Hygroskopische Speichermassen sind nur für saubere, inerte Medien einsetzbar.

2.4 Wärmepumpen und Wärmetransformatoren

Wärmepumpen

Eine Wärmeübertragung allein mit einem Wärmetauscher ist nur dann möglich, wenn die Temperatur der Wärmequelle höher ist als diejenige der Wärmeabgabe. Aber auch die Energie einer niederwertigen Wärmequelle kann genutzt werden, indem diese – mit Hilfe einer Wärmepumpe – auf ein höheres Temperaturniveau «hochgepumpt» wird.

Wärmepumpen benötigen also neben der Antriebsenergie eine geeignete Wärmequelle. Die Qualität dieser Wärmequelle bestimmt massgebend Auswahl und Einsatzbedingungen der Wärmepumpe. Während im Komfortbereich oft grössere Aufwendungen zum Erschliessen einer Wärmequelle gemacht werden müssen, ist im Gewerbe- und Industriebereich häufig Abwärme ohne aufwendige Arbeiten verfügbar. Bei geringen Temperaturdifferenzen zwischen «kalter» und «warmer» Seite der Wärmepumpe werden hohe Leistungszahlen erreicht. In den letzten Jahren hat die Wärmepumpe auch in Industrie und Gewerbe Einzug gehalten. Die Anwendungsgebiete sind sehr vielfältig:

- Heizung, Lüftung, Klima
- Wassererwärmung
- Integrierte Energieversorgung (Wärme-Kälte-Kraft)
- Trocknungsverfahren
- Stofftrennung (Destillation, Rektifikation)
- Konzentration von Flüssigkeiten

Der Wärmepumpenprozess kann in einer in sich abgeschlossenen Maschine oder integriert in einem in-



dustriellen Verfahren ablaufen. Die Bauarten sind in Bild 19 schematisch dargestellt. Bei der Kompressionswärmepumpe und der mechanischen Brüdenkompression wird als Antriebsenergie mechanische Energie zugeführt, bei der Absorptionswärmepumpe und der Dampfstrahl-Brüdenkompression thermische Energie. Durch den Einsatz im Komfortbereich hat die elektrisch angetriebene Kompressionswärmepumpe den grössten Bekanntheitsgrad erlangt.

Heft 1, Abschnitt 3.2; Heft 3

Brüdenkompression

Wird anstelle eines separaten Arbeitsmittels direkt Prozessdampf in der Wärmepumpe verwendet, ist dies eine offene Prozessführung, die Brüdenkompression genannt wird. Bei der Brüdenkompression, die thermisch oder mechanisch erfolgen kann, wird Abdampf (Brüden), wie er z.B. bei Eindampfprozessen entsteht, durch einen Verdichter auf einen höheren Druck gebracht. Der Brüden kann damit wieder zum Beheizen des gleichen Prozesses verwendet werden. Der Vorteil dieses Verfahrens besteht im Wegfall von Wärmetauscher und dazugehöriger Temperaturdifferenz. Der Prozess kann auch mehrestufig erfolgen.

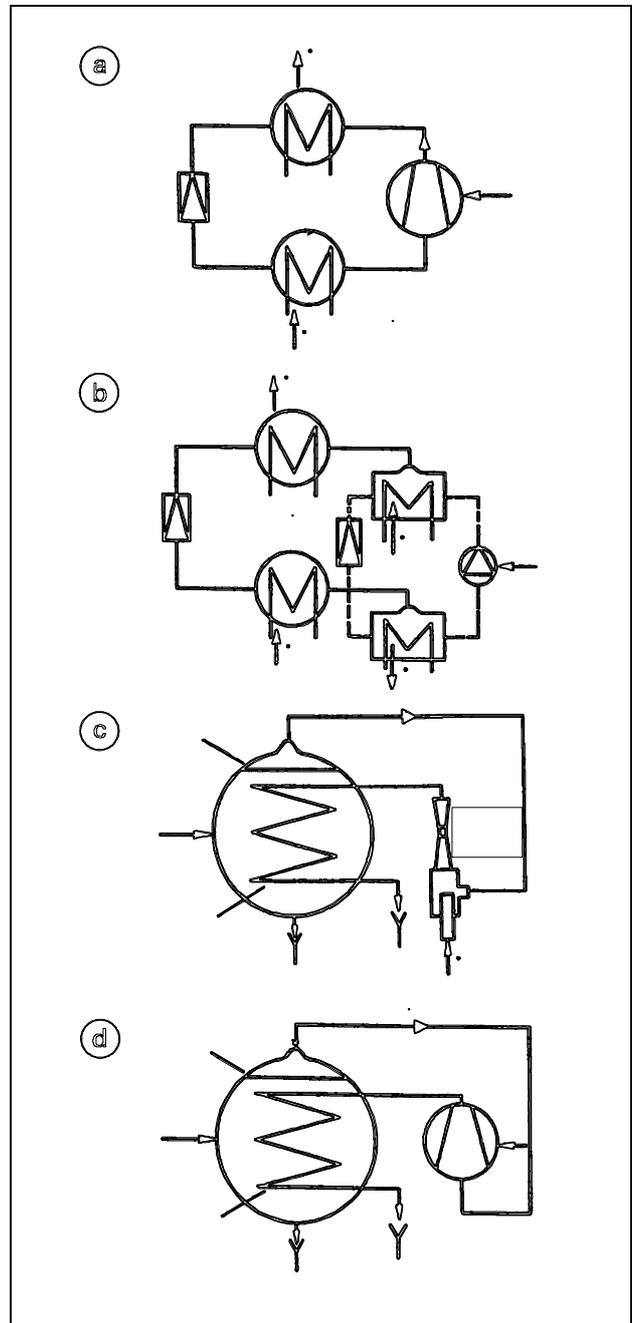


Bild 19: Bauarten von Wärmepumpen; geschlossener WP-Prozess (a, b), offener WP-Prozess (c, d)

- a) Kompressionswärmepumpe
- b) Absorptionswärmepumpe
- c) Dampfstrahl-Brüdenkompression
- d) Mechanische Brüdenkompression

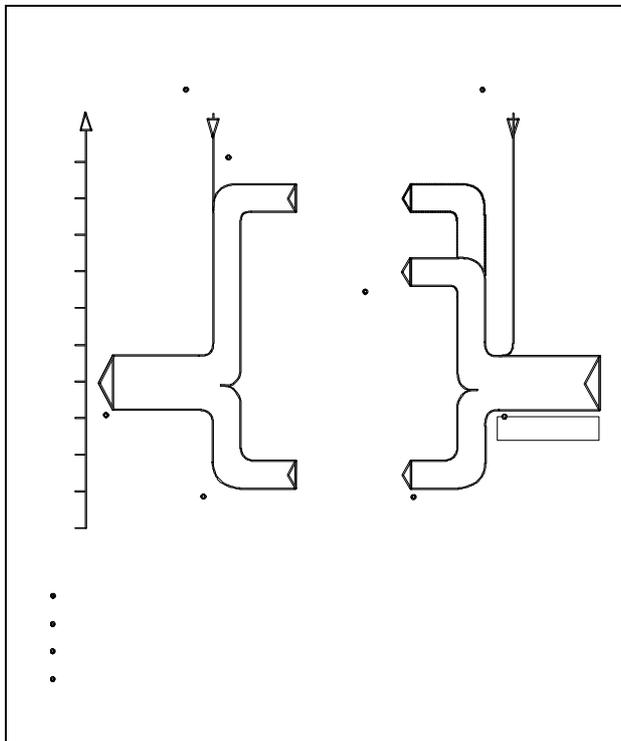


Bild 20: Gegenüberstellung der Energieflüsse von Absorptionswärmepumpe und Wärmetransformator

Wärmetransformatoren

Die Funktionsweise von Wärmepumpen ist im wesentlichen bekannt. Demgegenüber besteht über die Anwendungsmöglichkeiten von Wärmetransformatoren im allgemeinen noch weitgehende Unklarheit. Wärmetransformatoren gehören, zusammen mit mechanischen und chemischen Wärmepumpen, zur Gruppe der aktiven Systeme zur Abwärmenutzung.

Die Absorptionswärmepumpe ist in der Lage, Abwärme von einem tiefen Temperaturniveau in nutzbare Wärmeenergie von mittlerem Temperaturniveau umzuwandeln, wenn etwa ein gleich grosser Wärmestrom auf hohem Temperaturniveau zugeführt wird.

Der Wärmetransformator führt genau den umgekehrten Prozess durch, indem er Abwärme auf einem mittleren Temperaturniveau aufnimmt und in etwa zwei gleich grosse Wärmeströme aufteilt, wobei eine Hälfte bei höherer Temperatur zur Nutzung freigegeben wird, während die andere Hälfte auf tieferem Temperaturniveau an eine Wärmesenke abgegeben wird. Zum Antrieb des Transformators ist nur ein kleiner Anteil von 1...2% elektrischer Hilfsenergie notwendig.

In Bild 20 sind die beiden Prozesse vergleichend dargestellt. Auf diese Weise lässt sich grosstechnisch Prozesswärme von 60...110°C auf 100...160°C arheben, ohne dass zusätzlich Energie aufgewendet werden muss. Mehrere grosstechnische Anlagen sind in Deutschland seit einigen Jahren in Betrieb und zeigen gute Ergebnisse.



Aus einem Abwärmestrom von 2 MW, der in Form von Brühdampf aus einer Kochstation mit 96°C bis 100°C angeboten wird, kann mittels Wärmetransformator annähernd 1 MW Nutzwärme bei 145°C gewonnen werden, der wieder zur Beheizung der Kochstation Anwendung findet.



Ingwersen, H. H. (Hrsg.): Mehrfachnutzung industrieller Prozesswärme. Gräfelfing/München: Resch-Verlag, 1986. (Bezugsquelle: Buchhandel)

Schnell, H. und B. Thier: Wärmetauscher. Energieeinsparung durch Optimierung von Wärmeprozessen. Essen: Vulkan-Verlag, 1991. (Bezugsquelle: Buchhandel)

3. Grundlagen

3.1 Abwärme

Die Entstehung von Abwärme hat verschiedene Ursachen (Kasten 1). Bei deren Nutzung muss zwischen gefasster und diffuser Abwärme unterschieden werden:

- Gefasste Abwärmeströme sind an Medienströme gebunden. Hierzu gehören vor allem Abuft- und Abgasströme, Kühlflüssigkeiten sowie der Wärmehalt des aus einem Prozess austretenden Gutes. Dabei ist zwischen latenter Wärme (z.B. Kondensieren) und fühlbarer Wärme (Temperaturänderung) zu unterscheiden.
- Diffuse Abwärme entsteht grossflächig vorwiegend durch Strahlung und Konvektion (Oberflächenverluste von Anlagen, Transmissionsverluste von beheizten Gebäuden).

Das Sammeln und Ernten von gefasster Abwärme ist einfacher als bei diffuser Abwärme. Bild 2 zeigt die bildliche Darstellung für einen allgemeinen Prozess.

Ursachen der Entstehung von Abwärme

Bei der Erzeugung hochwertiger Energie entsteht immer auch niederwertige Energie – sogenannte Anergie – mit tiefer Temperatur und kleinem Druck, die nicht mehr weiter genutzt werden kann.

Bei Umwandlungsprozessen entsteht aber auch technisch nicht vermeidbare Abwärme, die noch weiter genutzt werden könnte.

Aus betriebswirtschaftlichen oder aus organisatorischen Gründen wird technisch an und für sich vermeidbare Abwärme aber oft in Kauf genommen (leider auch aus Unkenntnis oder Gleichgültigkeit!).

Schliesslich entsteht auch Abwärme aus der im Prozess genutzten Energie (z.B. ein heisses Produkt, das abgekühlt werden muss).



Einzig Anergie kann nicht mehr genutzt werden. Die anderen Energieformen können aber mittels Wärmetauscher und Wärmepumpen weiter genutzt werden!

Kasten 1

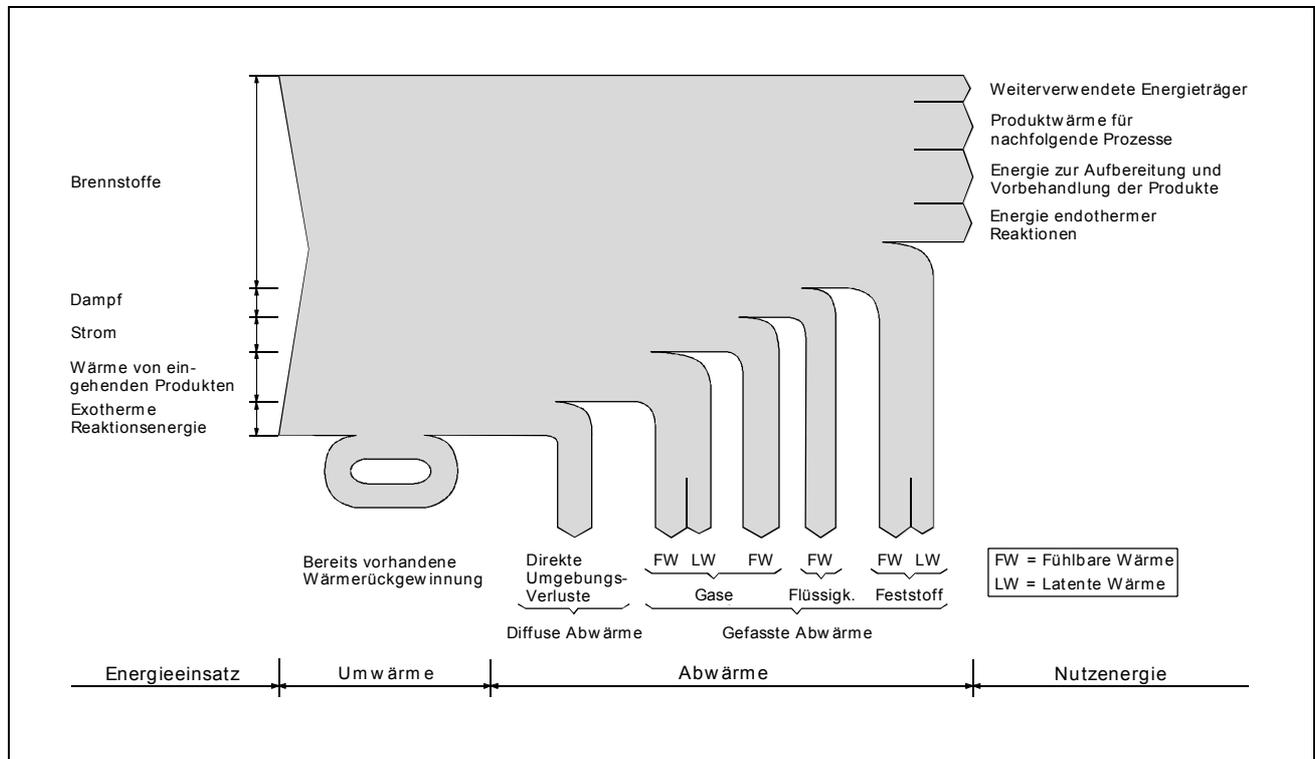


Bild 2: Prinzipdarstellung der Energie- und Abwärmeströme eines Prozesses im Sankey-Diagramm

Wärmetauscherformel

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta\vartheta_m$$

$$\Delta\vartheta_m = \frac{\Delta\vartheta_{gr} - \Delta\vartheta_{kl}}{\ln(\Delta\vartheta_{gr}/\Delta\vartheta_{kl})}$$

\dot{Q} = Wärmestrom [W]

k = Wärmedurchgangskoeffizient [$W/m^2 K$]

A = Wärmeübertragungsfläche [m^2]

$\Delta\vartheta_m$ = mittlere log. Temperaturdifferenz [K]

$\Delta\vartheta_{gr}$ = grosse Temperaturdifferenz [K] (siehe Bild 5)

$\Delta\vartheta_{kl}$ = kleine Temperaturdifferenz [K] (siehe Bild 5)

Der Wärmedurchgangskoeffizient k ist keine Stoffgrösse, sondern von einer Vielzahl von Faktoren abhängig, wie z.B. dem Aggregatzustand des Mediums (Dampf, Gas, Flüssigkeit), den Eigenschaften des Mediums (Dichte, spez. Wärmekapazität, Zähigkeit, Wärmeleitfähigkeit), den thermodynamischen Zustandsgrössen (Druck, Temperatur), der Strömungsgeschwindigkeit des Mediums sowie den Abmessungen und der geometrischen Form des Wärmetauschers.

Die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz (auch als «thermische Länge» bekannt) beschreibt die effektiv treibende Temperaturdifferenz im Wärmetauscher.

Kasten 3

Bauart	k [W/m^2K]
Wasser/Wasser Röhrentauscher	200...1000
Doppelröhrentauscher	350...1400
Dampf/Wasser Röhrentauscher (Dampf im Rohr)	350...1200
Verdampfer (Dampf ums Rohr)	600...1500
Wasser/Gas Röhrentauscher	15...70
Abhitzeessel (Gas im Rohr)	15...45
Gas/Gas Röhrentauscher	6...35
Doppelröhrentauscher	2...35

Tabelle 4: Richtwerte für Wärmedurchgangskoeffizienten

3.2 Wärmetauscher

Wärmeübertragung

An der Grenze zweier Systeme mit verschiedenen Temperaturen findet ein Wärmeaustausch statt, ohne dass dabei Arbeit verrichtet wird. Die Grösse des Wärmestromes ist proportional der wärmeübertragenden Fläche und dem Temperaturunterschied. Es sind folgende Wärmeübertragungsvorgänge zu unterscheiden:

- Wärmeübertragung ohne Änderung des Aggregatzustandes der beteiligten Stoffströme (z.B. Gas/Gas, Flüssigkeit/Flüssigkeit, Gas/Flüssigkeit)
- Wärmeübertragung mit Änderung des Aggregatzustandes von mindestens einem der beteiligten Stoffströme (z.B. Verdampfung, Verflüssigung)
- Kombinierte Wärme- und Stoffübertragung – Konvektion und Verdunstung (z.B. Verdunstungskühlung Wasser/Luft)

Die Art der Wärme- und Stoffübertragung ist von der Strömungsführung (Gleich-, Gegen- oder Kreuzstrom) und der Art der Wärmetauscherfläche abhängig. Es wird unterschieden:

- Indirekte Wärmeübertragung beim rekuperativen Wärmeaustausch durch gleichzeitige Wechselwirkung der Stoffströme in benachbarten, durch eine Wand getrennten Räumen.
- Halbindirekte Wärmeübertragung beim regenerativen Wärmeaustausch durch eine periodische Wechselwirkung der Stoffströme in einem Raum.
- Direkte Wärmeübertragung durch unmittelbare Berührung der Stoffströme in einem Raum. Hierdurch wird die erforderliche Wärmeübertragungsfläche erheblich verringert; diese Übertragungsart ist aber nur bedingt anwendbar.

Bild 5 zeigt das Schema eines Wärmetauschers mit den wichtigsten Bezeichnungen der beiden Medierströme. Für die Praxiszwecke genügt die Anwendung der Formeln aus Kasten 3. Durch die vielen Abhängigkeiten ist es unmöglich, eine allgemeingültige Form für die Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten k aufzustellen. Dieser muss für jeden Fall aus Erfahrungswerten oder mit Versuchen bestimmt werden. Richtwerte für verschiedene technische Anwendungen sind in Tabelle 4 zu finden. Als Standardwerk für Berechnungen sei hier empfohlen:



VDI-Wärmeatlas. Berechnungsblätter für den Wärmeübergang. 6. Aufl. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure (VDI), 1991. (Bezugsquelle: Buchhandel)

Beim Wärmeaustausch können drei Stromführungen unterschieden werden: Gleichstrom, Gegenstrom und Kreuzstrom. In Bild 5 sind die Temperaturverläufe über die Fläche eines Tauschers für Gleich- und Gegenstrom dargestellt.

Für den Gleichstrom gilt immer, dass die Austrittstemperatur des warmen Mediums höher ist als die Austrittstemperatur des kalten Mediums. Bei Gegenstromführung kann unter günstigen Bedingungen erreicht werden, dass die Austrittstemperatur des kalten Mediums höher als die Austrittstemperatur des warmen Mediums ist.

Die Wirksamkeit des Wärmeaustausches und damit der Wärmerückgewinn hängt im Wesentlichen von der Fläche und vom Übertragungsverhalten des Apparates ab. Der Wärmerückgewinn ist dabei das Verhältnis von ausgetauschter Wärme zur Differenz der Wärmeströme vor dem Wärmetauscher.

Bild 7 zeigt den Verlauf für einen fiktiven Wärmetauscher für Gleich-, Gegen- und Kreuzstrom. Bei Gegenstrom entspricht die Fläche «1» einem Wirkungsgrad von 50%. Soll nun der Wärmerückgewinn im Wärmetauscher zum Beispiel auf 80% bzw. 90% gesteigert werden, so vergrößert sich die benötigte Fläche um den Faktor 4 bzw. 9. Der apparative Aufwand und somit die Investitions- bzw. Kapitalkosten werden damit wesentlich grösser. Die beiden andern Kurven zeigen die Verhältnisse für Kreuz- bzw. Gleichstromführung. Die Wärmeübertragung ist deutlich reduziert und ab Flächenfaktor 3 ist der Wirkungsgrad fast konstant.

Druckabfall

Die Überwindung der Druckverluste in Wärmetauschern, Leitungen, Formstücken, Filtern usw. erfordert zusätzliche elektrische Energie. Die zusätzlich notwendige Hilfsenergie, die durch den Ventilator oder die Pumpe erbracht werden muss, berechnet sich gemäss Kasten 6. Bei der Auslegung eines Umformers bzw. einer Anlage muss zwischen Wärmeübergang und Druckverlust optimiert werden. Als sinnvolles Optimierungsziel sollte das Verhältnis von Wärmegewinn zu elektrischem Zusatzaufwand über 3 liegen.

3.3 Kenngrössen

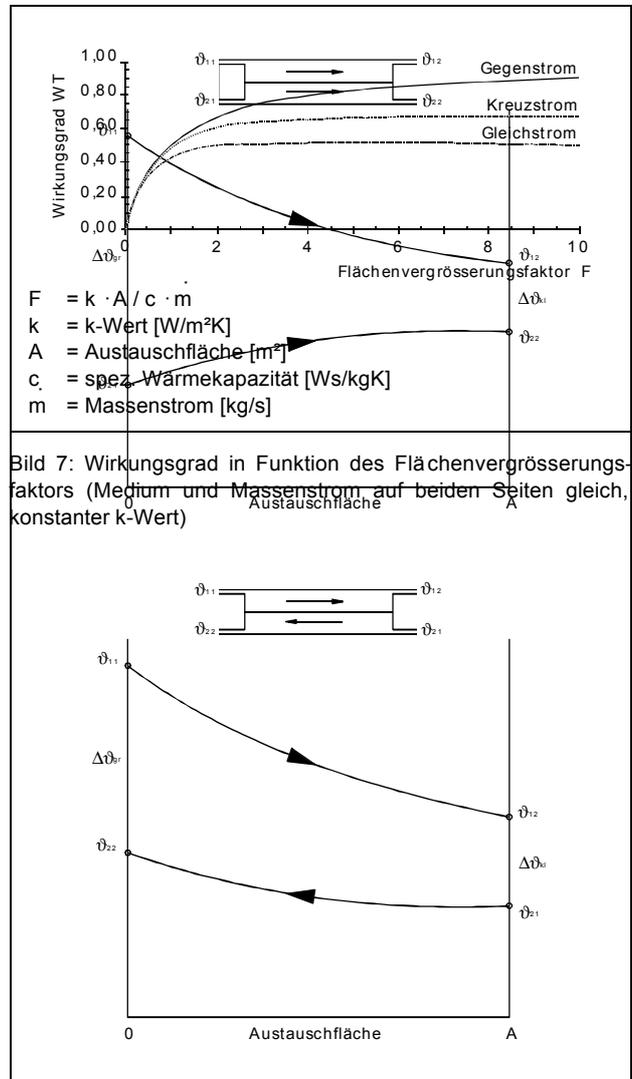


Bild 5: Temperaturverlauf in den Medien bei Gleichstrom (oben) und Gegenstrom (unten)

Hilfsenergiebedarf

$$W_H = \frac{V \cdot t_b \cdot \Delta p}{\eta}$$

$W_H = \text{Hilfsenergiebedarf [J]}$
 $V = \text{Volumenstrom [m}^3\text{/h]}$
 $t_b = \text{Betriebsdauer [h]}$
 $\Delta p = \text{Druckverlust des Systems (inkl. Filter) [Pa]}$
 $\eta = \text{Wirkungsgrad Förderaggregat [-]}$

Kasten 6

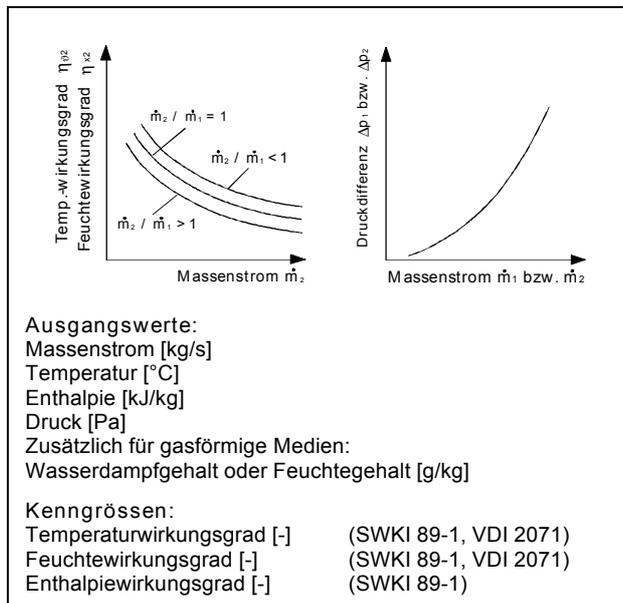


Bild 8: Ausgangswerte und Kenngrossen für Wärmerückgewinner

In Richtlinien und Normen sind einheitliche Kenngrossen für Wärmerückgewinner in lufttechnischen Systemen festgelegt (Bild 8). Die Wirkungsgrade dienen der vergleichenden Bewertung im entsprechenden Auslegungsfall und zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit. Mit der Elektro-Thermo-Verstärkung wird der Einsatz der Elektrizität in der WRG/AWN-Anlage beurteilt.

Wirkungsgrade beim Wärmeaustausch

Aus der Bilanzgleichung eines Wärmetauschers nach Bild 5 und 9 folgt durch Umformung:

$$\eta_{h2} = (\dot{Q}_{22} - \dot{Q}_{21}) / (\dot{Q}_{11} - \dot{Q}_{21})$$

$$\eta_{h2} = \dot{m}_2 (h_{22} - h_{21}) / \dot{m}_1 (h_{11} - h_{21})$$

$$\eta_{h1} = (\dot{Q}_{11} - \dot{Q}_{12}) / (\dot{Q}_{11} - \dot{Q}_{21})$$

$$\eta_{h1} = \dot{m}_1 (h_{11} - h_{12}) / \dot{m}_2 (h_{11} - h_{21})$$

Wenn Massenströme und spezifische Wärmekapazitäten gleich sind, so sind auch die folgenden drei Kennzahlen gleich für beide Seiten:

Temperaturwirkungsgrad

$$\eta_{\vartheta 2} = (\vartheta_{22} - \vartheta_{21}) / (\vartheta_{11} - \vartheta_{21})$$

$$\eta_{\vartheta 1} = (\vartheta_{11} - \vartheta_{12}) / (\vartheta_{11} - \vartheta_{21})$$

Feuchtwirkungsgrad

$$\eta_{x2} = (x_{22} - x_{21}) / (x_{11} - x_{21})$$

$$\eta_{x1} = (x_{11} - x_{12}) / (x_{11} - x_{21})$$

Enthalpiewirkungsgrad

$$\eta_{h2} = (h_{22} - h_{21}) / (h_{11} - h_{21})$$

$$\eta_{h1} = (h_{11} - h_{12}) / (h_{11} - h_{21})$$

Die Wirkungsgrade sind immer auf den wärmeaufnehmenden Massenstrom zu beziehen. Sie sind abhängig von der Art des Wärmerückgewinners, vom Massenstromverhältnis und von den Betriebsbedingungen. In der Raumlufttechnik ist für Vergleiche immer auf $\eta_{\vartheta 2}$, η_{x2} und η_{h2} abzustützen.

Elektro-Thermo-Verstärkung

In WRG/AWN-Anlagen werden zur Überwindung von Strömungswiderständen in Luft und Wasser elektrisch angetriebene Ventilatoren und Pumpen eingesetzt. Die Komponenten sollten derart dimensioniert und betrieben werden, dass möglichst viel Wärme mit möglichst wenig elektrischer Energie gewonnen wird. Dieses Verhältnis wird durch die in Bild 10 definierte Elektro-Thermo-Verstärkung (ETV) dargestellt. Dabei wird der Elektroverbrauch aller am Wärmegewinn beteiligten Komponenten berücksichtigt. Dieser lässt sich aufgrund der Betriebszeiten und der Wirkungsgrade aus Tabelle 12 berechnen.



Eine Lüftungsanlage für ein Büro mit einem jährlichen Wärmebedarf von 98'980 kWh wird vereinfacht in 3 Zuständen betrieben:

- Zustand 1: 1'150 h mit 12'000 m³/h
- Zustand 2: 1'150 h mit 8'000 m³/h
- Zustand 3: 1'030 h mit 6'000 m³/h

Die WRG-Anlage ist als Kreislaufverbund mit Wasser-Glykol-Gemisch als Wärmeträger ausgeführt. Sie zeigt bei einer Modellrechnung für eine einstufige Umwälzpumpe und für eine mit Frequenzumrichter stetig betriebene Umwälzpumpe die Werte gemäss Tabelle 11. Die aus diesen Werten errechneten ETV zeigen unterschiedliche Grösse für die beiden Ausführungen:

$$ETV_{\text{einstufig}} = \frac{85'100 \text{ kWh}}{3'340 \text{ kWh}} = 25,5$$

$$ETV_{\text{stetig}} = \frac{86'60 \text{ kWh}}{2'860 \text{ kWh}} = 30,1$$

Mit dem optimal steuerbaren Antrieb wird mehr Wärme rückgewonnen und weniger Elektrizität verbraucht.

3.4 Auslegung und Optimierung

Vorsicht bei Temperaturwirkungsgradangaben!

In der Praxis wird aus Gründen der Einfachheit häufig der Temperaturwirkungsgrad verwendet. Er gilt aber nur für gleiche Massenströme, gleiche spezifische Wärmekapazitäten und ohne Phasenumwandlungen. Weichen die Werte in der Realität von diesen Annahmen ab, so entstehen Fehler. Dazu zwei Beispiele:

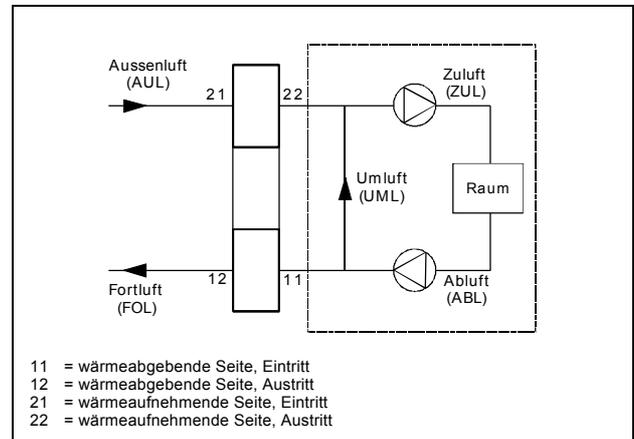


Bild 9: Wärmerückgewinnungssystem [Quelle: SWKI-Richtlinie 89-1]

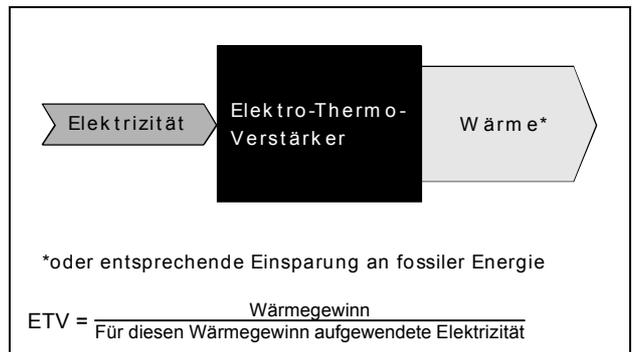


Bild 10: Elektro-Thermo-Verstärkung (ETV)

Zustand	Kreislaufverbund mit einstufig betriebener Pumpe		Kreislaufverbund mit stetig betriebener Pumpe	
	WRG [kWh]	EL [kWh]	WRG [kWh]	EL [kWh]
1	39 480	1 930	39 480	1 840
2	28 690	870	28 740	720
3	16 930	540	17 930	300
Total	85 100	3 340	86 160	2 860

Tabelle 11: Wärmerückgewinn (WRG) und Elektrizitätsaufwand (EL) für eine einstufig und eine stetig betriebene Umwälzpumpe

Gebälse	η_G
Radialgebälse	
– vorwärtsgekrümmte Schaufeln	0,65
– rückwärtsgekrümmte Schaufeln	0,83
Axialgebälse mit Hochleistungsschaufeln	0,85
Schraubengebälse	0,80
Einfache Wandventilatoren	0,60
Motoren	η_M
0,2 kW	0,63
0,5 kW	0,70
0,8 kW	0,73
1,2kW	0,78
5 kW	0,85
10 kW	0,88
20 kW	0,90
50 kW	0,92
100 kW	0,93
1000 kW	0,95
Gesamtwirkungsgrad $\eta = \eta_G \cdot \eta_M$	

Tabelle 12: Wirkungsgrade von Motoren und Ventilatoren

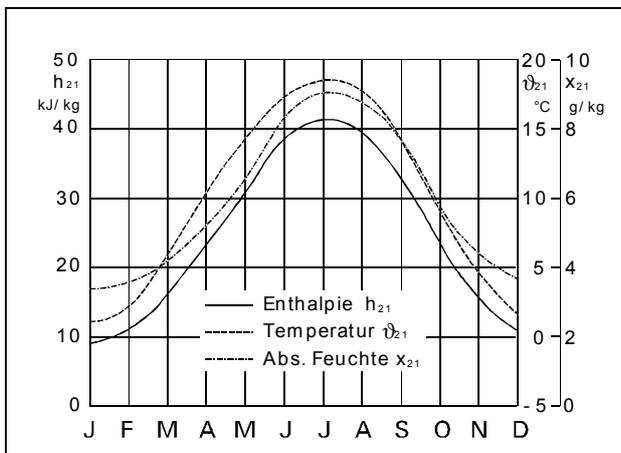


Bild 13: Mittelwerte für Enthalpie, Temperatur und Wasserdampfgehalt der Aussenluft

 Mit einem WRG-System wird aus Schwimmbadluft ein Teil der Abwärme auf die Zuluft übertragen. Zu- und Abluftmengen sind gleich gross. Folgende Zustände sind gegeben:

Ablufttemperatur = 32°C; Feuchte = 15 g/kg

Aussenlufttemperatur = -10°C; Feuchte = 1 g/kg

Durch die Wärmerückgewinnung wird die Aussenluft auf 21,5°C erwärmt. Die Abluft wird hingegen –bei gleicher Enthalpieabnahme – nur auf 14°C gekühlt. Aus diesen Zahlen ergeben sich für die Temperaturwirkungsgrade folgende Werte:

$$\eta_{\theta 1} = 43\%$$

$$\eta_{\theta 2} = 75\%$$

Trotz gleicher Luftmengen sind die Wirkungsgrade unterschiedlich, weil bei der Taupunktunterschreitung Kondensat ausgefallen ist und damit Verdampfungswärme freigesetzt wurde. Die Abkühlung der feuchten Luft ist deshalb weniger gross als dies bei vollständig trockener Luft gewesen wäre.

 Abwärme im Abwasser einer Gerberei von 35°C wird mit einem Rohrbündelwärmetauscher zum Vorwärmen von Brauchwasser genutzt. Es werden 5 m³/h auf 23°C abgekühlt. Das Erwärmen von 3 m³/h erfolgt von 8 auf 28°C. Die Temperaturwirkungsgrade betragen demnach:

$$\eta_{\theta 1} = 44\%$$

$$\eta_{\theta 2} = 74\%$$

Auch dies führt natürlich zu einem falschen Ergebnis, weil die Massenströme ungleich gross sind.

 Bei ungleichen Massenströmen, ungleichen spezifischen Wärmekapazitäten und bei Phasenumwandlungen muss die Formel des Enthalpiewirkungsgrades benutzt werden.

Jährlicher Wärmerückgewinn

Bei lufttechnischen Anlagen kann nicht wie bei anderen energietechnischen Anlagen von einem stationären Lastverlauf ausgegangen werden, sondern es liegt ein sinusähnlicher Verlauf des Aussenluftzustandes über das Jahr vor (Bild 13). Die Berechnung der jährlich zurückgewonnenen Wärme kann entweder mit Hilfe der mittleren Monatstemperaturen des jeweiligen WRG-Standortes oder mittels Summenhäufigkeiten für Temperatur und Feuchte erfolgen. Diese Summenhäufigkeiten sind in den folgenden Unterlagen zu finden:



SIA-Dokumentation D012: Meteodaten für die Haustechnik. Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), 1987. (Bezugsquelle: SIA, Postfach, 8039 Zürich)

SWKI-Richtlinie 83-2: Betriebskostenberechnung lufttechnischer Einrichtungen. Bern: Schweizerischer Verein von Wärme- und Klimaingenieuren (SWKI), 1983. (Bezugsquelle: SWKI, Postfach 2327, 3001 Bern)

Der jährliche Wärmerückgewinn zur wirtschaftlichen Beurteilung von Anlagen hängt neben der meteorologischen Situation vom Abluftzustand, von den Luftvolumenströmen mit den entsprechenden Betriebszeiten, von der maximalen Zulufttemperatur (und eventuell Feuchte) sowie vom gewählten WRG-System ab (Bild 14). Der sinusähnliche Jahresverlauf des Ausenluftzustandes führt dazu, dass auch der momentane Gewinn starken Veränderungen unterliegt. Bei Vergleichsrechnungen muss deshalb darauf geachtet werden, dass die Abluftzustände jeweils gleich sind.

Als Anhaltspunkt für mögliche Jahresenergien bei 24-Stunden-Betrieb dient Tabelle 15. Zur Umrechnung von Wirkungsgraden und Betriebszeiten kann folgende Formel benutzt werden:

$$q_{\text{neu}} = f \frac{q_{\text{alt}} \cdot \eta_{2,\text{neu}} \cdot t_b}{\eta_{2,\text{alt}} \cdot 24\text{h}}$$

$$q_{\text{neu/alt}} = \text{spez. Wärmemengen} \\ [\text{kWh/a für } 1000\text{m}^3/\text{h Luft}]$$

$$f = \text{Korrekturfaktor } 0,87 \dots 1,04 [-]$$

$$\eta_{2,\text{neu/alt}} = \text{Wirkungsgrade } [-]$$

$$t_b = \text{neue tägliche Betriebsdauer [h]}$$

Der Korrekturfaktor f berücksichtigt Lage und Dauer der Betriebszeiten. Er kann zwischen 0,87 (Betriebszeit von 7 bis 17 Uhr) und 1,04 (Betriebszeit von 18 bis 24 Uhr) betragen.

Für Anlagen ohne Aussentemperaturabhängigkeit genügen bei konstanten Betriebsbedingungen wenige Betriebspunkte der Abwärmequelle zur Berechnung des jährlichen Wärmerückgewinns.

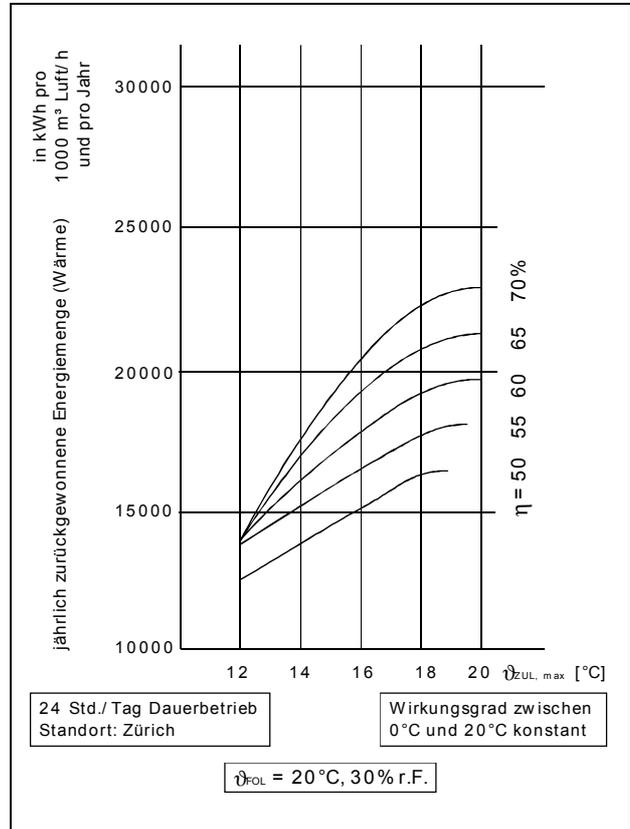


Bild 14: Wärmerückgewinn bei verschiedenen Wirkungsgraden bei trockenem Betrieb ($J_{11} = 20^\circ\text{C}$; 30% r.F.; $x_{11} = 4,5 \text{ g/kg}$) [Quelle: SWKI-Richtlinie 89-1]

	Fall A	Fall B
Ablufttemperatur	20°C	24°C
Zulufttemperatur	20°C	24°C
Wirkungsgrad	60%	60%
Betriebszeit	7-19 Uhr	7-19 Uhr
Rekuperator I	9,2 MWh/a	12,3 MWh/a
Regenerator II	9,2 MWh/a	12,3 MWh/a
Regenerator III	9,4 MWh/a	12,5 MWh/a

Tabelle 15: Wärmegewinn bei 12-Stunden-Betrieb ohne Feuchteausscheidung für 1000 m³/h

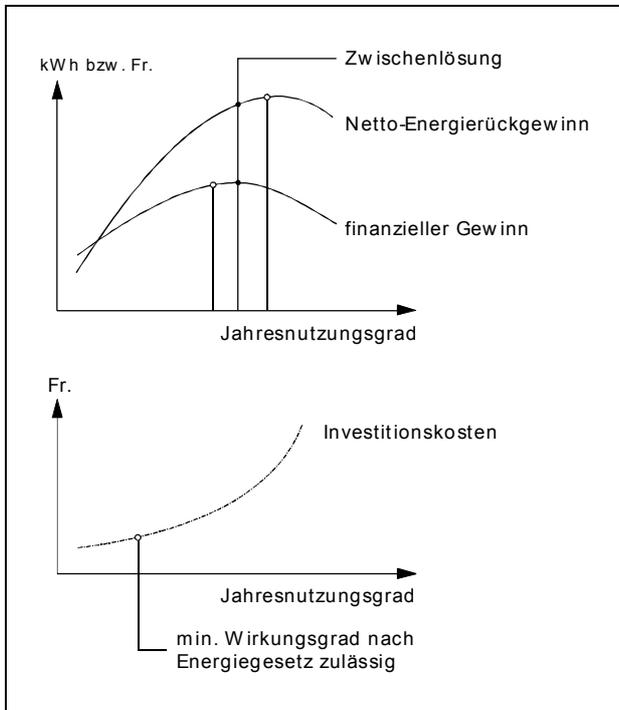


Bild 16: Optimierungskriterien qualitativ dargestellt [Quelle: SWKI-Richtlinie 89-1]

Netto-Energierückgewinn

Dieser berechnet sich aus dem totalen Energierückgewinn (Wärme) ERG_{TOT} vermindert um den elektrischen Hilfsenergieverbrauch (Ventilatoren, Pumpen, Hilfsantriebe) W_H und dem Energiebedarf für Leckluftströme W_{LL} . Wird ein Beobachtungszeitraum von einem Jahr gewählt, so ergeben sich Jahreswerte.

$$ERG_N = ERG_{TOT} - W_H - W_{LL}$$

Nutzungsgrad gemäss SWKI 89-1

Das Verhältnis des jährlichen Netto-Energierückgewinns ERG_N zum jährlichen Gesamt-Wärmeenergiebedarf Q_{TOT} ergibt den Nutzungsgrad η der Anlage.

$$\eta = ERG_N / Q_{TOT}$$

Kasten 17

Optimierung

Ein WRG/AWN-System kann nach den folgenden zwei Kriterien optimiert werden (Bild 16):

- Maximaler Netto-Energierückgewinn
 - Maximaler finanzieller Gewinn (grösste Kapitalrendite)
- Das Maximum des Netto-Energierückgewinns liegt meistens, im Vergleich zum maximalen finanziellen Gewinn, bei einem höheren Jahresnutzungsgrad. Die Investitionen nehmen mit höherem Rückgewinn bzw. Nutzungsgrad entsprechend zu. Die Lebensdauer einer WRG-Anlage wird normalerweise mit 10 bis 20 Jahren eingesetzt.

Maximaler Netto-Energierückgewinn

Bei den Optimierungsberechnungen bzw. der Auswahl von WRG/AWN-Anlagen soll der maximale Energie-rückgewinn ausschlaggebend sein. Bei diesem Verfahren wird der Mehraufwand für Zusatz- und Hilfsenergie vom Wärmerückgewinn mit angemessener Gewichtung subtrahiert. Siehe auch Kasten 17.

Maximaler finanzieller Gewinn

Bei dieser Berechnung werden sowohl die Betriebs- als auch die Investitionskosten optimiert.

Höhere Luftgeschwindigkeiten im Wärmetauscher ergeben zwar kleinere Apparate bzw. Investitionen, brauchen aber meistens einen erheblich grösseren Mehraufwand an Hilfsenergie. Damit sinkt der Nettogewinn und die Wirtschaftlichkeit, speziell bei steigenden Energiepreisen.

Hat eine Anlage nur eine kurze Betriebszeit (z.B. Provisorium), muss diese Lebensdauer in der Optimierungsberechnung berücksichtigt werden. Hier ist der vom Energiegesetz verlangte minimale Wirkungsgrad oft genügend.



Käufliche Software zur Optimierung von WRG/AWN-Systemen ist nicht bekannt. Es gibt aber Firmen, die die Berechnung des jährlichen Energiebedarfs, des jährlichen Netto-Energierückgewinns und des Nutzungsgrades als Dienstleistung anbieten (z.B. Konvekta AG, St. Gallen).

3.5 Wirtschaftlichkeit

Alle WRG/AWN-Systeme bringen einerseits erhebliche Energieeinsparungen, verursachen jedoch andererseits Investitionskosten und Betriebsmehraufwand, sodass die verschiedenen Fakten nur über eine Wirtschaftlichkeitsrechnung quantitativ gegeneinander abgewogen werden können.

Die Wirtschaftlichkeit wird aufgrund der jährlich anfallenden Kosten beurteilt. Diese setzen sich zusammen aus Kapitalkosten (abhängig von den Investitionen und Zinssätzen), Betriebskosten (für Wartung, Unterhalt) und den Energiekosten (proportional zum Energieverbrauch, abhängig vom spezifischen Energiepreis). Bei mehreren Varianten wird diejenige ausgewählt, die die minimalen jährlichen Kosten aufweist.

Für verschiedene WRG/AWN-Komponenten im Raumlufttechnikbereich sind in Tabelle 19 die relativen Investitionskosten zusammengestellt. Die Betriebskosten sind, bezogen auf die Anlagekosten, in Tabelle 20 aufgeführt.

Fallbeispiele in Anhang B

Hauptsächlich müssen die Energiekosten der eingesparten und der zusätzlich benötigten Energie berücksichtigt werden.

Es sind folgende Kosten für die Mehrinvestitionen zu berücksichtigen:

- Apparate (Wärmetauscher, Filter, Regelung, Kanal- bzw. Leitungsführung)
- Elektro- und Sanitär-Anschlüsse
- Zusätzlicher Platzbedarf
- Zusätzliche bauliche Massnahmen
- Honorare

Demgegenüber stehen Kosten-Einsparungen, z.B. bei:

- Energieerzeugung (Wärme und Kälte)
- Energieverteilung (kleinere Leitungen und Kanäle)
- Kleinere Luftheritzer
- Wegfall des Vorwärmers (inkl. Anschluss und Regelung)

Der Einfluss der nachstehenden Größen auf die längerfristige Wirtschaftlichkeit einer WRG/AWN-Anlage muss über eine Sensitivitätsanalyse ermittelt werden:

- Energiepreise
- Energiepreis-Entwicklung
- Amortisationszeiten
- Investitionskosten (speziell von Zusatzinvestitionen)
- Betriebskosten (Energie und Unterhalt)

WRG-System	Elektrische Energie	
	Pumpe, Motor	Ventilator
Luftsysteme:		
Rekuperator	–	3...6 %
Kreislaufverbund	1...3 %	3...7 %
Wärmerohr	–	3...5 %
Regenerator	0,2...2 %	2...4 %
Wassersysteme:		
Rekuperator	< 1 %	–
Kreislaufverbund	< 1 %	–

Tabelle 18: Elektroenergie-Anteile in % vom Wärmerückgewinn verschiedener WRG/AWN-Systeme

Wärmetauscher	Kosten für kleine Luftvolumenströme	Kosten für grosse Luftvolumenströme
Plattenwärmetauscher	Eher niedrig	–
Rotor-Wärmetauscher	Mittel	Mittel
Kreislauf-Verbund	Eher hoch	Eher niedrig

Tabelle 19: Rangliste der relativen Kosten für verschiedene Wärmeaustauscher-Systeme. Die Rangfolge ist, je nach Luftvolumenstrom, verschieden.

Bauart	Nutzung [Jahre]	Unterhalt [%]	Bedienung [%]
Plattenwärmetauscher – Aluminium	10	1	2
– korrosionsbeständiger Werkstoff	20	1	2
Kreislaufverbund	20	2	2
Rotationswärmetauscher mit Sorptionsfläche	12	4	3
Rotationswärmetauscher beschichtet	20	3	3
Wärmepumpe	10	4	3

Tabelle 20: Nutzungsdauer und Kostenfaktoren für WRG-Systeme



Die Kenntnis des Netto-Energierückgewinns ist die Voraussetzung für jede Optimierung von WRG- und AWN-Systemen. Der Richtlinie des SWKI empfiehlt für lufttechnische Anlagen eine Anströmgeschwindigkeit auf die aktive Austauschfläche von < 2 m/s. Die Geschwindigkeit von 2,5 m/s für Rekuperatoren und Kreislaufverbund und 3 m/s für Rotationswärmetauscher sollte aus energetischen Gründen nicht überschritten werden.

Bei der klassischen Wirtschaftlichkeitsrechnung wird die Umweltbelastung nicht berücksichtigt. Diese kann für die verschiedenen Energieträger und Energiesysteme über spezifische Preiszuschläge beziffert und in dieser Form in die Wirtschaftlichkeitsberechnungen eingebaut werden. Beispiele für Energiepreiszuschläge und weitere Hinweise zur Wirtschaftlichkeitsberechnung sind zu finden in:



RAVEL zahlt sich aus. Praktischer Leitfaden für Wirtschaftlichkeitsberechnungen. Bern: Bundesamt für Konjunkturfragen, 1991. (Bezugsquelle: EDMZ, 3000 Bern)

4. Planungshinweise

4.1 RAVEL-Checklisten Zuerst den Energieverbrauch senken!

Jeder Industrie- oder Gewerbebetrieb steht früher oder später vor der Aufgabe, seinen Energieverbrauch kritisch zu prüfen. Dies ist der Moment, die Möglichkeiten der Wärmerückgewinnung oder Abwärmenutzung in Betracht zu ziehen (Kasten 1).

Bevor aber bauliche und apparative Massnahmen getroffen werden, sollten alle anderen Möglichkeiten ausgeschöpft werden, die geeignet sind, den Energiebedarf zu senken.

Anwendung der RAVEL-Checklisten

Um ein systematisches Vorgehen zu ermöglichen hat RAVEL eine Quellen- und eine Senken-Checkliste entwickelt¹. Damit ist es möglich, die besten Verbindungen zwischen Erzeugern (Quellen) und Abnehmern (Senken) nach thermodynamischen und technischen Kriterien zu finden.

 Kopiervorlagen mit Erklärungen in Anhang D

Die Ausgangslage bei WRG/AWN-Anwendungen lässt sich gemäss Kasten 2 unterteilen. Die Bestandsaufnahme der Quellen und Senken erfolgt bei Neuanlagen theoretisch am Schreibtisch und bei bestehenden Anlagen wird ein Inventar der Quellen und Senken vor Ort erstellt. Die Reihenfolge der Suche von Senken lautet dabei:

- Prozessinterne Abnehmer (WRG)
- Betriebsinterne Abnehmer (interne AWN)
- Externe Abnehmer (externe AWN)

Beispiele für systematische Gliederungen sind in Bild 3 und den Tabellen 4 und 5 aufgezeigt.

In übersichtlichen Fällen (ein bis zwei Quellen-Senken-Paare) sind die Möglichkeiten mit etwas Erfahrung anhand der Verknüpfungsgrössen rasch erstellt. Wo mehrere Möglichkeiten offen stehen, wird die beste Quellen-Senken-Anpassung durch mehrfachen Quervergleich mittels Verknüpfungsmatrizen eruiert. In einem ersten Lauf werden die offensichtlich besten Anpassungen für die einzelnen Quellen-Senken-Paare gemacht. Anschliessend ist zu überlegen, ob nicht noch andere Kombinationen zu einem noch besseren Gesamtsystem führen.

Allgemeine Planungshinweise

Die Reduktion des Energiebedarfes vermindert die Umweltbelastung. Im Gegensatz zu anderen Umweltschutzmassnahmen bringt die Einsparung von Endenergie aber auch bares Geld.

In vielen Fällen ergeben sich durch die direkte Kopplung von Umweltschutzmassnahmen mit Wärmenutzungstechniken erhebliche Vorteile. (Beispiel: Bei der Lösungsmittelrückgewinnung werden weniger dampfförmige Lösungsmittel an die Umwelt abgegeben und erst noch Wärme aus dem Lösungsmittelkondensat zurückgewonnen.)

Durch moderne Wärme-Integrationsverfahren lassen sich Energieprozesse durch eine wirtschaftliche Kopplung optimieren.

Neben den Amortisationszeiten sollten auch andere Effekte mitberücksichtigt werden. Durch die bessere Nutzung der Energie können beispielsweise Kessel stillgelegt oder durch kleinere ersetzt werden. (Beispiel: Beim Ersatz eines Grosskessels durch einen kleineren Abfallverbrennungskessel werden nicht nur die Bereitschaftsverluste reduziert, sondern es entfallen auch die Kosten zur Abfallentsorgung.)

Durch die Senkung des Wärmeenergiebedarfes reduzieren sich in der Regel auch die Leistungen der Kühlprozesse. Durch Umstellung auf kühlwasserfreie Trockenkühlssysteme vermindern sich Kühl- und Abwasserkosten.

Heute existiert eine grosse Auswahl von Wärmetauschersystemen, Komponenten und Rückgewinnungsanlagen. Selbst für hohe Sicherheitsansprüche (Anlagen, Produkte, Umwelt) stehen entsprechende Systeme zur Verfügung.

Kasten 1

Ausgangslagen für WRG/AWN-Konzepte

Neuanlage: Optimale Voraussetzungen – unabhängig von Bestehendem ist eine freie Vernüpfung von Quellen und Senken möglich.

Verbindung von Neuanlage mit bestehender Anlage: Die bestehende Anlage setzt Randbedingungen an der Nahtstelle. In jedem Fall sollte der Erneuerungsbedarf der bestehenden Anlage abgeklärt werden.

Sanierung: Die bestehende Anlage setzt alle Randbedingungen. Deshalb muss der Istzustand durch gezielte Einzelmessungen und eine sorgfältige Analyse beurteilt werden.

Kasten 2

¹ Brunner, Robert: WRG/AWN-Checkliste. Materialien zu RAVEL. Bern: Bundesamt für Konjunkturfüragen, 1992. (Bezugsquelle: EDMZ, 3000 Bern, Best.-Nr. 724.397.31.52 d)

Energieträger		Temperatur	Druck
Wärmequellen		Wärmesenken [bar]	
Dampf	Heissdampf	400	10
	Sattdampf	105	1,2
	Brühdampf	100	1,01
Heizwasser	Heisswasser	+50/180/140	25
	Heizwasser	+50/90/70	2,5
Brauchwasser	Sanitär-Warmwasser	70/50	1,5
Kühlwasser	Verbrauchswasser	+25/0/40	4
	Kreislaufwasser	+50/26/32	6
Thermeöl	Begleitheizung	250/200	3

Tabelle 5: Beispiel einer Wärmebedarfsgliederung nach Energieträger, Temperatur und Druck

Aussenluft	+35 °C	+25 °C	Lufttech. Anlagen
	-15 °C	+5 °C	
Offene Gewässer	+20 °C	+5 °C	Raumheizung
	±0 °C	+25 °C	
Grundwasser	+15 °C	+25 °C	
	+10 °C	+5 °C	

Bild 3: Übliche vorkommende Temperaturbereiche von Wärmequellen und -senken

Branche	Temperaturniveau der Abwärme
Haustechnik (Komfortbereich)	unter 50°C
Energieerzeugung (Kraftwerke)	unter 50°C
Maschinen- und Metallindustrie	über 300°C
Baumaterialproduktion	über 300°C
Textilindustrie	50...300°C
Papier- u. Kartonindustrie	50...300°C
Chemische Industrie	50...300°C
Nahrungsmittelindustrie	unter 50°C 50...300°C

Tabelle 4: Typische Abwärmtemperaturniveaus in einzelnen Branchen

Bei sehr vielen Paaren wird eine Handauswertung zu aufwendig. Dann bleibt die Möglichkeit, sich auf die grössten Energieströme zu konzentrieren und eine grobe Anlagestrategie zu entwickeln. Komplexe Anlagen können nur mit dem Computer und den entsprechenden Methoden vollständig optimiert werden.

Pinch Design Method in Anhang C

Die erarbeitete Lösung wird grob in einem Energieflussschema dargestellt. Nachdem dann eine technische Lösungsmöglichkeit vorliegt, müssen auch noch die wirtschaftlichen Aspekte ausgeleuchtet werden.

Quellen- und Senkenparameter

Diese Parameter beschreiben die energetischen und die stofflichen Aspekte (Kasten 6). Die Art des Abwärm-Transportmediums sowie seine thermodynamischen Werte und Stoffeigenschaften sind wesentliche Beurteilungskriterien für die Abschätzung des Transportaufwands und die Nutzbarkeit der Abwärme. Aus der Stoffzusammensetzung können die Korrosionseigenschaften und die Möglichkeit des Auftretens von Kondensation in den WRG/AWN-Apparaten abgeschätzt werden.

Vernetzungsparameter

Die Vernetzungsparameter erlauben eine Grobauswahl der optimalen Quellen-Senken-Paare:

Temperaturdifferenz: Die Abwärmeströme sollten derart mit den Senken verbunden werden, dass eine exergiegerechte Nutzung erfolgt. Es sollte immer auch die Mehrfachnutzung eines Abwärmestromes durch das Hintereinanderschalten von Verbrauchern mit sinkendem Temperaturbedarf in Betracht gezogen werden. (Kasten 7)

Verhältnis von Energieangebot zu Energiebedarf: Je grösser das Energieangebot einer Quelle ist, desto lohnender ist die Nutzung. Das nutzbare Angebot ergibt sich aus den Anforderungen der Senke. (Kasten 8)

Leistungsspitzen von Angebot und Nachfrage: Liegen Verbraucher und Quelle auch leistungsmässig nahe beieinander, so ist eine Anpassung bei zeitlicher Übereinstimmung problemlos. Abhängig vom betrachteten Problem ist die Leistung als mittlere Energie in einem entsprechend gewählten Zeitintervall zu interpretieren. Speicher sind ein geeignetes Mittel, um hohe Leistungsspitzen abzufangen. (Kasten 10)

Abwärmefall der Quelle und Wärmebedarf eines Verbrauchers haben jeweils einen prozesscharaktere-

ristischen Lastgang. Je besser Betriebszyklus und Betrieb von Angebot und Nachfrage zeitlich und mengenmässig übereinstimmen, desto wirtschaftlicher ist eine Nutzung. Ideal ist ein synchroner Verlauf beider Prozesse, wie bei der Wärmerückgewinnung; diese ist daher den anderen Anwendungen meist überlegen.

Distanz zwischen Quelle und Senke: Die Nutzung von Abwärme beruht auf dem Transport eines Wärmeträgermediums. Dabei handelt es sich um eine sehr aufwendige Art der Energieübertragung – verglichen mit dem Transport von Brennstoffen oder Strom. Für wirtschaftliche Nutzungsmöglichkeiten dürfen daher die Wärmetransportleitungen bestimmte maximale Entfernungen nicht überschreiten. (Kaster⁹)

Quellen- und Senkenparameter

Wärmemengen und Wärmeleistungen

Die Leistung der Abwärmequelle ergibt sich bei Energiewandlern aus dem Brennstoffdurchsatz und dem prozentualen Verlustanteil. Bei Wärmequellen wird die Leistung als Mittelwert aus der Wärmemenge in einem charakteristischen Zeitintervall ermittelt. Der Leistungsgang ist für Anlagenoptimierungen notwendig. Bei den Senken sind die entsprechenden Bedarfsgrössen festzuhalten.

Temperaturen

Die Temperatur am Quellenausgang sollte ein nutzbares Niveau aufweisen. Sie muss nicht über der Verbrauchertemperatur liegen, sie sollte aber genügend über der minimalen Einspeisungstemperatur der Senke liegen. Branchentypische Temperaturniveaus von Abwärmequellen sind in Tabelle 4 zusammengestellt. Für genaue Abklärungen und in Grenzfällen ist der Temperaturgang mit verschiedener zeitlicher Auflösung aufzuzeichnen. In konvektiven Systemen und bei den Senken sind Vorlauf- und Rücklauftemperaturen aufzunehmen.

Betriebszeiten

Möglichst hohe jährliche Betriebszeiten und Betriebszyklen genügender Länge sollen erreicht werden. Vorteilhaft ist ein kontinuierlicher Betrieb.

Wärmetransport

Konvektiver Wärmetransport ist am problemlosesten. Bei diffuser Wärmeabgabe ist ein Sammel- und Konzentrationsprozess notwendig. Wasser und Luft in technisch reiner Form sind problemlose Wärmeträger.

Physikalische Eigenschaften und stoffliche Zusammensetzung des Wärmeträgers

Weichen die physikalischen Eigenschaften des Wärmeträgers wesentlich von Wasser bzw. Luft ab, können unter Umständen keine Standardkomponenten eingesetzt werden. Die Kenntnis der stofflichen Zusammensetzung des Wärmeträgers ist hinsichtlich Korrosion und Verschmutzung in Kanälen, Rohrleitungen und Wärme tauschern von grosser Bedeutung. Problemlos sind meistens homogene, disperse oder rauchförmige Stoffgemische. Probleme treten erst bei Partikeln im Wärmeträger auf, die abrasiv oder verschmutzend wirken. Chemisch inerte Stoffe sind ideal. Vorsichtsmassnahmen sind nötig bei korrosivem, brennbarem oder explosivem Stoff. Toxische oder mit Krankheitserregern verschmutzte Stoffe dürfen unter keinen Umständen in den Aufenthaltsbereich von Lebewesen und in die Umwelt gelangen. In prozesstechnischen Anlagen ist die Abluft häufig mit Stoffen beladen, die zu Verschmutzungen in den Wärmetauschern führen können. Der Reinigungsaufwand ist abzuschätzen. Korrosion und Verschmutzung durch Schadstoffe können zu frühzeitiger Ausserbetriebsetzung von WRG/AWN-Anlagen führen.

Vernetzungsparameter: Temperaturdifferenz

Je grösser die Temperaturdifferenz ist, desto lohnender ist eine Wärmetauscheranwendung. Die Anforderungen an den Wärmetauscher werden höher, je kleiner die Temperaturdifferenz ausfällt.

Liegt die Quellentemperatur unter der Senktemperatur, so ist die Nutzung der Wärme mittels Wärmepumpe abzuklären. Bei grossen Energiemengen und kleiner notwendiger Temperaturdifferenz über der Wärmepumpe sind wirtschaftlich vertretbare Lösungen möglich.

Kasten 7

Vernetzungsparameter: Verhältnis von Energieangebot zu Energiebedarf

Ein Wert >1 deutet auf ein Überangebot hin; zur Nutzung der Quelle muss eine weitere Senke oder eine Kunstlast vorgesehen werden. Damit eine problemlose Nutzung möglich ist, muss das Verhältnis der mittleren Leistung über ein charakteristisches Zeitintervall ebenfalls >1 sein. Ist das Verhältnis <1, so muss eine Teildeckung untersucht werden. Teildeckung ist bei grossen Energiemengen interessant.

Lastmanagement und Energiemanagement können höhere Ansprüche an die Mess- und Regeltechnik stellen. Überschusswärme muss abgeführt werden (z.B. über Kühltürme). Differenzen zwischen Angebot und Nachfrage sollten erkannt und mit Speicherstrategien ausgeglichen werden.

Kasten 8

Vernetzungsparameter: Distanz zwischen Quelle und Senke

Der Abstand zwischen dem Quellen-Senken-Paar sollte minimal gehalten werden. Ausgedehnte Rohrleitungs- und Kanalnetze sind teuer, verlieren Wärme und müssen unterhalten werden. Müssen mehrere hundert Meter überbrückt werden, so wird die Wärme bevorzugt in Rohrleitungen übertragen. Die Wärmedämmung von Rohrleitungen (verglichen mit Kanälen) ist billiger, der Unterhalt einfacher und die Montagekosten sind tiefer. Die maximale praktisch realisierbare Ausdehnung hängt von den Kosteneinsparungen ab und muss für jedes WRG/AWN-System individuell bestimmt werden.

Kasten 9

Weitere Vernetzungsaspekte

Übereinstimmung der Anlagenlebensdauer: Anlagen zur Energielieferung als auch Energieabnehmer sollten im gleichen Lebensalter stehen. Speziell bei der Nutzung durch Dritte muss die Verfügbarkeit der Abwärme langfristig gesichert sein.

Stofftrennung: In prozesstechnischen Anlagen ist die Abluft Transportmedium für Wärme und Stoffe (Feuchtigkeit beim Trocknen, Schadstoffe und Stäube bei Reinigungsprozessen). Die Stoffe sollten beim Wärmeaustausch nicht wieder in die Zuluft gelangen. In dieser Hinsicht kann der Rotationswärmetauscher problematisch sein, beim Trennflächenwärmetauscher muss die Dichtigkeit bei den auftretenden Drücken gewährleistet sein. Grundsätzlich sollte ein Druckgefälle von der Aussenluft auf die Fortluft bestehen. Ähnliche Überlegungen gelten für die Unterbindung der Verfrachtung von Krankheitserregern von der Abluft in die Zuluft. Treten im Wärmeträger giftige oder umweltgefährdende Stoffe auf, so wird der Kreislauf mit Vorteil geschlossen ausgeführt.

Wirtschaftliche Kriterien

Als Grundlage für Investitionsentscheidungen muss aus dem technisch nutzbaren Abwärmepotential mit Hilfe von wirtschaftlichen Kriterien das wirtschaftlich nutzbare Abwärmepotential ermittelt werden. Hierzu werden, je nach Bedeutung des Projektes, unterschiedliche Verfahren angewendet.

Die thermodynamische Wertskala tritt in der Praxis etwas in den Hintergrund. Eine entscheidende Bewertung muss mit Hilfe der Kosten erfolgen. Dabei gilt:

$$\text{Wert der Abwärme} = \frac{\text{Energieeinsparung}}{\text{Kapitaleinsatz}} \quad [\text{kWh}/\text{Fr.}]$$

Der Wert der Abwärme ist dabei die Differenz zwischen dem Aufwand, der nötig ist, um die Abwärme zu nutzen, und dem durch die Nutzung erzielten Ertrag. So betrachtet ist die Bewertung von Abwärme nur möglich, wenn die Verhältnisse beim potentiellen Nutzer in Betracht gezogen werden:

- Lässt sich mit Abwärme niedriger Temperatur mit geringem Aufwand ein erheblicher Teil des Heizenergiebedarfes für die Raumheizung substituieren, so hat diese Abwärme trotz ihres geringen Exergieanteils einen entsprechend hohen Wert.
- Ist bei der Nutzung von Abwärme hoher Temperatur die Alternative «Stromerzeugung» kosten- und ertragsmässig per saldo ungünstiger als die Alternative

«Wärmebedarfsdeckung», so ist es sinnvoll und richtig, auch Wärme von hoher Temperatur zur Deckung eines Niedertemperatur-Verbrauchers einzusetzen.

Externe Kosten

Externe Effekte gehen in betriebswirtschaftliche Entscheidungen leider meist nicht oder nur als Randbedingungen ein. Hierzu zählen volkswirtschaftliche Gesichtspunkte (Primärenergieverbrauch, Versorgungssicherheit, Verfügbarkeit) ebenso wie Umweltaspekte (Verminderung von Schadstoffemissionen, Schonung der Ressourcen) oder Beschäftigungsaspekte (Auswirkungen auf den Arbeitsmarkt).

4.2 Messmethoden

Ein seriöser Nachweis des Erfolgs kann nur über Messwerte erbracht werden. Dazu muss allerdings ein entsprechendes Messkonzept vorliegen. Um einen allfälligen Sanierungserfolg in Zahlen nachweisen zu können, müssen aber auch Messwerte der Anlage vor der Sanierung vorhanden sein.

Gründe für Messungen in WRG/AWN-Anlagen sind:

- Erfassung des Istzustandes (Checkliste)
- Erfassung der Wirkung von Massnahmen (Erfolgskontrolle)
- Analyse von einzelnen Aspekten
- Einregulierung der Anlage
- Optimaler Betrieb, permanente Überwachung mit Gebäudeleitsystem

Gemessen werden energierelevante und betriebstechnische Grössen bzw. das Verbraucherverhalten:

- Energie (Wärme, Elektrizität, Brennstoffverbrauch)
- Leistung (Wärme, Elektrizität, Brennstoffdurchsatz)
- Temperaturen
- Durchflüsse (Flüssigkeiten, Gase)
- Relative Feuchte
- Druck
- Einschaltzeiten, Betriebszeiten, Statussignale
- Anzahl Schaltspiele

Für Einzelmessungen werden oft fliegende Messaufbauten verwendet, während die Messstellen bei Einsatz eines Gebäudeleitsystems permanent in der Anlage bleiben. Hilfreich für sporadische Messungen ist das Vorsehen von vorbereiteten Messstellen, die mit wenigen Handgriffen mit Sensoren bestückt werden können.

Da Energiemessungen aufwendig sind, werden in der Praxis nur wenige Grössen in Form von Sammelmes-

Vernetzungsparameter: Leistungsspitzen von Angebot und Nachfrage

Speicher dienen der Überbrückung von zeitlichen Unterschieden zwischen Abwärmefall und Wärmebedarf. Sie erfordern jedoch zusätzliche Investitionen, erhöhten Steuer- und Regelaufwand und ergeben zusätzliche Verluste. Die Kapazität des Speichers leitet sich aus der zu speichernden Energiemenge ab.

Die zeitlichen Abstände der Leistungsmaxima zwischen Quellen und Senken bestimmen die Speicherqualität. Geringe Verluste bei der Langzeitspeicherung sensibler Wärme sind nur mit sehr grossen Speichern möglich. Je grösser der Abstand, desto mehr Speicheraufwand muss getrieben werden. Kurzzeitspeicherung im Bereich von Stunden und Tagen lässt sich mit konventioneller Technologie beherrschen. Langzeitspeicherung über Wochen und Monate ist aufwendig und nur in Sonderfällen gerechtfertigt. Anstelle der Langzeitspeicher kann in diesen Fällen eine rationelle Nutzung durch eine geeignete Betriebsstrategie der Anlage erzielt werden (z.B. optimierter Betrieb in der Übergangszeit, Zuschalten weiterer Verbraucher).

Mit dem Speicher kann auch eine Leistungsanpassung erfolgen. Kurze hohe Quellenleistung kann in gleich mässige tiefere Wärmeabgabe transformiert werden. Umgekehrt kann mit einer sanften Speicherladung kurzfristig eine schwache Quelle stark belastet werden.

Je nach Verwendungszweck muss der Speicher auf die entsprechende Aufgabe ausgelegt werden. Grundsätzlich sind aus Wirtschaftlichkeitsgründen Anwendungen ohne Speicher solchen mit Speichern vorzuziehen. Nur ist oft eine Wärmenutzung ohne Zwischenspeicherung nicht möglich.

Die Lage der Angebots-Nachfrage-Maxima dient nur als grober Indikator. So kann beispielsweise ein periodisch längerdauerndes Überangebot das Speicherproblem entschärfen. Für detaillierte Untersuchungen muss der zeitliche Verlauf von Angebot und Nachfrage aufgenommen werden.

Kasten 10

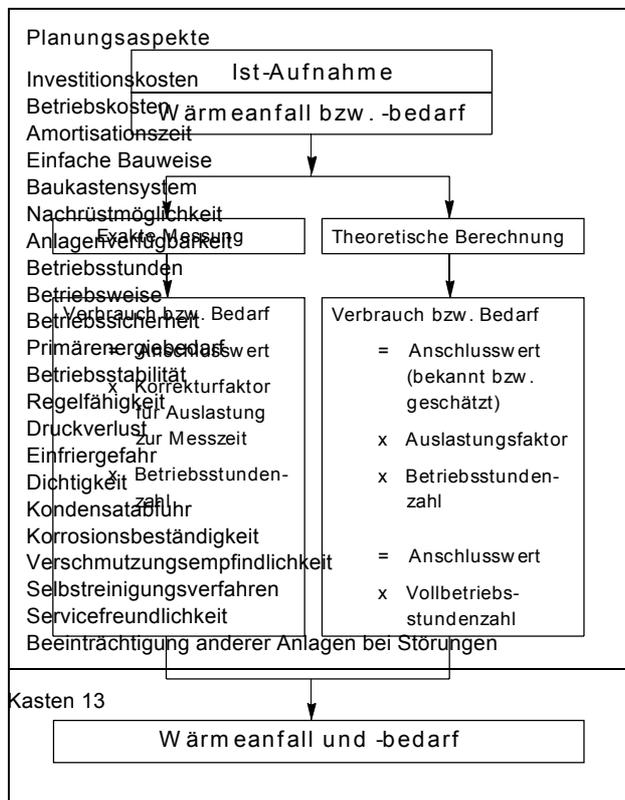


Bild 11: Erfassen von Energiebedarf und Energieverbrauch [Quelle: WRG und AWN durch Elektrowärmepumpen in Gewerbe und Industrie, Band VIII, Essen, Vulkan verlag]

Berechnung des Energieverbrauchs

$$W = P \cdot f_A \cdot t_B$$

W = Energieverbrauch [kWh]
 P = Anschlussleistung [kW]
 f_A = Auslastungsfaktor [-]
 t_B = Betriebsdauer [h]

Die Betriebsdauer kann relativ sicher bestimmt werden. Demgegenüber beinhaltet der Auslastungsfaktor oft eine grössere Unsicherheit.

Kasten 12

sungen (z.B. Wärmemenge bei der Hauptstation, Elektrizität an der Haupteinspeisung) erfasst. Nun können aber Energieflüsse nur mit Hilfe von Messungen erfasst werden. So trivial dies klingt, so häufig wird es nicht beachtet. Oft begnügt man sich damit, auf der Basis von «üblichen» Wirkungsgraden, branchenspezifischen Kennzahlen, Nenndaten und ähnlichem, Abwärmenutzungskonzepte auszuarbeiten und vorzuschlagen. Mit diesen Basisdaten aber steht und fällt der Erfolg eines Konzepts. Können keine exakten Messungen durchgeführt werden, so müssen die Ausgangsdaten mindestens auf einer Minimalbasis erhoben werden (Bild11 und Kasten 12).

Exakte Messungen umfassen die Energiemessungen in den interessierenden Energieströmen. Als Messmittel werden hauptsächlich gebraucht:

- Elektrische Energiezähler
- Wärmemengenmesser (Temperaturdifferenz, Durchfluss)
- Brennstoffverbrauch (Gaszähler, Ölzähler, Waage)
- Betriebsstundenzähler

Aus der Energiebilanz können dann weiter Energieflüsse berechnet werden. Vollständige Messungen enthalten auch die Erfassung der Randbedingungen.

Der nachträgliche Einbau der Messmittel für die exakten Messungen ist normalerweise sehr aufwendig. Bei der Minimalbasis wird mit minimalem Messmitelaufwand gearbeitet. Durch das Abschätzen der Anschlusswerte und der Annahme konstanter Durchflüsse und konstanter Temperaturdifferenzen werden über Betriebsstundenzahlen Energien ermittelt:

- Betriebsstundenzähler
- Abschätzung Anschlusswert (Leistungsschild)
- Abschätzung Temperaturdifferenz (Anlegethermometer)
- Abschätzung Durchfluss (Ultraschall-Durchflussmesser)
- Abschätzung Brennstoffverbrauch (Vorratsabnahme)

Die Abschätzungen werden mit Vorteil mit einfach durchzuführenden Einzelmessungen (oben in Klammern aufgeführt) verifiziert. In vielen Fällen ist die erzielbare Genauigkeit für erste Konzeptabschätzungen genügend.

4.3 Lösungsfindung

Aus dem mehrfachen Vergleich der einzelnen Quellen und Senken mit den vorher aufgestellten Methoden kann eine mögliche Konfiguration erarbeitet werden. Bevor eine

Lösungsidee weiter verfolgt wird, ist es von grossem Vorteil, wenn man die ins Auge gefasste Lösung zuerst in Form eines Energieflussdiagramms aufzeichnet. Die Vernetzung von energietechnischen Anlagen kann damit vorerst losgelöst von der apparatetechnischen Realisierung aufgestellt werden.

Anhand der Führung des Energieflusses werden viele Fragen aufgeworfen, deren Beantwortungen Meilensteine auf dem Weg zur Lösung bilden. Der übersichtlichen Darstellung wegen kann das Energieflussdiagramm ein nützliches Hilfsmittel zur Vermeidung grober Fehler sein.

Durch WRG/AWN werden Brennstoffe und – weniger häufig – Elektrizität, substituiert. Diese Auswirkungen können die Wirtschaftlichkeit der WRG/AWN entscheidend beeinflussen. Es genügt deshalb nicht, nur das WRG/AWN-System vor Augen zu haben, sondern es muss die gesamte betriebliche Energiewirtschaft in die Betrachtungen einfließen. Zuwenig durchdachte Teiloptimierungen können sich nachteilig auf das entscheidende Gesamtoptimum auswirken.

Die Abschätzung der verschiedenen Wärmemengen kann aus den Durchflussraten, Temperaturen und den Stoffwerten einerseits und aus Betriebsdaten und Nutzungsgraden andererseits erfolgen. Zeigen diese Berechnungen, dass im untersuchten Quellen-Senken-Paar nur ein geringer Anteil der Abwärme genutzt wird, oder dass die Abwärmemenge weit unter dem Bedarf der Senke bleibt, dann muss ein anderes Quellen-Senken-Paar gesucht werden. Im ersten Fall entsteht viel ungenutzte Abwärme, wenn keine weiteren Abnehmer gefunden werden. Im zweiten Fall muss eine andere Quelle gesucht werden oder ein mehrfaches Einspeisen aus verschiedenen Quellen, bis die notwendige Wärme aufgebracht werden kann. Erst nach den Energieflussüberlegungen wird auf die apparative Seite des Problems eingegangen.

Die apparative Lösung orientiert sich an den nachstehenden Anwendungs- und Kombinationsmöglichkeiten.

- Direkter Wärmeübergang ohne Wärmeträger (Regeneratoren und Rekuperatoren)
- Direkter Wärmeübergang mit Wärmeträger (Regeneratoren)
- Indirekter Wärmeübergang mit Wärmeträger (kreislaufverbundenes System)
- Wärmepumpen, Wärmetransformatoren, Wärmekopplung, ORC-Anlagen (Organic Rankine Cycle)

Grundsätzlich kann gesagt werden, dass Anlagen mit einem höheren Gesamtnutzungsgrad höhere Investitionskosten und einen Mehrverbrauch an elektrischer Energie für Pumpen und Ventilatoren bewirken.

Vorgehensmethode

1. Prozess- oder Anlagenevaluation
2. Grobanalyse
 - Datenerfassung und Zustandsaufnahme
 - Interpretation
 - Wirtschaftlichkeit (Grobschätzung)
 - Nutzungskonzept und weiteres Vorgehen
3. Feinanalyse
 - Systemgrenzen festlegen
 - Detaillierte Zustandsaufnahme
 - Bilanzen für Energie und Leistung
 - Massnahmenliste, neue Betriebszustände
 - Wirtschaftlichkeitsrechnungen
 - Projektierung
4. Ausführung bzw. Sanierung
5. Betriebsoptimierung
6. Erfolgskontrolle

Kasten 14

Weitere wichtige Planungsaspekte, die nicht in der Checkliste enthalten sind, sind in Kasten 13 zu finden.

Für Lüftungstechnischen Anlagen bestehen festgelegte Schemata und standardisierte Geräte zur Wärmerückgewinnung. Bei Abwärmenutzungsanlagen sind Komponenten und System (Rekuperatoren, Regeneratoren und Wärmepumpen) jeweils der individuellen Situation anzupassen. Planung, Berechnung, Optimierung, Montage, Betrieb und Wartung sind davon betroffen. Nur Einzelkomponenten, wie z.B. Abgaswärmetauscher oder ähnliches, können in unterschiedlichen Anlagen als Bausteine eingesetzt werden.

4.4 Planungsphasen

Ausschreibungsvorlagen, die alle relevanten Punkte enthalten, sind in der SWKI-Richtlinie 89-1 zu finden. Im selben Dokument wird für lufttechnische Anlagen auf die wesentlichsten Punkte bei Abnahme und Garantie hingewiesen.

Die wichtigsten Planungsschritte sind in Kasten 14 zusammengestellt.

 Heft 1, Kapitel 6

.....		Q	.....
Bezeichnung		Referenznummer	
WÄRMEQUELLE		<input type="checkbox"/> Wandler	<input type="checkbox"/> Verbrennung <input type="checkbox"/> Prozess
ANLAGEDATEN			
Beobachtungsperiode		Jahr, Heizperiode usw.	
Energieverbrauch		kWh pro Periode	
Verluste		% vom Energieverbrauch	
Abwärme		% vom Energieverbrauch	
Abwärmemenge		kWh pro Periode	
Durchfluss		m³/h	
Strömungsgeschwindigkeit		m/s	
Druck		Pa	
Feuchte		% r.F.	
Dichte		kg/m³	
Wärmekapazität		kJ/kg K	
Leistung			
Minimalwert: <input type="checkbox"/> kW		
Mittelwert:	..... kW		
Maximalwert:	..... kW		
Temperatur			
Minimalwert:	...../..... °C		
Mittelwert:	...../..... °C		
Maximalwert:	...../..... °C		
Betriebszeiten			
Minimalwert:	..... h/d		
Mittelwert:	..... h/d		
Maximalwert:	..... h/d		
Abmessungen (Skizze)			

BEURTEILUNG				
		***	**	*
Betriebsweise	<input type="checkbox"/> kontinuierlich *** <input type="checkbox"/> intermittierend ** <input type="checkbox"/> chargenweise **...* <input type="checkbox"/>			
Form der Wärmeabgabe	<input type="checkbox"/> leitungsgebunden *** <input type="checkbox"/> diffus **...*			
Wärmeträger	<input type="checkbox"/> Wasser, Luft *** <input type="checkbox"/> Flüssigkeit, Gas ** <input type="checkbox"/> Feststoff *			
Strömungstechnische Eigenschaften	<input type="checkbox"/> erzwungene Konvektion *** <input type="checkbox"/> freie Konvektion **...*			
Physikalische Eigenschaften	<input type="checkbox"/> homogen *** <input type="checkbox"/> dispers (milchig), rauchförmig **...* <input type="checkbox"/> abrasiv (schmirgelnd), verschmutzend * <input type="checkbox"/>			
Chemische Eigenschaften	<input type="checkbox"/> inert (neutral) *** <input type="checkbox"/> korrosiv, umweltbelastend **...* <input type="checkbox"/> brennbar, explosiv * <input type="checkbox"/>			
Physiologische Eigenschaften	<input type="checkbox"/> unbedenklich *** <input type="checkbox"/> toxisch **...* <input type="checkbox"/> verschmutzt, kontaminiert **...* <input type="checkbox"/>			
Anlagealter	<input type="checkbox"/> Neuanlage *** <input type="checkbox"/> Lebensdauer-Mitte **...** <input type="checkbox"/> Lebensdauer-Ende, Ersatz nötig * <input type="checkbox"/>			
Aufstellung	<input type="checkbox"/> zentral *** <input type="checkbox"/> dezentral **...* <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>			
Besonderes (Vorschriften, Risiken, Abhängigkeiten, Zugänglichkeit usw.)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>			
Gesamturteil	<input type="checkbox"/> geeignet, gut *** <input type="checkbox"/> möglich, brauchbar ** <input type="checkbox"/> fraglich, problematisch *			

.....	S	.....
Bezeichnung	Referenznummer	
WÄRMESENKE	<input type="checkbox"/> Komfortwärme <input type="checkbox"/> Prozesswärme <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Klimakälte <input type="checkbox"/> Prozesskälte <input type="checkbox"/>	

ANLAGEDATEN		
Beobachtungsperiode		Jahr, Heizperiode usw.
Wärme-/Kältebedarf		kWh pro Periode
Durchfluss		m³/h
Strömungsgeschwindigkeit		m/s
Druck		Pa
Feuchte		% r.F.
Dichte		kg/m³
Wärmekapazität		kJ/kg K
Leistungsbedarf		
Minimalwert: <input type="checkbox"/> kW	
Mittelwert:	..... kW	
Maximalwert:	..... kW	
Temperatur		
Minimalwert:	...../..... °C	
Mittelwert:	...../..... °C	
Maximalwert:	...../..... °C	
Betriebszeiten		
Minimalwert:	..... h/d	
Mittelwert:	..... h/d	
Maximalwert:	..... h/d	
Abmessungen (Skizze)		

BEURTEILUNG				
		***	**	*
Betriebsweise	<input type="checkbox"/> kontinuierlich *** <input type="checkbox"/> intermittierend ** <input type="checkbox"/> chargenweise **...* <input type="checkbox"/>			
Wärmeträger	<input type="checkbox"/> Wasser/Luft *** <input type="checkbox"/> Dampf ** <input type="checkbox"/> Thermoöl * <input type="checkbox"/>			
Strömungstechnische Eigenschaften	<input type="checkbox"/> erzwungene Konvektion *** <input type="checkbox"/> freie Konvektion **...*			
Anlagealter	<input type="checkbox"/> Neuanlage *** <input type="checkbox"/> Lebensdauer-Mitte ***...** <input type="checkbox"/> Lebensdauer-Ende, Ersatz nötig * <input type="checkbox"/>			
Nutzungsort	<input type="checkbox"/> prozessintern (WRG) *** <input type="checkbox"/> betriebsintern (AWN) ***...** <input type="checkbox"/> extern (AWN) *			
Besonderes (Vorschriften, Risiken, Abhängigkeiten, Zugänglichkeit usw.)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>			
Gesamturteil	<input type="checkbox"/> problemlos *** <input type="checkbox"/> möglich ** <input type="checkbox"/> anspruchsvoll *			
Bemerkungen				

Anhang

A. Anwendungsbereiche

WRG im Komfortbereich

Raumluftechnische WRG-Anlagen für den Komfortbereich werden vorwiegend in Nichtwohnbauten betrieben. Wärmerückgewinner sind hier wichtige Komponenten, die – wegen des günstigen Kosten-Nutzen-Verhältnisses – schon seit den 60er Jahren eingesetzt werden. Heute liegen für vielfältige Anwendungen ausgereifte Konstruktionen und ausreichende Betriebserfahrungen vor.

WRG in der Industrie

Wärmerückgewinnung ist auch in Raumluftechnischen Anlagen der Industrie möglich und auch fast immer wirtschaftlich vertretbar. Raumluftechnische Anlagen der Industrie versorgen Produktionshallen und Werkstätten mit den dazugehörigen Nebenräumen, wie Lager und dergleichen. Ein Beispiel für eingesetzte Komponenten zeigt Bild 1.

Prozessluftechnische Anlagen

Innerhalb industrieller Produktionsanlagen sind oft prozessluftechnische Anlagen installiert, die unabhängig von der raumluftechnischen Grundversorgung betrieben werden. Als selbständige Systeme unterliegen sie besonderen Auslegungskriterien, wie spezielle Raumgestaltung, hoher Energieumsatz, Belastung der Luft durch Schadstoffe (Kasten 2).

Bei prozessluftechnischen Anlagen dient Luft als Stoff- und Energieträger im Ablauf von Produktionsprozessen. Kennzeichnende Merkmale solcher Anlagen sind:

- Einbringen von Wärme in einen Prozess
- Abführen von Wärme und Feuchtigkeit aus dem Prozess
- Abtransport von Gasen, Lösungsmitteln, Farbnebel, Dämpfen usw.

Kälteanlagen

Im Bereich der Kältetechnik wird aufgrund der eingesetzten Leistung zwischen industrieller und gewerblicher Kälte unterschieden. Die AWN-Prinzipien sind aber in beiden Fällen dieselben.

Kälteanlagen können zur Unterstützung der Wassererwärmung, Raumheizung oder Lüftung herangezogen werden (Bild 3). Dabei tritt Abwärme an die Stelle von Elektrizität und Brennstoff.

Aus den physikalischen Gegebenheiten des Kreisprozesses geht hervor, ob und wie hoch ein Arbeitsmittel

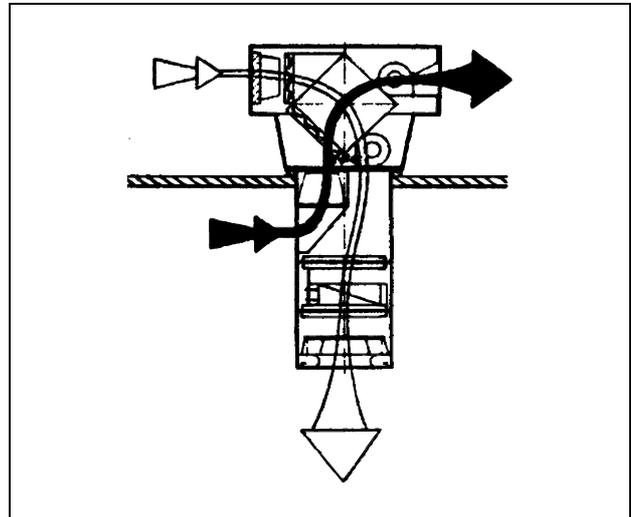


Bild 1: Beispiel eines Dachlüftungsgerätes mit integrierter WRG für die Industrie [Quelle: Hoval]

Beispiele industrieller Problemstoffe in der Zu- und Abluft

- Schweissgase
- Korrosive Dämpfe
- Explosive Dämpfe/Gase
- Ölnebel, Emulsionsnebel
- Lösungsmittel
- Weichmacher
- Stäube
- Farbpartikel
- Radioaktive Stoffe (Gase, Aerosole, Partikel)
- Giftige Stoffe
- Keime
- Gerüche
- Feuchte

Kasten 2

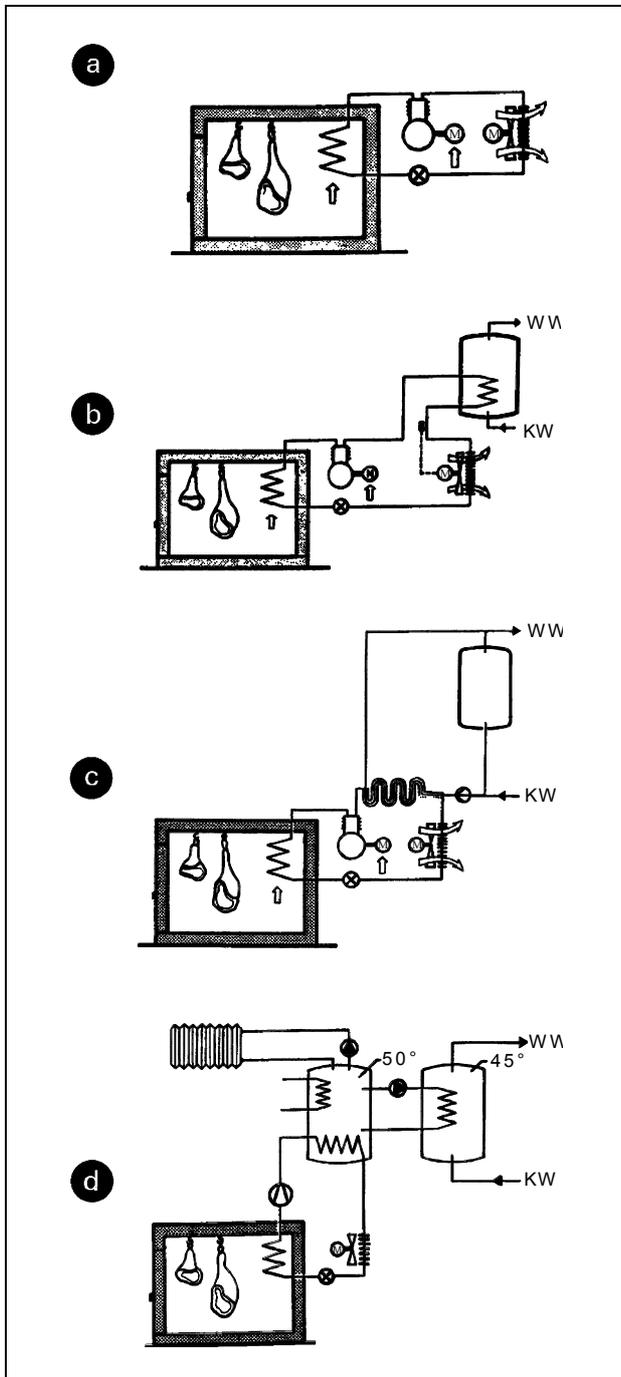


Bild 3: Prinzipieller Einsatz der AWN in Verbindung mit einer Kälteanlage

- Keine Nutzung der Abwärme
- Direkte Kondensation im Wassererwärmer
- Kondensation im aussenliegenden Wärmetauscher
- Mit Heizspeicher für verschiedene Verbraucher

überhitzt bzw. unterkühlt wird. Durch günstige Verhältnisse und geschickte Wahl der Schaltung kann eine nach Temperatur unterteilte Nutzung erfolgen. Durch Überhitzung des Arbeitsmittels können am Austritt des Verdichters bis 70°C entstehen. Der Hauptanteil der Abwärme entsteht aber bei der Verflüssigung bei etwa 40°C.



Zur Kühlung von Lebensmitteln wird eine Kälteleistung von 10 kW benötigt. Dabei fällt eine Wärmeleistung von 14 kW an. Mit einem luftgekühlten Verflüssiger können damit 3000 m³/h Luft um 20°C erwärmt werden. Beim Einsatz eines wassergekühlten Kondensators könnten rund 4 l/min Wasser um 40°C erwärmt werden.

Drucklufterzeugung

Bei der Drucklufterzeugung darf der Verdichter eine Grenztemperatur nicht überschreiten. Um eine hohe Betriebssicherheit zu erreichen wird mit Wasser oder Luft gekühlt und so auch der Wirkungsgrad verbessert. Oft muss die Druckluft auch getrocknet werden. Zirka 90% der mechanischen Energie fällt dabei als Abwärme an. Je nach Situation kann die erwärmte Kühlluft in der Heizperiode zur Hallenbelüftung oder das erwärmte Kühlwasser kann die Heizung oder die Wassererwärmung unterstützen. Abhängig vom Kühlsystem sind Temperaturen von 80...90°C erreichbar.

Allgemeine Industriesituation

In Prozessen des Industrie- oder Gewerbebereiches hat die Energie einen anderen Stellenwert als im Komfortbereich. Dabei wird der Energieverbrauch wie folgt unterschieden:

$$\begin{aligned}
 & \text{Energie für mechanische Arbeit (Antriebe)} \\
 + & \text{Energie für Prozesse} \\
 = & \text{Energie für Produktion} \\
 & \text{Energie für Produktion} \\
 + & \text{Komfortenergie} \\
 = & \text{gesamter Energieverbrauch}
 \end{aligned}$$

Bei der Herstellung eines Produktes sind neben energetischen Einflussgrößen zusätzlich eine Reihe anderer Faktoren für den Produktpreis bzw. die Wirtschaftlichkeit eines Verfahrens massgebend. Daraus folgt einerseits, dass bei vielen Gütern der energetisch bedingte Kostenanteil im Fertigprodukt meistens klein ist. Energiepreisänderungen haben daher nur einen gedämpften Einfluss auf den Produktpreis. Andererseits

existieren eine Reihe von Verfahren, die energieintensiv sind. Diese können gut als Einheit betrachtet werden. In den letzten Jahren wurden einige Anstrengungen unternommen, um grosse Energieverbraucher zu verbessern. Dazu gehören vor allem verbesserte Planungsmethoden, aber auch neue Verfahren und Apparate, die eine Mehrfachnutzung der Energie unterstützen. Die wichtigsten Aspekte im Zusammenhang mit WRG und AWN sind in Kasten 4 zusammengefasst.

Energierrelevante Massnahmen sind oft recht einfach durchführbar. Beispielsweise kann bei Trocknungsprozessen, die relativ viel zum Verbrauch beitragen, durch verlängerte Trocknungszeiten die Temperatur gesenkt werden. Oft wird dadurch auch die Qualität des getrockneten Guts verbessert.

Dampf wird sehr häufig zur Deckung des Wärmebedarfs eingesetzt. Die Dampferzeugung erfolgt zentral in den Betrieben. Für viele Prozesse hat der Frischdampf eine unnötig hohe Temperatur, die durch Umformer auf die verlangte Temperatur reduziert werden muss. Mit einer angepassten Wärmeversorgung könnte viel Energie eingespart werden.

Beispiel Chemische Industrie

In chemischen Produktionsprozessen wird Energie benötigt, um Reaktionen in Gang zu setzen und die dabei entstehenden Stoffe zu trennen. Nach der Nutzung im Prozess muss die zugeführte Energie als Wärme, meistens auf niedrigem Niveau, wieder aus dem Prozess abgeführt werden. Bei exothermen Prozessen muss zusätzlich die freigesetzte Wärme abgeführt werden.

In der Vergangenheit wurden verschiedene Herstellungsprozesse permanent verbessert, wobei aber erst entsprechende Maschinen und Apparate in veränderten Anlagenkombinationen zu erheblichen Einsparungen führten. Nicht alle Prozesse haben bis heute die gleiche «energetische Reife» erlangt. Es gibt noch viele Prozesse, bei denen – zu Zeiten billiger Energien – noch kein Anreiz bestand, den Energieverbrauch intensiver zu betrachten.

Industriezweige der Schweiz mit nennenswertem Prozessenergieanteil

Die Maschinen- und Metallindustrie ist unter den betrachteten Industriezweigen absolut gesehen der zweitgrösste Prozesswärmekonsument. Der Anteil der Prozesswärme am Gesamtenergieverbrauch dieses Industriezweiges ist ebenfalls hoch. Über 95% der Wärme wird für Prozesse oberhalb von 300°C benötigt. Günstige Situation für eine stufenweise Nutzung der Energie.

In der Baumaterialproduktion überwiegen hohe Temperaturen bei hohem Energiebezug. Die Brennwärme mit Temperaturen über 1000°C sowie Abwärme decken normalerweise den Grossteil des Wärmebedarfes unterhalb von 300°C.

Hoher Dampfverbrauch bei mittleren bis hohen Drücken kennzeichnet die bedeutenden Wärmeströme in der Papierindustrie. Die Struktur der Wärmeverbrauchs ist kaskadenartig.

Die Textil-, Leder- und Schuh-Industrie weist im Vergleich zu den andern keine sehr hohen Temperaturen auf. Mehr als 80% der Wärme wird für Verfahren unterhalb von 300°C verwendet. Der Hauptteil der Energie wird für Trocknungsprozesse verwendet.

Die chemische Industrie ist in Bezug auf ihren Wärmeverbrauch der vielfältigste aller Industriezweige. In einzelnen Betrieben variieren Dampf- oder Heisswasserverbrauch wie auch die Temperaturen sehr stark. Es existiert ein beachtliches Potential zur Mehrfachnutzung der Wärme in Form von WRG und AWN, speziell zur Erwärmung von Frischwasser.

Die Nahrungsmittelindustrie weist eine sehr breite Palette von Technologien mit verschiedensten Temperaturen auf. Dampf- und Kondensatanfall als Wärmequellen sowie Frischwasserbedarf als Wärmesenken lassen WRG- und AWN-Möglichkeiten als günstig erscheinen.



Sonnenenergie für die Erzeugung industrieller Prozesswärme. Ausgearbeitet durch die Georg Fischer AG, Schaffhausen. Bern: Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW), 1981. (BEW-Schriftenreihe, Studie Nr. 15; Bezugsquelle: EDMZ, 3000 Bern, Best.-Nr. 805.715 d)

Kasten 4

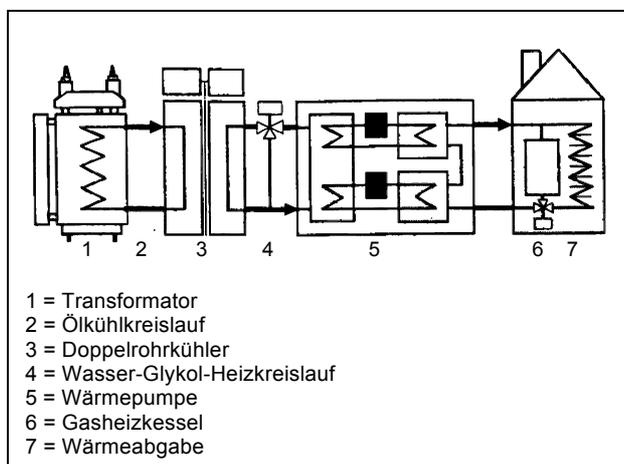


Bild 5: Schema einer Trafo-Anlage mit Sicherheitskreislauf für die AWN [Quelle: Jahrbuch der Wärmerückgewinnung, 6. Ausgabe, Essen, Vulkan-Verlag, 1989]

Wärmeübertragung über Sicherheitsbarrieren

Abwärme wird in der Industrie vor allem dann nicht weiter genutzt, wenn die Übertragung an eine andere Verwertungsstelle die Sicherheit der Anlage, des Produktes oder des Abwassers gefährdet. Eine Nutzung der Abwärme ist aber möglich, wenn eine «Barriere» eingebaut wird. Eine noch wenig bekannte Lösung dieses Problems stellt das Doppelrohrverfahren dar, bei dem aufwendige Sicherheitskreisläufe entfallen. Die sichere Wärmeübertragung wird hierbei durch einen Austausch gelöst (Bild5).

Wärmekraftkopplung

Wärmekraftkopplung – also die gleichzeitige Gewinnung von mechanischer Arbeit und Wärme aus anderen Energieformen mittels Dampfturbinen, Gasturbinen, Diesel- oder Gasmotoren – ist Gegenstand eines selbständigen Heftes dieser Reihe.

 Heft 4; Heft 1, Abschnitte 2.5 und 3.4

ORC-Anlagen

ORC-Anlagen (Organic Rankine Cycle) sind Wärmekraftanlagen, in denen aus Abwärme im Temperaturbereich zwischen 16 und 300°C über einen Kreisprozess elektrische Energie gewonnen wird. Erste Erfahrungen mit ausgeführten Anlagen zeigen, dass ORC-Anlagen in Einzelfällen durchaus Abwärme wirtschaftlich nutzen können. Ein erheblicher Beitrag zur AWN wird jedoch von ihnen nicht erwartet.

B. Fallbeispiele

Filmentwicklungsbetrieb

Vorgaben und Ziele: In einem photoverarbeitenden Betrieb mit rund 350 Beschäftigten soll konsequente Abwärmenutzung unter Einsatz von Wärmepumpen und Wärmetauschern betrieben werden.

Konzept: Die Problemkreise «Photochemie», «Verarbeitungsprozess» und «Raumklimatisierung» müssen in ein Konzept eingebunden werden (Bild 7).

Anlagebeschreibung: Die Verknüpfung der Klimatisierung mit der Verarbeitung erfolgt in den Wärmetauschern, die der Luftkühlung für die Computeranlage und der allgemeinen Klimaanlage dienen. Das dabei um 6°C erwärmte Wasser wird den Verdampfern der Kältemaschinen zugeführt. Der stark schwankende Wasserverbrauch des Verarbeitungsprozesses wird durch einen Vorkühler von 42 m³ aufgefangen, der in erster Linie durch die auf einer tieferen Kondensationstemperatur arbeitenden Kältemaschine vorgewärmt wird. Das Wasser des Vorkühlers wird im 6 m³ fassenden Warmwasserspeicher

Filmentwicklungsbetrieb

Konzept: Innovent Zürich AG

Im Vergleich der Energieverbrauchszahlen von 1984 zu 1990 ergibt sich, bezogen auf eine einheitliche Produktionsleistung, eine Einsparung von 640 MWh/a Öl bei einer Erhöhung des Stromverbrauchs um 150 MWh/a.

Damit ergibt sich eine Elektro-Thermo-Verstärkung von $ETV = 640/150 = 4,27$.

Kasten 6

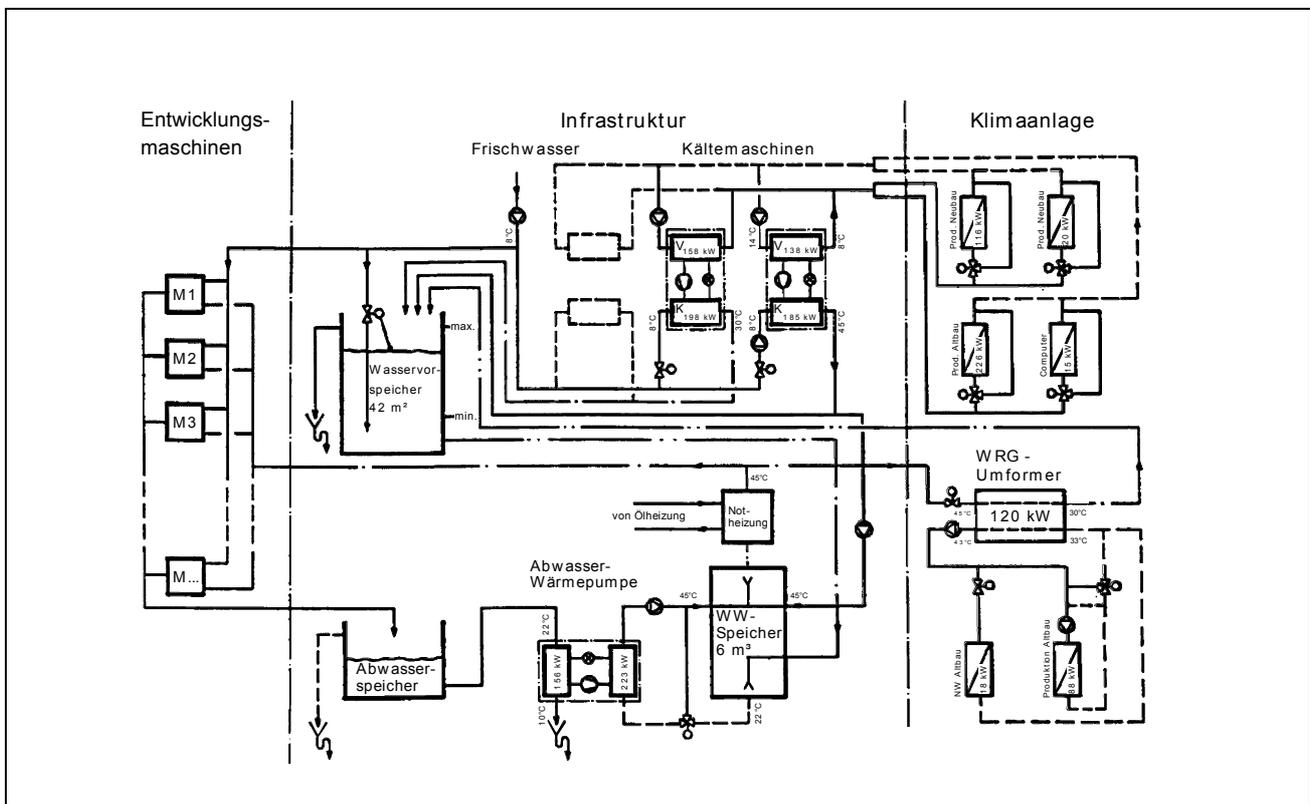


Bild 7: Prinzipschema zum Fallbeispiel «Filmentwicklungsbetrieb»

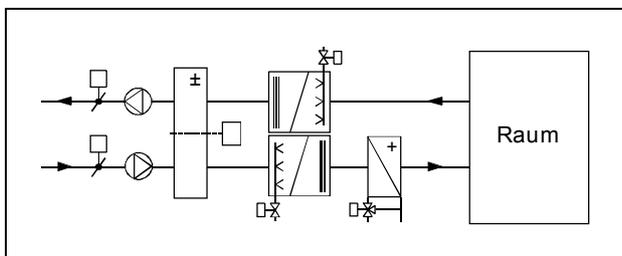


Bild 8: Prinzipschema zum Fallbeispiel «sanfte Kühlung»

«Sanfte Kühlung»

Konzept: Gähler + Partner AG, Ennetbaden

Viergeschossiger Bürobau:

- Betriebszeiten (5 Tage pro Woche) 12 h/Tag
- Luftwechsel pro Stunde: 1,7...2,6

Rotationswärmetauscher mit Kondensation:

- Temperaturwirkungsgrad ca. 75%
- Feuchtwirkungsgrad ca. 15...75%
- Elektro-Thermo-Verstärkung ca. 16

Behaglichkeit Winter:

- Raumtemperatur 20...22°C
- Raumfeuchtigkeit min. 35%

Behaglichkeit Sommer:

- Raumtemperatur ohne PC's bis 28°C
- Raumtemperatur mit PC's bis 30°C
- Raumfeuchtigkeit bis 70 %

Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu einer konventionellen Anlage:

	Mechanische Kühlung LW = 3,4	«Sanfte Kühlung» LW = 2,2	Einsparung
Investitionen	550'000 Fr.	326'000 Fr.	41%
Elektrizität	62,0 MWh/a	32,4 MWh/a	48%
Heizöl	7'320 kg/a	4'750 kg/a	36%
Kapitalkosten	52'000 Fr./a	30'800 Fr./a	41%
Unterhaltskosten	25'600 Fr./a	15'200 Fr./a	41%
Energiekosten	16'600 Fr./a	9'300 Fr./a	44%
Jahreskosten	94'200 Fr./a	55'300 Fr./a	41%

Basis: Ölpreis 0,4 Fr./kg, durchschnittlicher Strompreis 12 Rp./kWh, Zins 7%, Preissteigerung für Elektrizität und Betriebskosten 5%, Preissteigerung für Heizöl 6%, mittlere Nutzungsdauer 20 Jahre

Kasten 9

durch eine Elektrowärmepumpe, die die Abwärme des Prozessabwassers nutzt, auf die erforderliche Temperatur von rund 45°C aufgeheizt. Abhängig vom Ladezustand speist die auf höherer Kondensationstemperatur arbeitende Kältemaschine ihre Abwärme in den Warmwasserspeicher bzw. in den Vorspeicher. Vom Warmwasserspeicher gelangt das warme Prozesswasser in die Verarbeitungsmaschinen, wo durch Beimischung von Kaltwasser die benötigte Temperatur eingestellt wird. Die Raumheizung ist über einen Wärmetauscher ebenfalls an den Warmwasserspeicher angeschlossen. Bei zu wenig Abwärmefall wird die vorhandene Ölheizung zugeschaltet.

Wirtschaftlichkeit: Die Anlagenverbesserung wird in der Firma permanent betrieben (Kasten 6). Die entsprechenden Kosten werden den Unterhaltskosten zugeschlagen. Rückzahlfristen für die einzelnen Massnahmen liegen nicht vor.

«Sanfte Kühlung»

Vorgaben und Ziele: Durch integrale Planung, unterstützt durch Simulationsrechnungen für instationäre Energieflüsse, soll ein Lüftungs-Konzept entwickelt werden, das anstelle einer mechanischen Kühlung das Prinzip der Verdunstung, kombiniert mit WRG, zur Raumkühlung nutzt. Dieses Konzept mit «sanfter Kühlung» ist kostengünstig, es liefert aber keinen «Superkomfort».

Konzept: Zur Kühlung der Raumluft dient eine WRG mit Verdunstungskühlung in der Abluft. Aus Betriebskostengründen wird ein spezieller Befeuchter für nichtaufbereitetes Speisewasser eingesetzt. Die örtliche Heizung deckt den Heizenergiebedarf zu 100%. Aussenliegender Sonnenschutz durch verstellbare Lamellenstoren und eine optimierte Befeuchtung mit kleiner Abwärme minimieren den Wärmefall im Sommer. Als Geräte-Abwärme wird als obere Grenze ein Personalcomputer pro Arbeitsplatz zugrunde gelegt. Vorteile gegenüber konventionellen Lösungen sind tiefere Anlage- und Energiekosten und eine entsprechend kleinere Luftmenge, sowie tieferer Unterhalts- und Wartungsaufwand. Nachteilig ist der im Sommer an einigen Tagen eingeschränkte Raumkomfort (relativ hohe Temperaturen in den Räumen mit Personalcomputer), der aber bewusst in Kauf genommen wird.

Anlagebeschrieb: Via Zuluftventilator, WRG und Lufterhitzer wird die Luft über den Auslass dem Raum zugeführt (Bild 8). Die Abluft passiert den adiabatischen Laminarbefeuchter, die WRG, den Abluftventilator bis sie via Fortluftschacht ins Freie gelangt. Die Anlage arbeitet

mit konstanter Luftmenge. Im Winter ist die WRG-Einheit in Betrieb. Die Zuluft wird somit vorgewärmt und bei Kondensation der Abluft (bei tiefen Aussentemperaturen) auch befeuchtet. Falls nötig wird die Zuluft nachbefeuchtet und mit dem Erhitzer auf eine gleitende Solltemperatur nachgeheizt. Im Sommer bei Tageskühlbetrieb wird im Laminarbefechter die Abluft adiabatisch bis ca. 95% relativer Feuchte, auf etwa 22°C gekühlt. Mit der nachgeschalteten WRG wird die warme Aussenluft (inklusive Zuluftventilatorabwärme) durch die kühle Fortluft ohne Feuchteaustausch abgekühlt. Der Nachtkühlbetrieb erfolgt bei tiefer Nachtlufttempartur durch Zu- und Abluftventilator und teilweise mit dem Abluftbefeuchter. Die Benutzer sind im allgemeinen mit der Behaglichkeit zufrieden. Im Sommer wird das Raumklima allerdings in den PC-Räumen als recht warm empfunden. Für zukünftig höhere Komfortansprüche sind Anschlüsse für eine mechanische Kühlung (ca. 30 kW) vorgesehen. Weitere Daten zeigt Kasten 9.

Wirtschaftlichkeit: Durch den kleineren Luftwechsel und den Wegfall der mechanischen Kühlung werden rund 30 MWh weniger Elektrizität verbraucht. (Der Mehrverbrauch von 20 m³ Wasser pro Jahr für die Luftbefeuchtung fällt nur unbedeutend ins Gewicht.) Die tieferen Kapital-, Unterhalts- und Energiekosten führen zu einer Kostenersparnis von 41% oder 39'000 Franken pro Jahr. Die Einsparungen haben allerdings eine geringere Behaglichkeit zur Folge (Raumtemperatur an Hitzetagen in den PC-Räumen bis zu 30°C), was hier nicht in Zahlen ausgedrückt werden kann. Es ist daher im Einzelfall genau abzuklären, ob sich ein solches Konzept realisieren lässt.

Klimakälte im Winter

Vorgaben und Ziele: Der tiefe Kältebedarf im Winter soll ohne die schlecht ausgelasteten Kältekompressoren mit den vorhandenen «Kälte»-Senken gedeckt werden.

Konzept: Durch das Zuschalten der «Kälte»-Senke «Rheinwasser» über den Fabrikwasserkreis können die Kältemaschinen im Winter abgestellt werden. Die Einkoppelung ins Kältenetz erfolgt über einen Plattenwärmetauscher. Bei nur geringer Aufwärmung wird das Fabrikwasser dann für weitere Kühlzwecke eingesetzt. Die Kältemaschinen werden nur noch im Sommer betrieben.

Anlagebeschreibung: In Bild 10 ist die Klimakälteanlage mit Kältespeicher schematisch dargestellt. Der Plattenwärmetauscher (technische Daten siehe Kasten 11)

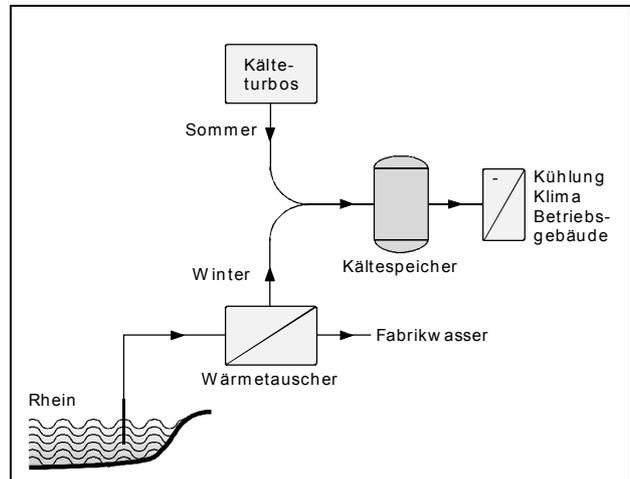


Bild 10: Prinzipschema zum Fallbeispiel «Klimakälte im Winter»

Klimakälte im Winter

Konzept: F. Hoffmann - La Roche AG, Basel

Antriebsleistungen der Kälteturbos:

– 1 Kälteturbo à 699 kW	699 kW
– 2 Kälteturbos à 681 kW	1362 kW
– 2 Kälteturbos à 368 kW	736 kW
– Total	2797 kW

Kältespeicher 66 m³

Plattentauscher:

– Leistung	900 kW
– Temperaturen im Kältekreis	4/11°C

Wirtschaftlichkeit:

– Elektrizitätseinsparung	400 MWh/a
– Mehrinvestitinskosten	125'000 Fr.
– Jährliche Kapitalkosten	13'750 Fr./a
– Mittlere jährl. Energiekostensparnis	56'850 Fr./a
– Mittlere jährl. Nettokostensparnis	43'100 Fr./a

Basis: Strompreis 10 Rp./kWh, Zins 7%, Elektrizitätspreissteigerung 5%, Nutzungsdauer 15 Jahre

Kasten 11

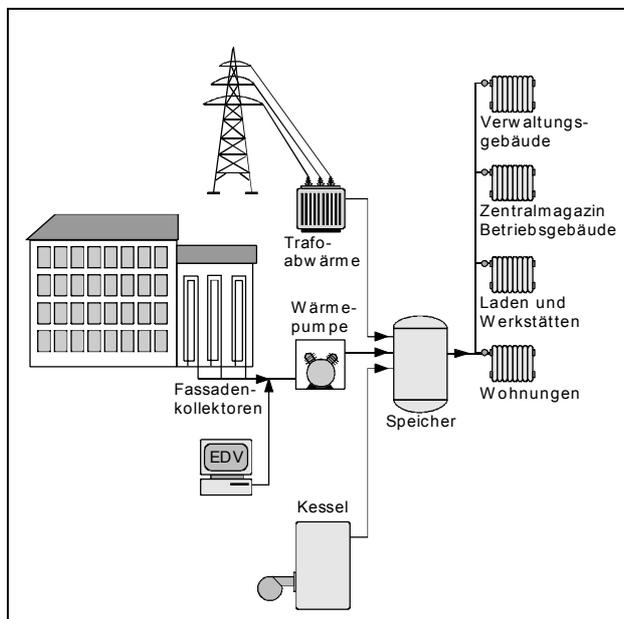


Bild 12: Prinzipschema zum Fallbeispiel «Wärme- und Kühlverbund»

wird in den Rücklauf des Fabrikwasserkreises eingeschleuft. Die Umschaltung auf Kältemaschinenbetrieb erfolgt, sobald das Fabrikwasser eine zu hohe Temperatur aufweist.

Wirtschaftlichkeit: Bei Investitionskosten von 125'000 Fr. für die zusätzliche Rheinwasserkühlung werden durch diese Betriebsweise pro Jahr 400'000 kWh Elektrizität, entsprechend 43'100 Fr., eingespart. Die Investition hat eine Rückzahlfrist von nicht einmal 3,5 Jahren. Zudem werden teure Stromspitzen vermieden. Dazu kommen kleinere Arbeitsmittelverluste, weniger Unterhaltsarbeiten und weniger Turbolärm.

Wärme- und Kühlverbund

Vorgaben und Ziele: Ein Wärme- und Kühlverbund soll mit möglichst wenig Fremdenergie die Beheizung der Büro- und Betriebsräume sicherstellen. Der Wirtschaftlichkeit und der Diversifikation der Energieversorgung soll angemessen Rechnung getragen werden.

Konzept: Nutzung der Abwärme der Transformatoren, der EDV-Anlage sowie Nutzung der Umweltwärme über Fassadenabsorber und Wärmepumpe für die Grundlast (Bild 12). Vorhandene sanierte Heizkessel werden nur zur Spitzenlastdeckung heangezogen.

Anlagebeschrieb: Zur Deckung der Grundlast dient einerseits die Abwärme von zwei Transformatoren mit, wobei die Wärmeentnahme über doppelwandige Öl-Wasser-Wärmetauscher erfolgt. Andererseits wird die Umweltwärme über die besonnten Fassadenflächen (Süd-Ost- und Süd-West-Seite), in die HDPE-Kunststoffrohre einbetoniert sind, mittels Elektrowärmepumpen genutzt. Durch die hydraulische Trennung der beiden Kollektorflächen ergibt sich ein besseres Teillastverhalten. Mit dem Heizkessel wird nur noch der selten auftretende Spitzenbedarf befriedigt. Dank der Transformatorenabwärme arbeiten die Wärmepumpen nur bis 8°C Aussentemperatur. In der Übergangszeit (Aussentemperaturen 8...16°C, entsprechend etwa 3000 h) wird die Abwärme der EDV über die jeweils kühlere Fassaden direkt in die Umgebung abgeführt. Mit einem Leitsystem wird die Anlage dauernd optimal gefahren. Die bestehenden Heizungsverteiler wurden auf variablen Durchfluss umgebaut und die Heizkörperheizung konnte auf eine maximale Rücklauftemperatur von 50°C abgeglichen werden. Die technischen Daten sind in Kästen 13 zusammengestellt.

Wirtschaftlichkeit: Die Gesamtinvestitionskosten betragen 1'560'000 Fr. Es ergeben sich 160'000 Fr.

Jahreskosten zu laufenden Preisen. Ausgedrückt in heutigen Preisen ergeben sich inflationsbereinigte Kosten von rund 100'000 Fr. pro Jahr. Bei einem Wärmeabsatz von 1000 MWh/a resultieren somit spezifische Wärmekosten von rund 10 Rp./kWh. Im Endausbau wird mit einem Absatz von 2000 MWh/a gerechnet; es darf somit mit ungefähr 5 Rp./kWh gerechnet werden.

C. Pinch Design Method

Eine wärmetechnische Anlage kann als Wärmeübertrager-Netz mit Stoffströmen dargestellt werden. Für stationäre Verhältnisse kann mit der Pinch Design Method (kurz P.D.M.) das theoretische Minimum der von aussen zuzuführenden Energie für einen bestimmten Satz aufzuheizender und abzukühlender Stoffströme mit gegebenen Anfangs- und Endtemperaturen bestimmt werden. Die Bezeichnung der P.D.M rührt von der typischen Einschnürung (engl. «pinch») der sogenannten Verbundkurven im Enthalpie-Temperatur-Diagramm her (Bild 14).

Die beiden Verbundkurven (heiss, kalt) werden je aus der Summe der Enthalpien in den betrachteten Temperaturintervallen aller wärmeabgebenden (heissen) und wärmeaufnehmenden (kalten) Stoffströme gebildet. Die P.D.M. setzt für einen gegebenen Prozess nur die Kenntnis der Wärmeströme und der zugehörigen Temperaturen voraus. Die minimale Temperaturdifferenz ΔT_{\min} beim Pinch tritt bei einer bestimmten Enthalpie auf. Der Bereich der Kurvenüberlappung parallel zur Enthalpieachse ergibt den maximal möglichen Wärmegewinn. Der Mindestbedarf an Heizenergie beträgt $Q_{w,\min}$ und an Kühlenergie $Q_{k,\min}$. Die Pinch-Temperatur gibt die Grenze für die im Prozess durch Verbund austauschbare Wärme an.

Mit der Methode kann die Güte verschiedener Wärmeübertrager-Netzwerke global bestimmt werden. Über die Ermittlung der minimalen Temperaturdifferenz kann der maximale Wärmegewinn berechnet, die Netzwerkgrösse und die Kosten abgeschätzt werden. Die P.D.M ist ein Werkzeug zur Beurteilung einer Wärmeübertrager-Netzwerk-Optimierung. Sie wird ergänzt durch Optimierungsmethoden des Netzes für ein ganzes Spektrum sich ändernder Betriebsbedingungen.

Energie-Mehrverbrauch tritt auf, wenn bei einem Prozess in einem der nachstehenden Punkte gesündigt wird:

- Kühlen mit Luft oder Kühlwasser oberhalb des Pinches
- Heizen mit Fremdenergie unterhalb des Pinches

Wärme- und Kühlverbund

Konzept: Elektra Birseck Münchenstein

Wärmeleistung:

- 1. Etappe 700 kW
- Endausbau ca. 1300 kW

2 Transformatoren:

- Spannung 150/13 kV
- Scheinleistung 40 MVA
- Abwärmeleistung 50...120 kW

Heizwasserspeicher 30 m³

Wärmepumpe:

- Wärmeleistung 260 kW
- Elektrische Leistungsaufnahme 92 kW
- 4 Umwälzpumpen zusammen 8 kW
- Fassadenfläche 1590 m²

Kühlleistung EDV-Klimaanlage:

- Computer-Klimaschränke 80 kW
- USV 10 kW

Kaltwassersatz (2 Kompressoren):

- Kühlleistung 122 kW
- Elektrische Leistungsaufnahme 56 kW

Gesamt-Wärmeproduktion:

- 1. Etappe 1009 MWh/a
- Endausbau ca. 2000 MWh/a

Elektro-Thermo-Verstärkung 4

Wirtschaftlichkeit:

- Gesamtinvestitionskosten 1'560'000 Fr.
- Jahreskosten zu laufenden Preisen 160'000 Fr./a
- Inflationsbereinigte Jahreskosten 100'000 Fr./a
- Spezifische Wärmekosten
- 1. Etappe 10 Rp./kWh
- Endausbau ca. 5 Rp./kWh

Basis: Ölpreis 0,4 Fr./kg, durchschnittlicher Strompreis 12 Rp./kWh, Inflationsrate 4%, Zins 7%, Preissteigerung für Elektrizität und Betriebskosten 5%, Preissteigerung für Heizöl 6%, mittlere Nutzungsdauer 30 Jahre

Kasten 13

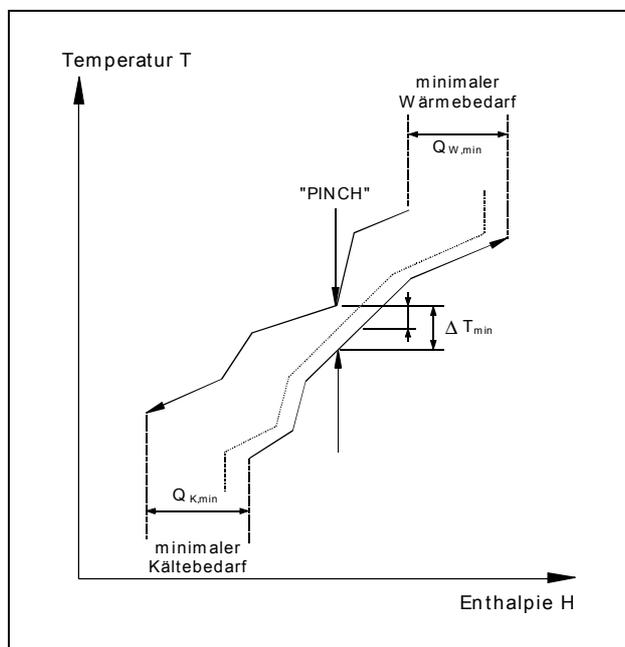


Bild 14: Pinch Design Method mit Verbundkurven «heiss» (oben) und «kalt» (unten). Die gestrichelte Linie zeigt die Situation bei einer Linksverschiebung der Verbundkurve «kalt». Dabei wird ΔT_{\min} und damit auch der Mindestbedarf an Heiz- und Kühlenergie kleiner.

- Aufheizen eines Stoffstroms unterhalb des Pinches mit einem heissen Stoffstrom oberhalb des Pinches



Linhoff, B., et. al.: A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy. Rugby: Institution of Chemical Engineers, 1982.

Reimann, K. A.: The Consideration of Dynamics and Control in the Design of the Heat Exchanger Networks. Zürich: Eidg. Technische Hochschule (ETH-Z), 1986. (Dissertation ETH-Z Nr. 7916)

Körner, H.: Optimaler Energieeinsatz in der chemischen Industrie. In: Chemie-Ingenieur-Technik, Bd. 60, 1988, S. 511-518. (Ausleihe: ETH-Bibliothek, Sign. P513924:60)

D. RAVEL-Checklisten

Für jede Quelle und für jeden Verbraucher – hier allgemein als Senke bezeichnet – wird anlässlich einer Betriebsaufnahme eine Checkliste ausgefüllt. Beispiele für Quellen und Senken sind in den Tabellen 15 und 16 zusammengestellt. Die Blätter sind universell in der Haustechnik und in der Verfahrenstechnik einsetzbar.

 Erläuterung der Parameter in Kapitel 4

 Für eine umfassende Analyse sollten die spezifizierten Werte aufgrund verlässlicher Messwerte eingetragen werden. Wenn das nicht möglich ist, sollten die Werte möglichst genau abgeschätzt und erst zuletzt Erfahrungswerte eingesetzt werden.

RAVEL-Checkliste «Wärmequelle»

Die drei letzten Spalten dienen der Beurteilung der Quelle. In der Spalte «***» werden unproblematische Eigenschaften markiert. Mit steigendem technischen Schwierigkeitsgrad werden Eintragungen in der Spalte «**» oder «*» notwendig. Die einzelnen Eigenschaften weisen das gleiche Gewicht auf.

In der untersten Zeile werden die Summen gebildet. Überwiegen die Eintragungen in der Spalte «*», so ist mit grösseren Schwierigkeiten bei der Realisierung zu rechnen. Eine Nutzung ist dann oft nur bei grosser Abwärmemenge sinnvoll. Tritt auch nur eine Grösse in der Spalte «*» oder «**» auf, so sind genaue Abklärungen der betroffenen Positionen notwendig. Zeigen die Vorabklärungen keine tragbaren Lösungen, so fällt die Quelle für diesen Einsatz ausser Betracht.

RAVEL-Checkliste «Wärmesenke»

Zur Beurteilung der Senke wird in «problemlos», «möglich» und «anspruchsvoll» unterschieden. Ausschlaggebend sind Verbraucherart und Nutzungsort.

Vernetzung

Zur Verbindung von Quelle und Senke müssen die verschiedenen Grössen aus den Checklisten miteinander verglichen werden. Als hauptsächliche Kriterien dienen dabei:

- Temperaturdifferenz zwischen Quelle m und Senke n: $T_{Qm} - T_{Sn}$
- Verhältnis Energieangebot m zu Energiebedarf n: E_{Qm} / E_{Sn}

Art der Quelle	Wärmeträger	Beispiel
Elektro/Elektro	Warmluft Heizwasser Kühlmittel	Transformator Netzgerät Computer
Elektro/Mechanisch	Warmluft Heizwasser Kühlmittel	Maschinen
Elektro/Thermisch	Warmluft Heizwasser	Schmelzöfen
Elektro/ Licht	Warmluft	Beleuchtung mit Kühlung
Mechanisch/ Elektro	Warmluft Heizwasser Kühlmittel	Generator
Mechanisch/ Me- chanisch	Warmluft Heizwasser Kühlmittel	Getriebe, mechani- sche Verfahrens- technik
Verbrennungs- prozesse (Brennstoffe)	Heizwasser Warmluft Rauchgase Dampf	Raumheizungen Dampfapparate
Allgemeiner chemi- scher Reaktor	Warmluft Heizwasser Kühlmittel	Exotherme Reak- tionen in Rühr- kessel
Produktionsprozess	Warmluft Heizwasser Kühlmittel	Trocknungsanla- gen

Tabelle 15: Verschiedene Arten Abwärmequellen mit Beispielen und möglichen Medien zum Abführen der Wärme

Verbraucherart	Wärmeträger	Beispiel
Komfortwärme	Heizwasser	Heizkörper
	Heizwasser Warmluft	Luftheritzer
	Heizwasser Dampf	Wassererwärmer
Prozesswärme	Dampf Thermoöl	Dampferzeuger
	Heizwasser Dampf	Mantelgefäss- Reaktor
	Kaltwasser Wasser/Glykol	Luftkühler

Tabelle 16: Verschiedene Arten von Wärmeverbrauchern mit Beispielen

Bezeichnung	Wert	Fall A	Fall B
Temperaturdifferenz Quelle - Senke TQ-TS	..... K	> 0 K	< 0 K
Verhältnis der Energie von Angebot zu Bedarf EQ/ES	.....	> 1	< 1
Zeitlicher Abstand der Maxima Angebot zu Bedarf PP(Q-S)	..... h	0...99 h	> 100 h
Distanz Quelle - Senke DD(Q-S)	..... m	0...99 m	> 100 m

Tabelle 17: Vernetzungsliste für ein direkt verbundenes Quellen-Senken-Paar

Vernetzungsgrösse	Konsequenzen	
	Fall A	Fall B
TQ-TS	Wärmetauscher	Wärmepumpe
EQ/ES	Überschuss Lastmanagement	Teildeckung Energiemanagement
PP(Q-S)	Speichergrösse (Kurzzeit) Anpassung	Speichergrösse (Langzeit) Betriebsstrategie
D(Q-S)	Transportaufwand: tief Verluste: tief	Transportaufwand: hoch Verluste: hoch

Tabelle 18: Vernetzungsgrössen und Systemkonsequenzen

	S1 (Bewertung)	S2 (Bewertung)	S3 (Bewertung)
Q1 (Bewertung)	TQ1-TS1 EQ1/ES1 PP(Q1-S1) D(Q1-S1)	TQ1-TS2 EQ1/ES2 PD(Q1-S2) D(Q1-S2)	TQ1-TS3 EQ1/ES3 PP(Q1-S3) D(Q1-S3)
Q2 (Bewertung)	TQ2-TS1 EQ2/ES1 PP(Q2-S1) D(Q2-S1)	TQ2-TS2 EQ2/ES2 PP(Q2-S2) D(Q2-S2)	TQ2-TS3 EQ2/ES3 PP(Q2-S3) D(Q2-S3)
Q3 (Bewertung)	TQ3-TS1 EQ3/ES1 PP(Q3-S1) D(Q3-S1)	TQ3-TS2 EQ3/ES2 PP(Q3-S2) D(Q3-S2)	TQ3-TS3 EQ3/ES3 PP(Q3-S3) D(Q3-S3)

Tabelle 19: Verknüpfungsmatrix für je drei Quellen und Senken; sie ist nicht zwingend quadratisch

- Zeitlicher Abstand der Maxima von Angebot m und Bedarf n: PP(Qm-Sn)
- Räumliche Distanz von Quelle m zur Senke n: D(Qm-Sn)

In einfachen Fällen kann eine Quelle direkt mit einer Senke verbunden werden. In komplexen Anlagen werden mehrere Quellen mit verschiedenen Senken vernetzt. Die wesentlichen Vernetzungsgrössen werden für ausgewählte Quellen-Senkenpaare in der Vernetzungsliste eingetragen (Tabelle 17).

Die Werte der Vernetzungsgrösse bestimmen die zu wählenden Systeme. Grobe Anhaltspunkte gibt Tabelle 18. Der Fall A ist meistens günstiger hinsichtlich Technikanforderungen und Aufwand als Fall B.

Übersichtlich lässt sich der Sachverhalt in einer Verknüpfungsmatrix darstellen, in der die Quellen zeilenweise und die Senken spaltenweise angeordnet sind (Tabelle 19). In jedes Feld werden die 4 Vernetzungsgrössen eingetragen. Dabei wird natürlich in den wenigsten Fällen ein bestimmtes Quellen-Senken-Paar in allen Vernetzungseigenschaften maximal übereinstimmen. Es wird deshalb eine Gewichtung der verschiedenen Kriterien notwendig sein.

Im allgemeinen ergibt die Bildung von autonomen Quellen-Senken-Paaren keine optimale Lösung. Sie liefert aber einen ersten Lösungsansatz. Erst die exergiegerechte Nutzung verschiedener Quellen mit unterschiedlichen Senken in einem verknüpften Wärmenetzwerk erlaubt eine rationelle Energieausnutzung.

Die derart erarbeitete Lösung muss zur weiteren Abklärung in ein Energieflussschema umgesetzt werden, das dann eine Grobanalyse des Problems erlaubt. Die Fragen um die Grösse der Energieflüsse und die Randbedingungen führen mitten in den Problemlösungsprozess.

Die Grenze der Handauswertung und der Übersichtlichkeit wird mit diesem Vorgehen bei etwa 3 Quellen-Senken-Paaren erreicht. Für komplexere Gebilde wird mit Vorteil auf Computerprogramme und -methoden zurückgegriffen.

 Pinch Design Method in Anhang C

Benennungen, Formelzeichen, Abkürzungen

Benennungen und Formelzeichen

Auslastungsfaktor [-].....	f_A
Betriebsdauer [h].....	t_B
Dichte [kg/m ³].....	ρ
Druck [Pa, kPa].....	p
Druckdifferenz [Pa, kPa].....	Δp
Durchfluss, Massenstrom [kg/s, kg/h].....	\dot{m}
Durchfluss, Volumenstrom [m ³ /h].....	\dot{V}
Elektro-Thermo-Verstärkung [-].....	ETV
Energie, allg. [J, MJ, Ws, kWh].....	W
Energierückgewinn [MJ, kWh].....	ERG
Enthalpie [J/kg, kJ/kg, kWh/kg].....	h
Enthalpiewirkungsgrad [-].....	η_h
Feuchte, absolut [g/kg].....	x
Feuchte, relativ [%].....	φ
Feuchtwirkungsgrad [-].....	η_x
Fläche [m ²].....	A
Geschwindigkeit [m/s].....	v
Hilfsenergie [MJ, kWh].....	W_H
Korrekturfaktor, allg. [-].....	f
Leistung, allg. [W, kW].....	P
Leistung, Wärme [W, kW].....	\dot{Q}
Luftwechsel [-].....	LW
Masse [kg].....	m
Massenstrom [kg/s, kg/h].....	\dot{m}
Netto-Energierückgewinn [MJ, kWh].....	ERG _N
Nutzungsgrad [-].....	η
Spez. Wärmekapazität [J/kgK, kWh/kgK].....	c
Spez. Wärmemenge [MJ/m ³ , kWh/m ³].....	q
Temperatur [°C].....	ϑ
Temperatur, absolut [K].....	T
Temperaturdifferenz [K].....	$\Delta\vartheta, \Delta T$
Temperaturdifferenz, mittlere logarithmische [K].....	$\Delta\vartheta_m$
Temperaturwirkungsgrad [-].....	η_ϑ
Volumenstrom [m ³ /h].....	\dot{V}
Wärmedurchgangskoeffizient [W/m ² K].....	k
Wärmeleistung (Wärmestrom) [W, kW].....	\dot{Q}
Wärmemenge [J, kJ, Ws, kWh].....	Q
Wärmestrom [W, kW].....	\dot{Q}
Wirkungsgrad [-].....	η
Zeit [s, h].....	t

Indizes

Wärmeabgebendes Medium.....	1_
Wärmeaufnehmendes Medium.....	2_
Eintritt.....	_1
Austritt.....	_2

Abkürzungen

Abluft.....	ABL
Abwärmenutzung.....	AWN
Aussenluft.....	AUL
Fortluft.....	FOL
Quelle.....	Q
Senke.....	S
Speicher.....	SP
Umluft.....	UML
Wärmepumpe.....	WP
Wärmerückgewinnung.....	WRG
Zuluft.....	ZUL

 Vollständiges Verzeichnis in Heft 1!

Index

- Abgrenzung WRG/AWN in RAVEL, 5
- Abwärme, 23
- Abwärmenutzung, 5
- Anwendungsbereiche, 41
- Anwendungsgebiete im Hinblick auf RAVEL, 6
- Aussenlufttemperatur, 28
- Begriffe WRG und AWN, 5
- Benennungen, 55
- bestehende Anlage, 33
- Brüdenkompression, 21
- Checkliste, 33
- Checkliste «Wärmequelle», 51
- Checkliste «Wärmesenke», 51
- chemische Industrie, 43
- Computermethoden, 34
- diffuse Abwärme, 23
- Distanz zwischen Quelle und Senke, 35; 36
- Doppelrohrwärmetauscher, 16
- Druckabfall, 25
- Druckluftherzeugung, 42
- Einheiten, 55
- Elektro-Thermo-Verstärker, 6; 27
- Energiekonzept, 5
- Energieverbrauch, 38
- Enthalpiewirkungsgrad, 26
- externe AWN, 5
- externe Kosten, 37
- Fallbeispiele, 45
- Feuchtwirkungsgrad, 26
- finanzieller Gewinn, 30
- Formelzeichen, 55
- Fortluft-WRG, 9
- Frostschutz, 11
- gefasste Abwärmeströme, 23
- Graphit-Wärmetauscher, 17
- Hilfsenergie, 11; 25
- hydraulische Schaltungen, 10
- Indices, 55
- Industrie, 41; 42
- interne AWN, 5
- Kälteanlagen, 41
- Kategorien I bis IV, 9
- Kenngrossen, 26
- Keramik-Wärmetauscher, 18
- Kondensator, 17
- Kontamination, 11
- Kreislaufverbund, 18
- Kunststoff-Wärmetauscher, 18
- Lebensdauer der Anlage, 36
- Leistungsangaben, 14
- Leistungsregelung, 10
- Leistungsspitzen, 34; 37
- Lieferform, 14
- logarithmische Temperaturdifferenz, 24
- Messmethoden, 37
- Netto-Energierückgewinn, 30
- Neuanlage, 33
- Nutzungsgrad gemäss SWKI 89/1, 30
- Optimierung, 30
- Organic Rankine Cycle, 44
- Pinch Design Method, 49
- Planungshinweise, 33
- Planungsphasen, 40
- Plattenwärmetauscher für Flüssigkeiten, 15
- Plattenwärmetauscher für Luft, 14
- Problemstoffe, 41
- prozesslufttechnische Anlagen, 41
- Quellenparameter, 34; 35
- Regenerator, 9
- Reihenfolge der Massnahmen, 5
- Reinigung, 11
- rekuperative Systeme, 14
- Rekuperator, 9
- Rohrbündelwärmetauscher, 16
- Röhrenwärmetauscher, 16
- Röhrenwärmetauscher für Luft, 14
- Rotationswärmetauscher, 19
- Sanierung, 33
- Sankey-Diagramm, 23
- Senkenparameter, 34; 35
- Sicherheitsbarrieren, 44
- Spiralwärmetauscher, 16
- Stofftrennung, 36
- Temperaturdifferenz, 24; 34; 36
- Temperaturwirkungsgrad, 26; 27
- Vereisung, 11
- Verflüssiger, 17
- Verhältnis Energieangebot zu Energiebedarf, 34; 36
- Vernetzung von Quelle und Senke, 51
- Vernetzungsparameter, 34
- Wärmedurchgangskoeffizient, 24
- Wärmeerkopplung, 44
- Wärmepumpen, 20
- Wärmerohr, 19
- Wärmerückgewinn, 28
- Wärmerückgewinnung, 5
- Wärmetauscherformel, 24
- Wärmetransformator, 22
- Wärmeübertragung, 24
- Wirkungsgrad, 26
- Wirkungsgrade von Motoren und Ventilatoren, 28
- Wirtschaftlichkeit, 31; 36